中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 5 期： 1630–1641
评 述 专题：古气候模拟
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

古气候模拟中人类活动的参数化方法：现状与展望

张学珍[1,3]，王发浩[1]，郑景云[1,3]，李士成[2,4]，葛全胜[1*]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101
2. 中国地质大学(武汉)公共管理学院，武汉 430074
3. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049
4. 中国地质大学(武汉)流域环境与长江文化湖北省重点实验室，武汉 430074
* 通讯作者，E-mail：geqs@igsnrr.ac.cn

2025-09-28收稿，2026-01-24修回，2026-02-11接受，2026-04-09网络版发表
国家重点基础研究发展计划项目(2022YFF0801103)和国家自然科学基金项目(42577520)资助

摘要 人类自诞生以来，持续不断地改变地表覆被和大气成分，显著调节地表能量平衡、碳氮水等物质循环及地表摩擦阻力等，进而影响气候变化过程。人类活动参数化是连接人类活动与气候系统模拟的关键桥梁。其研究对象正逐步由土地利用/土地覆被类型变化(LULCC)扩展至土地利用强度(如复种、灌溉、放牧与施肥)及人为火活动等多种人类活动。同时，其表征方式也正在由以经验和统计为主的简单描述向更加过程驱动的参数化方案转变。但是，当前参数化方法仍存在数据稀缺、不确定性高和过于简化等问题。这些问题不仅削弱了模拟结果的可靠性，也增加了对气候变化中人类活动贡献进行判识和归因时的不确定性。未来研究需通过构建高分辨率数据集、发展多过程动态耦合模型、引入区域适配机制，并进一步深化历史(考古)-气候的跨学科融合，不断提升人类活动参数化的科学性，进而增强气候系统模式对人类活动影响的模拟能力，为加深对人地系统互馈机制的理解提供支撑。

关键词 气候模拟，人类活动参数化，土地利用/覆被变化，人地系统耦合

1 引言

数值模拟是揭示气候变化时空规律、阐明驱动因素与机理的重要手段(陈发虎等，2023；Bordoni等，2025；Simpson等，2025)。古气候模拟是气候模拟的一个分支，主要关注过去不同时间尺度的气候变化。相较于更早的地质时期，全新世最鲜明的特征之一是人类社会形态的深刻转型：新石器取代了旧石器，农业种植逐步取代了采集狩猎，人-地关系由以被动适应和“单向”利用环境为主，进入到主动改造环境的“双向”互馈新阶段(Jones等，2023；Zhou等，2023)。伴随着这一转变，气候与环境演化过程中逐渐显现出显著的人类影响信号。特别在过去2000余年间，随着铁器的大规模使用和技术能力的持续提升，人类对气候与环境的影响程度不断增强，地球气候演化呈现出自然变率与人类活动信号并存的特征(Ge等，2013)。因此，人类活动已经成为理解过去气候变化过程的不可忽视因素，在古气候模拟中如何定量表达人类活动成为当前研究的关键前沿问题。

出于对食物、能源、居住与文化等多重需求，人类活动呈现出高度多样性，包括毁林开垦、复种、灌溉、聚落建设、燃料燃烧、工业排放等。这些活动通过改变地表能量收支、碳汇能力、水循环过程及大气成分等多条路径影响气候，并表现出显著的多尺度特征(Chakraborty和Qian，2024)。例如，城市扩张主要影响局地微气候(袁宇锋和翟盘茂，2022)，农业开垦和灌溉作用于区域气候(Zhang等，2020)，而温室气体(GHG)和气溶胶排放则可引发全球尺度的气候响应(Allen等，2009；Jenkins等，2022)。不同类型、不同尺度人类活动之间的交互效应进一步增强了气候系统的非线性反馈过程。总体而言，人类活动对气候系统的影响具有多类型、多途径、多尺

中文引用格式：张学珍, 王发浩, 郑景云, 李士成, 葛全胜. 2026. 古气候模拟中人类活动的参数化方法：现状与展望. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1630–1641, doi: 10.1360/SSTe-2025-0327
英文引用格式：Zhang X, Wang F, Zheng J, Li S, Ge Q. 2026. Parameterizations of human activities in paleoclimate modeling: Current status and future perspectives. Science China Earth Sciences, 69(5): 1592–1604, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1877-y

© 2026《中国科学》杂志社

度的复合特征，理解并刻画这种复合特征是提升古气候模拟准确性的关键。

在气候模拟语境中，参数化(Parameterization)特指对无法在模式分辨率下显式解析的亚网格尺度物理过程的数学简化表达，用以弥合模式网格尺度与实际物理过程尺度之间的差异，例如积云对流常通过质量通量框架进行参数化描述(Ahn和Kang，2018)。在气候系统理论中，人类活动被视为“外部强迫”(External Forcing)，温室气体浓度、土地利用变化等通常作为气候模式的边界条件(Hurtt等，2020；李庆祥，2020；Meinshausen等，2020)。随着地球系统科学的兴起，人类活动被视为地球系统的“内生要素”，有研究尝试借鉴物理过程参数化的思想对土地利用、温室气体排放等人类活动过程进行显式建模与参数化表达(Hajima等，2025；Pan等，2025)。但与自然过程相比，人类活动受到政治、经济、文化等多重社会因素影响，具有高度非线性与异质性，难以通过统一、封闭的数学公式加以表达。因此，目前大多数气候系统模式和地球系统模式(下文合并简称为“气候模式”)仍将其作为系统的外强迫，表达为输入参数。

在古气候模拟中，人类活动的表达面临着一系列挑战。一方面，历史文献、考古记录及环境代用资料普遍存在间接性、不完整性与时空分辨率低的问题，使得将其转化为可用于驱动模式的、与现代数据兼容的人类活动指标具有较大不确定性；另一方面，人类活动通过碳循环、水热过程、动力摩擦等多种复杂途径影响气候系统，且影响机制存在显著的尺度耦合与非线性反馈特征，难以通过简化的参数形式进行系统性表达。人类活动表达的科学性和可靠性已成为制约古气候模拟精度的关键问题。本文拟系统梳理古气候模拟中人类活动参数化的主要方法，解析其不确定性，并展望未来的发展路径，为提升古气候模拟的科学性与可信度提供支撑。

2　古气候模拟中人类活动参数化方法

从人类活动对气候系统影响的视角出发，全新世以来人类活动主要可归纳为三类：一是改变土地利用/覆被类型，如农、林、草地之间的互转，直接改变地表辐射平衡、水分收支、摩擦阻力、陆地碳储量等；二是提升土地利用强度，包括复种、灌溉、放牧与施肥等，显著调控地-气之间的水、热、碳通量及地表摩擦阻力；三是人为火活动，涉及农事烧荒、工艺用火、祭祀用火等主动用火行为，是工业革命前人类影响植被结构与大气组成的主要手段。本文将围绕这三种人类活动，梳理其在气候模拟中的参数化方法(图1)。

2.1　土地利用/覆被类型变化(LULCC)的参数化方法

地表是人类活动的主要载体和作用对象。史前和历史时期LULCC的参数化方法通常包括两部分：一是LULCC重建，基于格网单元精细刻画土地利用/覆被类型的变化过程，形成气候模式的下边界强迫数据集(Chini等，2021)；二是根据土地利用/覆被类型确定地表物理参数，包括反照率(albedo)、粗糙度长度、冠层高度、叶面积指数(LAI)等关键参数，用于模拟地表能量收支、地-气之间水分与动量交换及生物地球化学过程。

(1) 史前LULCC重建。现有史前LULCC重建的主要内容是耕地和林地的变化，通常以人口规模及其变化作为关键驱动因子，通过设定人口与人均土地需求之间的关系进行重建。Kaplan等(2009)提出基于人口密度与人均土地需求关系重建史前森林砍伐和农业扩展的方法，强调史前农业生产效率较低，单位人口往往占用更大的土地面积。随后，Kaplan等(2011)在此基础上引入随技术进步逐步变化的人均土地需求参数，重建了全新世以来农业扩展与森林减少的时空特征，并构建了KK10数据集。Klein Goldewijk等(2017)也采用了人口驱动方法，但在人均土地需求和变化速率等关键参数设定上更为保守，构建了HYDE数据集。

近年来，考古证据逐步被引入作为独立约束条件，用以检验和修正模型驱动的重建结果。Ellis等(2021)从“人类生态位构建”的视角，系统论证史前人类活动在全球尺度上已广泛介入土地系统；Stephens等(2019)进一步整合全球考古数据库，从耕作、放牧和聚落活动等类型出发，对史前土地利用类型及其空间分布进行定性-半定量评估。为系统整合和检验这些重建结果，过去全球变化研究计划(PAGES)于2014–2021年发起了LandCover6k项目，基于全球考古与古环境证据，对过去土地利用格局进行了独立约束和综合评估，为史前与历史LULCC重建提供了经验基准与不确定性参考区间(Gaillard等，2025；Welton等，2025)。

(2) 历史LULCC重建。历史LULCC重建普遍采用历史文献记录，主要包括土地利用面积重建、格网化空间分配与不确定性分析等步骤(何凡能等，2019；Kabora等，2024)。历史文献记录内容大多是耕地面积的代用数据，如户、口统计数据(Wu等，2025)、人均或户均耕地面积(Hill等，2024；李士成等，2025)、人均粮食消费量(Wang等，2023)等，仅少数历史文献记录是耕地面积数据(Li等，2016)。即使记录了耕地面积，也并非物理面积，而是税收单位，且统计数据上报和转抄过程存在一定程度的主观编造和客观错误(何凡能等，2016)。以

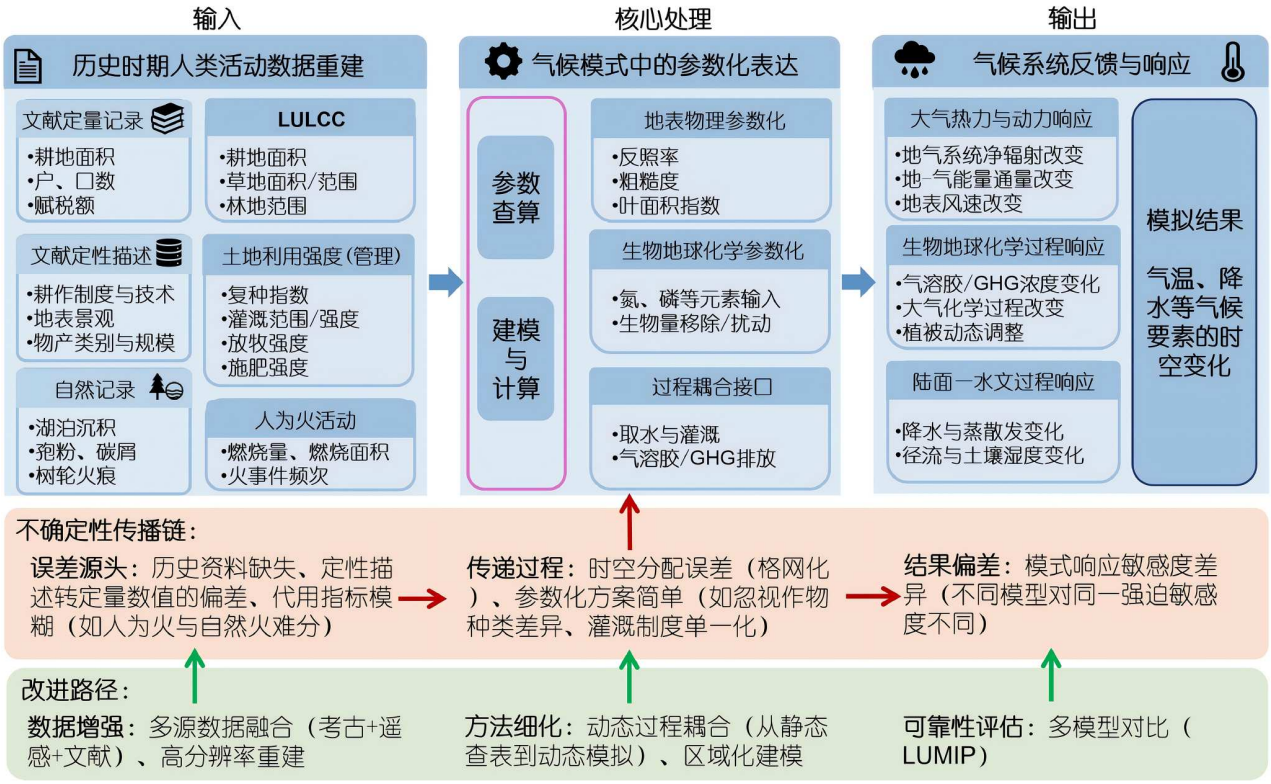

图 1　古气候模拟中人类活动参数化概念框架图

HYDE和KK10为代表的全球数据集主要采用“人口-耕地倒推法”，基于历史人口数据推算区域耕地面积(Kaplan等，2011；Klein Goldewijk等，2017)。区域(如中国、欧洲部分)LULCC重建则普遍采用“基于历史文献的挖掘与校核”策略，通过挖掘、整理历史文献中的耕地面积数据或者其代用数据，结合当时的社会背景和当地的水土资源禀赋，综合使用时间维的纵向对比和空间维的横向对比方法重建耕地面积(Fuchs等，2015；方修琦等，2019；Sluyter，2021；李俊等，2024)。

其次，历史文献的记录单元通常是行政区，为满足气候模式格网化的数据需求，还需要将行政区耕地面积分配至精细的模式网格，下文简称“格网化”(Ye等，2025)。目前，常见的格网化方法可概括为“自上而下”和“自下而上”两类。“自上而下”的方法基于自然环境对农业生产影响的理论，采用坡度、土壤质地、气候条件、水源可达性等自然环境因子构建宜垦性指数，将宜垦性指数作为权重，对行政区总耕地面积进行格网化分配(Yang等，2024)，代表性成果包括SAGE数据集(Ramankutty和Foley，1999)和过去千年中国耕地数据集(何凡能等，2023)。近年来，“自上而下”的格网化方法通过引入聚落变化、圩田围垦等反映地区开发过程的因子嵌入了耕地开垦的时间动态过程信息，形成了开垦时序过程与自然宜垦性相结合的耕地开垦优先度算法(Li Y K等，2019；Zhang等，2023；Wang F H等，2024)。“自下而上”的方法算法采用规则化或基于主体的模型(如Cellular Automata、Agent-Based Model)模拟耕地空间分布随时间的扩张与收缩过程，再结合历史人口增长、政策变化、战争灾荒等事件的影响进行耕地空间分布重建(龙瀛等，2014；Yang等，2015)。

最后，开展历史LULCC数据集的不确定性评估。包括两个维度：一是数据源的可信度分析。通常从历史文献、统计年鉴、考古记录等资料的时间完整性、空间覆盖度、代理指标的物理意义及其影响因素等方面，通过交叉验证、专家判断等手段对数据源的可信度进行量化分析(方修琦等，2020)；二是建模和空间分配的误差分析。通常采用多模型对比、敏感性实验与方案情景对比等方法。例如，Klein Goldewijk等(2017)在HYDE3.2数据集中通过为历史人口规模及人均土地利用面积设定上下限，并构建不同的不确定性情景，量化了全球历史土地利用/覆被变化估计的误差区间。

(3) 地表物理参数的确定。在气候模式中，确定地表物理参数的方法通常可归纳为两类。其一是利用气候模

式内嵌的地表参数查算表，从中查找土地利用/覆被类型对应的地表物理参数(Vahmani和Hogue，2014；孙爽等，2022；陈进燕等，2023)，可称为“查算表法”。这是一种比较经典的方法，具有实现简便、参数设定透明等特点。其实现通常依赖于明确的土地利用/覆被分类体系，如MODIS或IGBP分类体系，并具备二维表格形式的查算表，记录了各类土地利用/覆被参数取值。查算表中的参数值通常是利用实测资料和遥感数据计算的各土地利用/覆被类型的代表性平均值(Blyth等，2021)。例如，可利用MODIS albedo产品计算地表反照率(He等，2025)；利用林分结构数据、激光雷达观测数据计算粗糙度长度与冠层高度(边瑞等，2021；Floors等，2021)。历史LULCC的气候效应模拟研究广泛采用了这种参数化方法(Pongratz等，2010)。

其二是利用动态植被模型(DGVM)，在给定气象要素驱动下，结合土地利用/覆被所对应的植被类型，生成动态地表参数值，形成气候-植被-地表参数的互馈(Martín Belda等，2022；李思其等，2024)，可称为“动态模型法”。动态植被模型模拟了植被对气候、水文、CO_2浓度等因子的响应机理，通过植被竞争、生长、死亡与演替等生态过程，模拟植被生长状态并确定优势植被功能型(PFT)，在模拟过程中动态输出地表参数值(Sato等，2007)。如LPJ-GUESS(Pascual等，2024)、ORCHIDEE-VG(Dinh等，2024)、CLM-DGVM(Deng等，2022)等动态植被模型常与气候模式耦合，再现叶面积指数、反照率、根深、蒸散发系数等地表物理参数的时空变化。与查算表法相比，动态模型法能够刻画地表物理参数对气候变化的动态响应过程，增强了地-气相互作用的物理一致性，克服了查算表法在表征参数时变性方面的局限，代表了地表参数化方法的重要发展方向。已有古气候模拟研究开始采用这种参数化方法(Braconnot等，2019)。

2.2 历史土地利用强度变化的参数化方法

史前社会尽管已存在耕作、放牧等土地利用活动，但受人口规模、技术条件与生产组织方式的限制，其土地利用强度整体较低(Stephens等，2019)。进入历史时期，随着人口压力增加和农业技术进步，土地利用强度持续提升(Kaplan等，2011；Ellis等，2013)。其主要手段包括：增加耕作频率(如一年多熟)、扩大灌溉面积以实现集约化农业、引入牲畜放牧以利用边际土地资源、改良农具或农艺措施等(韩茂莉，2012；梅新育，2022；Adil等，2024)。高频次耕作和持续放牧可改变地表植被覆盖、土壤结构和地表反照率，进而影响能量收支与水汽通量(de Noblet-Ducoudré等，2012；Li R S等，2024)。灌溉引起土壤湿度变化与局地蒸散增强，进而调节边界层结构，影响区域降水与温度(Thiery等，2017)。此外，农业活动相关的温室气体排放，如甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)，通过改变大气成分参与气候系统反馈(IPCC，2013)。因此，在历史气候模拟中，对土地利用强度进行准确参数化表达是提升模拟结果可信度的重要内容(Lawrence等，2016；Hurtt等，2020)。

(1) 历史时期复种的参数化方法。复种指数是衡量单位面积耕地利用强度的重要指标。早期研究通常基于现代熟制的地理分布推断历史时期的复种范围。近年来，随着历史地理学、考古农业地层研究以及文献量化方法的发展，基于历史人口、土地利用、农业技术演进的逻辑推演逐渐被引入，用于重建历史复种指数的变化(Hoffmann，2014)。例如，在欧洲地区，Zhang等(2023)发现1000–1850年间法国和德国部分地区经历了由二田制向多田轮作或三田制的转变，而意大利则长期维持二田制结构。在中国地区，陈桂权和曾雄生(2016)基于古农书和现代农史研究成果，总结指出中国古代北方以豆-谷轮作为主，南方以粮-肥轮作为主；李士成等(2024)利用地方志和已发表论文中关于熟制和作物组合的信息，重建了清中期以来中国华北平原县级尺度的熟制演变过程。

在气候模式中，复种的参数化主要体现在作物物候期配置、地表覆盖特征参数(如LAI、albedo等)的季节变化以及农业管理时序调度等方面。多数模型通过设定作物类型及其栽培时间序列，反映不同复种制度下作物覆盖格局的差异(Mathison等，2021；Wang F等，2024a)。例如，在CLM、LPJmL、ORCHIDEE等动态植被模型中，采用基于日尺度气候驱动的作物生长模块，结合历史复种范围数据，配置“春播-夏收-秋播-冬闲”等不同耕作制度，从而调整作物功能类型(CFT)的年内替代顺序与时间占比(Lutz等，2019；Lombardozzi等，2020)。此外，部分模型还根据复种制度调节土壤扰动频率，并刻画耕作频次对土壤有机碳矿化速率的影响，实现农耕强度与碳循环耦合(张童瑶等，2020；Jordon和Smith，2022)。

(2) 历史灌溉活动的参数化方法。历史时期灌溉活动的量化指标主要包括：灌溉面积、灌溉强度(如单位面积灌溉频次)、水源类型(如河流引水、地下水提取)及灌溉方式(如漫灌、沟灌等)(Cook等，2015)。其中，灌溉面积是最常用的指标，其重建方法主要有两类：一类是基于历史文献、地方志、水利工程记载等文献数据，结合农业耕作制度推演与考古证据约束，构建灌溉面积的时序演变过程(汪家伦和张芳，1990)，如中国安阳地区近2000年灌溉面积的定量重建(李建蕊等，2025)；另一类是基于历史农田空间分布数据，引入气候与水资源条件

等外在约束，从灌溉的必要性和可行性角度推断历史灌溉耕地的范围，如HYDE数据集基于历史统计资料，并结合气候干旱指数与水资源可获得性等约束条件，重建了历史时期灌溉耕地面积及其空间分布(Klein Goldewijk等，2017)。在全球尺度上，Siebert等(2015)基于历史统计资料与土地利用数据，重建了1900–2005年间全球灌溉耕地的空间分布及其演变过程。

在气候模式中，灌溉活动的参数化方案主要有两种：一种是水量注入法，即直接向灌溉耕地的土壤水层或植被根区层添加灌溉水量，以维持土壤水分处于特定临界阈值之上，该方法在CLM、LPJmL、ORCHIDEE等模型中已有应用(Lawrence等，2019；Thiery等，2020)；另一种是能量收支耦合法，即将灌溉水作为一种扰动因子显式纳入地表能量平衡过程，模拟其对潜热、感热通量及地表反照率等变量的动态反馈(Yao等，2022；Dombrowski等，2024)。在这些参数化方案中，历史时期灌溉面积和灌溉强度重建结果是关键输入参数。值得注意的是，灌溉参数化效果还依赖于灌溉时序与灌溉策略的假设(如定时灌溉、需水灌溉)。未来的重要改进方向之一，是在模型中引入“决策行为”机制或社会水资源分配函数，以更真实地刻画灌溉活动的社会-生态耦合特征。

(3) 历史放牧活动的参数化方法。历史时期放牧活动的量化指标包括单位面积放牧强度(单位面积的牲畜头数)、草地利用率(即草地产出与采食需求之比)、放牧时长与牲畜种类结构(牛、羊、马等比例)(Wang D J等，2024)。其中，单位面积牲畜头数是应用最为广泛的指标之一(Houghton等，1991；Dahlström，2008)。该指标的重建主要依赖三类信息源：一是人口规模与畜牧业占比等社会统计资料，如《二十四史》中对畜牧业的系统记载；二是历史经济地理文献与税赋制度资料，如以牛羊头数计税的制度可反映牲畜总量(魏明孔和杜常顺，2019)；三是草地承载力模型与现代样本推演相结合的经验估算方法，例如将气候-植被适宜性与潜在植被生产力模拟结果相结合，可以估算历史时期草地的潜在生物量产出，并据此约束区域尺度上可支持的放牧强度或潜在牲畜承载规模(Kaplan等，2011)。

在气候模式中，放牧活动的参数化通常通过调制草地植被状态、地表过程和碳循环过程加以表达。一种实现路径是植被动态调节法，即在动态植被模型(如LPJ、ORCHIDEE等)中引入牲畜采食系数或生物量削减系数，直接模拟放牧对叶面积指数、净初级生产力(NPP)和地上生物量(AGB)的影响(Chang等，2013；彭书时等，2020)。另一种实现路径是扰动-恢复耦合法，即通过在模型中设定放牧扰动函数(例如割草强度、日常采食消耗率、踩踏影响系数)，并将其叠加在自然生长过程之上，模拟草地植被在持续扰动与自然恢复之间的动态平衡(Petersen等，2021)。此外，还有一些模型(如LPJmL 3.6)进一步考虑了放牧活动通过调节植被生长状态、改变蒸散发过程，从而影响陆面水文过程的间接效应(Rolinski等，2018)。

(4) 历史时期施肥活动的参数化方法。作为一种直接影响土壤养分循环的人类活动，施肥不仅反映了土地利用的技术水平与强度，还调节着陆地生态系统中的碳、氮循环及其与气候系统的相互作用(Shen等，2024)。与耕地扩展或灌溉增加等人类活动不同，历史时期施肥活动在时间和空间上的演变更难量化重建，缺乏系统性的定量记录是主要限制因素。部分研究尝试通过代理数据并结合模型假设，在气候模式中对历史施肥活动进行参数化表达(Cao等，2018；Adalibieke等，2023)。例如，在HYDE 3.2等全球网格化土地利用数据集中，施肥活动通常被隐含在“农业管理强度”参数中，体现为人口加权的耕地垦殖率变化(Klein Goldewijk等，2017)。

在气候模式中，施肥通常被视为反应性氮素向土壤库的输入过程，可进一步影响土壤碳-氮耦合过程、净初级生产力以及温室气体排放(Zaehle等，2011)。在历史气候模拟中，施肥强度(如单位面积年施氮量)通常通过统计数据进行估算，或通过人均家畜数量及其粪肥循环利用率进行间接推算，尤其在中国、欧洲等农业文献记录相对丰富的地区有较好的数据基础(Bouwman等，2013，Yu等，2022)。例如，在LPJmL和CLM-CN等模型中，施肥可通过建立区域尺度的农业管理图层加以实现，其参数设置通常与作物类型、生育期以及养分限制状况等因素相关(Bondeau等，2007)。

2.3　人为火活动的参数化方法

在人类活动影响气候系统的诸多路径中，人为火活动(Anthropogenic fire activity)扮演着重要角色(Jones等，2022)。尤其在工业革命之前，人为火活动不仅是主要的能源获取方式，还广泛应用于农业、土地开发、狩猎与工艺生产等领域，诸如：农事用火(如焚荒、烧田)、土地开垦用火(如烧林)、狩猎驱火，以及制陶与金属冶炼等工艺活动(Brown等，2009；高星，2020；Kelly等，2020)。这些活动不仅直接影响了区域植被组成、土地利用强度和地表反照率，从而改变了地表能量收支，还通过释放气溶胶和温室气体间接改变了大气成分，对气候系统产生深刻影响(Jones等，2024)。与自然野火相比，人为火活动具有更强的周期性、地域性和文化控制特征，其历史演化过程受人口变化、农业技术发展、能源结构

转型及制度约束等多重因素共同影响。因此，合理刻画人为火活动的空间分布及其演化过程，成为提升古气候模拟精度的重要内容。

(1) 史前和历史时期人为火活动重建。人为火活动的参数化首先依赖于其表征指标的量化重建(Conedera等，2009)。现有研究主要采用三类指标表征人为火活动：燃料燃烧量、燃烧面积与火事件频次。对于史前时期，主要基于古环境记录(如湖泊沉积炭屑、冰芯烟尘、树轮火痕等)推算区域火活动历史(Davies等，2022；Sweeney等，2022；刘剑波等，2024)。但是，由于缺乏直接证据，目前尚无法对单次或局地火事件进行确定性区分自然火与人为火，仅能在区域-长期尺度上，通过多指标综合分析与概率判别，对“人为火活动的存在与相对强度”进行可信推断(Rabin等，2017)。

对于历史时期，文献统计法广泛应用于中国、欧洲等历史文献保存较为丰富地区。已有研究通常从古代官修志书、农书、灾异记录中提取与农事用火、土地开垦和生计活动相关的信息，用以人为火活动指标的重建(周尚兵，2006；McClain等，2021；de Oliveira等，2023)。例如，de Oliveira等(2023)系统整理了12–19世纪末葡萄牙历史文献中农事与生计用火的记载，提取其用途及季节性特征，用以刻画传统社会人为火活动的时空模式；亿里(2000)基于历史文献中“火耕、火种、畲、刀耕火种”等记录，重建了唐宋时期畲田农业的地理分布，间接刻画了与农业开垦相关的人为火活动的空间分布。除上述基于火活动指标的直接重建方法外，Pfeiffer等(2013)构建了一个以人口密度与人类生计方式(狩猎采集、游牧和农业)为驱动的间接重建模型，在全球尺度上重建了史前至前工业时期人为火活动的时空演变过程。

(2) 人为火活动在气候模拟中的表达。在气候模式中，人为火活动的参数化方法主要可归纳为两类：一类是基于燃烧强度或发生频率计算气溶胶与温室气体排放量，将其作为大气强迫项，用于驱动大气化学和辐射过程(van Marle等，2017)；另一类是基于LULCC引入燃烧扰动项，影响陆面模型中的碳收支、水热通量与地表反照率等关键过程(Li F等，2019)。目前，多数气候模式(如CESM、MPI-ESM)均集成了火活动模块(如SPITFIRE、LMfire)，其输入通常来自再分析火排放清单(如GFED4s、HESFIRE)或研究者构建的区域尺度火活动数据集(Oberhagemann等，2025)。在具体实现中，模型通常依据重建的燃烧面积与燃料类型估算气溶胶(如黑碳、硫酸盐)释放量以及CO_2和CH_4等温室气体排放量，并通过辐射传输模块模拟其对短波和长波辐射的调控效应；同时，烟尘和气溶胶输入还可影响辐射传输与云凝结核形成，从而间接调节降水分布与地表能量平衡(van der Werf等，2017)。近年来，火活动与土地反照率、土壤水分、植被再生过程的耦合机制被逐渐引入模型，使人为火活动的影响从“气候强迫”向“地-气过程反馈”拓展(Hanan等，2022；Wu等，2022)。

3 古气候模拟中人类活动参数化方法的不确定性及其影响

受观测资料缺失、人类活动数据重建方法差异、参数化方法简化等多重因素的影响，人类活动参数化具有较大的不确定性。这些不确定性会调制气候模式对人为外强迫的响应敏感性，从而影响古气候变化模拟结果的准确性，并增加对气候变化中人类活动贡献进行归因时的不确定性。本节从人类活动数据重建的不确定性、参数化表达方式的不确定性、模式响应过程的不确定性及其对模拟结果的影响四个方面展开论述。

3.1 人类活动数据的不确定性

人类活动参数化的首要环节通常是构建高时空分辨率的人类活动指标数据集，如LULCC图谱、灌溉强度、放牧密度、人为火活动频率等。然而，这些数据的重建过程往往依赖间接证据与假设推演，因而不可避免地引入较大的不确定性。

首先，LULCC图谱的构建多依赖人口数据、经济地理资料、历史档案与地方志等，而缺乏现代科学意义上的直接定量观测指标。例如，HYDE数据库中史前及历史早期(公元1000年前)土地利用/覆被信息主要基于人口密度与人均耕地面积进行推算(Klein Goldewijk等，2017)。不同研究对人均耕地面积的设定差异显著，从而导致耕地面积估算相差数倍(Pongratz等，2008；Kaplan等，2011)。此外，HYDE数据集在耕地空间分配过程中未充分考虑农业开垦时序的区域差异，使得重建结果在空间格局上趋近于现代耕地分布，难以反映过去2000年中国农耕区由黄河中下游逐渐向南、北扩展的历史过程(方修琦等，2021)。

其次，历史时期灌溉、施肥等土地利用强度指标的重建难度更高。主要是因为历史文献中定量记载极为有限，相关信息多以定性描述形式出现，如“渠道年久失修”“亩产渐丰”，需经研究者将其转化为可用于模型的定量指标。由于灌溉、施肥活动高度依赖社会制度、技术水平与区域水文环境，不同地区和不同历史阶段在灌溉与施肥规模、强度及方式上差异显著，使得由定性表述转为定量数据的过程高度依赖研究者在农业技术、农业地理、赋税制度等方面的综合判断。以灌溉活动为例，

李建蕊等(2025)在重建中国华北平原安阳地区过去两千年灌溉活动时，假定“水渠长度-灌溉面积”之间的比例关系保持不变。该假设未充分考虑技术进步与水利制度变迁对灌溉效率的影响，从而为灌溉面积重建引入了额外不确定性。对于施肥活动而言，施肥对象(粮食/经济作物)、施肥材料(粪肥、厩肥、灰土)和养分利用效率均难以准确量化，现有参数化方案通常采用高度简化处理的方法(Bouwman等，2013；Lu等，2022)。

此外，复种指数、人为火活动、放牧强度等人类活动指标的重建往往更加间接。复种指数与耕作频率之间尚缺乏统一的定量关系，不同地区和历史阶段在复种制度与作物轮作方式上差异显著(韩茂莉，2000)，采用定常参数进行简化处理可能难以反映真实历史情形。人为火活动的重建多依赖炭屑沉积、花粉谱、生物碳记录等古环境指标，但这些指标普遍存在源区混合问题，难以用于明确区分自然火与人为火的贡献(Marlon等，2008；Bird等，2024)。放牧强度重建通常基于家畜数量对地表压力的推断，但早期社会牲畜养殖记录严重缺失，迫使研究者往往依赖零散的赋税资料或简化模型，从而进一步放大了重建结果的不确定性(Namdar等，2024)。

3.2　参数化表达方式的不确定性

在缺乏精确观测资料的背景下，在气候模式中人类活动往往需通过简化的“代理参数”进行表达。然而，这种简化处理容易忽略关键过程与机制，从而引入额外的不确定性。例如，LUH2数据集仅区分耕地、牧地、林地、城市等12类土地利用/土地覆被类型，难以精细刻画不同耕作方式、作物类型或林分结构等内部差异(Hurtt等，2020)。在气候模式中，“耕地”通常被作为单一土地利用/覆被类型处理，赋予一组固定的地表参数，而不再区分水稻田、旱地、园艺地等不同耕作类型之间的差异(Pitman等，2009)。这种基于类别泛化的土地利用/覆被参数化方法可能显著影响地表能量收支的模拟，尤其会改变蒸散通量与感热通量之间的分配关系。

另外，灌溉、施肥和放牧等人类活动的参数化高度依赖模型假设，进一步放大了不确定性。例如，灌溉参数化方法常将灌溉简化为：只要土壤含水量低于设定阈值且处于灌溉区域范围内，自动补水至田间持水量(Lawrence等，2016)。这一规则未考虑实际灌溉制度的时间限制、水源可及性与输水效率等因素，因而可能高估灌溉冷却效应。施肥参数化在LPJmL和CLM-CN等模型中多体现为向土壤输入反应性氮素，从而增加氮循环通量并提高净初级生产力，但往往忽略施肥诱导的温室气体排放(N_2O)与土壤酸化等负效应。人为火活动的参数化通常将火源频率、火焰温度、燃料负荷等转化为植被损失与气溶胶排放，但现有火活动模型(如SPITFIRE和INFERNO)的参数率定主要依赖现代观测数据，其假设未必适用于历史时期具有特定文化背景、技术条件和用火目的(烧荒、狩猎、祭祀)的人为火活动(Pfeiffer等，2013)。由此可能导致模拟的人为火活动气溶胶排放总量及其年际和季节变化特征与历史实况存在显著偏差，从而削弱了模式对区域气候扰动的刻画能力(Li　F等，2024)。

3.3　气候模式响应过程的不确定性

不同气候模式对人类活动参数化输入的响应敏感度存在显著差异。首先，大多数全球气候模式的水平分辨率约为1°(经、纬度)，而历史和史前时期的人类活动往往集中于河谷平原、绿洲等局部地区，其空间尺度远小于模式网格尺度。因而，气候模式难以精确刻画小尺度土地利用变化，从而可能低估人类活动对局地能量平衡的扰动(Davin等，2020)。其次，不同气候模式对相同土地利用/覆被变化所引起的地表物理参数调整(如反照率变化、土壤湿度)的响应存在显著差异。这种差异在不同空间分辨率和地表过程耦合下尤为明显(Pitman等，2009)。例如，多数陆面过程模型主要通过地表反照率和粗糙度参数区分农田与其他地类，而CLM则采用动态植被模型，显式考虑更细致的植被季节性变化、水分通量变化等过程，从而导致不同模式中同一类LULCC的气候效应不一致(Lawrence等，2016)。再次，对于放牧、施肥等反映土地利用强度的人类活动，其在多数气候模式中的表达较为简化，部分模式甚至忽略其对土壤水分、碳循环及局地能量收支的影响。这种简化处理可能导致人类活动对气候系统的实际影响被低估(Heinke等，2023；Wang F等，2024b)。

3.4　参数化的不确定性对模拟结果的影响

上述三方面的不确定性对人类活动气候效应的模拟结果产生了深刻影响。首先，不同研究对LULCC、灌溉、放牧等人类活动引起的温度效应模拟结果差异显著，其幅度在不同模式间甚至可相差数倍。例如，Lejeune等(2017)通过分析CMIP5数据发现，不同气候模式模拟的LULCC温度效应存在鲜明分歧：HadGEM2-ES模拟的北半球中纬度夏季呈现降温效应(−0.4 ℃)，而IPSL-CM5A-MR则为升温效应(0.5 ℃)。其次，人为火活动和施肥所诱导的气溶胶和N_2O排放缺乏长期、连续的历史观测资料支撑，现有模拟多依赖现代经验参数向历史时期外推。这种处理方式显著增加了历史时期气溶胶与温室气体排

放辐射强迫估算的不确定性(van Marle等，2017)。再次，上述不确定性进一步干扰了气候变化归因研究，制约了对气候变化中人类活动贡献的定量认识。这一问题在涉及前工业时期人类活动影响的研究中尤为突出。例如，Ruddiman(2003)提出“早期人类影响”假说，认为土地利用等人为活动已在工业革命前已对大气成分与气候系统产生了显著影响。后续基于气候模式的研究在验证该假说时，往往依赖土地利用变化与人为火活动的参数化，从而将人类活动重建与参数化的不确定性传递到归因结论之中。

4 展望

伴随着对气候变化与人类活动关系认识的不断深化，古气候模拟日益受到重视。作为连接人类活动与气候系统模拟的关键桥梁，人类活动参数化的研究对象正逐步从LULCC，拓展至复种、灌溉、放牧、施肥、火活动等。然而，现有的参数化方法体系仍面临多重挑战，未来亟需在数据基础、模型耦合、区域差异化处理及跨学科整合等方面开展深入研究。

首先，重建更高时空分辨率的人类活动数据仍是未来研究的重点。当前主流土地利用数据产品(如HYDE、LUH2)在空间分辨率上往往不足以刻画区域乃至局地尺度的人类活动空间异质性。在东亚、南亚等人口密集、农耕历史悠久的地区，乡土型土地利用模式的演化与人为扰动普遍呈现出显著的小尺度特征，而这些小尺度特征在全球土地利用数据集中已被平滑处理，未得到有效表达。中国华北地区历代农田灌溉、水渠布局与局部的毁林在全球数据集的像元尺度中也被平均化处理。因此，未来需要更广泛地融合历史文献记载、考古发现与遥感数据，研发因地、因时制宜的空间格网化方法，构建区域适用、时间连续的高分辨率人类活动数据库。同时加强多源、同类数据之间的对比验证，以提升数据可靠性与空间代表性。

其次，从气候模式的参数化能力看，当前多数气候模式已具备较为成熟的LULCC参数化方案，而耕作频率、灌溉强度、放牧密度等“土地利用强度”因素的参数化能力明显不足。未来需加强土地利用强度参数化方法研究，增强气候模式中人类活动的刻画能力，使气候模式能够根据不同时期人类活动强度的变化，自适应调节地表能量收支与水文过程。例如，在陆面水文子模块中引入历史灌溉率，动态调整土壤含水量；在动态植被模块中考虑历史放牧压力变化，定量刻画放牧对植被高度和覆盖度的影响等。这类多源异构人类活动变量的引入，有助于更真实地刻画历史时期人类活动对陆面过程乃至区域气候的反馈效应。

进一步而言，人类活动参数化需更加重视区域差异性。目前，多数参数化方案采用全球统一的规则设定，未充分体现不同自然地理单元之间人类活动作用于气候系统的主要机理及敏感变量的差异。例如，在中亚干旱区，即使有限的农业灌溉也能显著改变大气底层湿度与边界层结构，从而放大其气候效应(张学珍等，2022)。因此，在参数化方法设计上，有必要引入“区域适配”机制，即在统一框架下针对不同区域设置差异化的参数敏感性函数、模型子模块或边界条件处理方式，从而增强模型对区域响应特征的刻画能力，使同一类人类活动在不同自然约束条件下产生差异化的气候效应。在这一点上，可借鉴区域气候模拟中常用的“网格嵌套-区域物理参数重构”模式(Giorgi，2019)，以实现全球一致性与地方机制真实性之间的有效平衡。

此外，未来还应加强多学科协同整合，特别是历史学、考古学、环境人文学与地理建模等领域的深度融合。人类活动本身具有高度社会文化属性，其时间演化过程往往受到制度更替、人口迁徙、战争动乱与宗教信仰等非自然因素的深刻影响，仅依赖地理与气候数据难以重建历史事实。构建涵盖“制度变迁-技术变革-土地利用行为-气候反馈”的一体化参数化框架，可能成为多学科融合的重要突破口。要实现这一目标，需要培养新型的复合型人才：既具备扎实的历史学与考据学素养，能够严谨解读文献档案和考古遗存中蕴含的人类活动信息；又熟练掌握气候学知识和气候模式原理，理解人类活动参数化的物理、化学与生物学基础；同时，还需熟练运用数据科学技术，如时空统计分析、机器学习、数据同化方法。

最后，鉴于目前不同人类活动参数化方案在模型层面缺乏统一标准，未来应推动建立适用于不同时期、空间尺度与模式框架的“人类活动参数化标准库”。该标准库可涵盖变量定义、数据格式、时间分辨率、适用区域与不确定性等级等关键信息，并鼓励开放共享、持续更新，从而为后续模拟研究提供稳定、可靠的参数源。

综上所述，人类活动参数化方法正处于由以经验和统计为主的简单描述向更加过程驱动的参数化方案转型的关键阶段。只有通过高分辨率数据基础、多变量动态耦合、区域机制适配与跨学科协同整合，才能显著提升古气候模拟对复杂人类-自然系统相互作用的表征能力。这不仅有助于更深入地认识人类活动在古气候变化中的作用机制及其贡献，也将为增强气候模式的模拟能力、进而提升未来气候变化预测的可靠性提供坚实的理论与方法支撑。

5　小结

本文总结了古气候模拟中人类活动参数化方法的现状，围绕土地利用/覆被类型转换、土地利用强度变化和人为火活动三类主要人类活动，梳理了当前常用的参数化方法、关键输入数据源及其在气候模式中的表达机制。在此基础上，本文指出了现有参数化方法在数据稀缺性、模型结构简化和不确定性偏高等方面面临的突出问题，以及这些问题对气候模拟结果的潜在影响。

未来的突破将更多依赖于高分辨率人类活动数据的重建、动态耦合机制的建立，以及对制度、文化、技术等社会变量建模能力的提升，并强化社会-生态耦合参数化的研究。参数化不应再停留在对“输入变量”的静态估计层面，而应逐步将“人类决策-气候反馈”的闭环机制纳入模型框架，刻画制度安排、政策调控与技术变迁对气候系统的反馈效应。为实现这一目标，有必要进一步加强跨学科协作，培养文理兼修的复合型人才。同时，引入多源数据融合与人工智能技术，拓展人类活动数据获取路径，通过时空插值、不确定性量化等方法弥补单一资料来源的不足，提升重建结果的精度与鲁棒性。在模型层面，还需完善人类活动参数化的“全球-区域-局地”多尺度适配机制，提升模型结构对不同尺度人类活动的响应能力与解释力，并通过多尺度耦合实验，探索人类活动影响气候的临界阈值与非线性反馈效应。

从气候变化长期演化的视角看，人类活动不仅是过去气候变化的解释因子，也是未来气候演变的驱动因素。因此，构建面向千年尺度的人类活动参数化体系，其意义不仅限于弥合自然科学与社会科学之间的知识鸿沟，也将为提升气候预测能力提供不可或缺的理论基础与方法支撑。

参考文献

边瑞, 年雁云, 勾晓华, 等. 2021. 基于无人机激光雷达的森林冠层高度分析——以祁连山东、中部青海云杉为例. 遥感技术与应用, 36: 511–520

陈发虎, 段炎武, 郝硕, 等. 2023. 全新世温度大暖期模式与持续升温模式: 记录-模型对比问题及其研究展望. 中国科学: 地球科学, 53: 1699–1717

陈桂权, 曾雄生. 2016. 我国农业轮作休耕制度的建立——来自农业发展历史的经验和启示. 地方财政研究, (7): 87–94, 104

陈进燕, 赵龙, 阳坤, 等. 2023. 基于卫星遥感数据的Noah-MP地表反照率关键参数优化. 空间科学学报, 43: 1135–1149

方修琦, 叶瑜, 张成鹏, 等. 2019. 中国历史耕地变化及其对自然环境的影响. 古地理学报, 21: 160–174

方修琦, 赵琬一, 张成鹏, 等. 2020. 全球历史LUCC数据集数据可靠性的评估方法及评估案例. 中国科学: 地球科学, 50: 1009–1020

方修琦, 何凡能, 吴致蕾, 等. 2021. 过去2000年中国农耕区拓展与垦殖率变化基本特征. 地理学报, 76: 1732–1746

高星. 2020. 史前人类的生存之火. 人类学学报, 39: 333–348

韩茂莉. 2000. 中国古代农作物种植制度略论. 中国农史, (3): 91–99, 64

韩茂莉. 2012. 中国历史农业地理. 北京: 北京大学出版社

何凡能, 李美娇, 刘浩龙. 2016. 北宋路域耕地面积重建及时空特征分析. 地理学报, 71: 1967–1978

何凡能, 李美娇, 杨帆. 2019. 近70年来中国历史时期土地利用/覆被变化研究的主要进展. 中国历史地理论丛, 34: 5–16

何凡能, 杨帆, 赵彩杉, 等. 2023. 过去千年中国耕地网格化重建与时空特征分析. 中国科学: 地球科学, 53: 115–131

李建蕊, 李士成, 刘亚婷, 等. 2025. 历史时期中国中原农耕区灌溉耕地规模变化过程重建——以河南省安阳市北部为例. 地理科学进展, 44: 853–865

李俊, 叶瑜, 方修琦, 等. 2024. 过去200年欧洲耕地格网化重建. 中国科学: 地球科学, 54: 3005–3022

李庆祥. 2020. 用外部强迫因子对近百年陆地降水变化的统计建模试验. 科学通报, 65: 2266–2278

李士成, 刘亚婷, 李建蕊, 等. 2024. 清代以来华北平原作物熟制演变重建与驱动力分析. 地理学报, 79: 765–778

李士成, 高等, 赵志龙, 等. 2025. 过去千年加拿大耕地面积与空间格局重建. 中国科学: 地球科学, 55: 1671–1682

李思其, 张旭, 陆正遥, 等. 2024. 植被模型研究进展与展望. 中国科学: 地球科学, 54: 2762–2782

刘剑波, 李建勇, 韩岳婷, 等. 2024. 中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化. 海洋地质与第四纪地质, 44: 156–169

龙瀛, 金晓斌, 李苗裔, 等. 2014. 利用约束性CA重建历史时期耕地空间格局——以江苏省为例. 地理研究, 33: 2239–2250

梅新育. 2022. 确保、扩大有效灌溉面积对粮食安全的重要意义. 人民论坛·学术前沿, (8): 87–95

彭书时, 岳超, 常锦峰. 2020. 陆地生物圈模型的发展与应用. 植物生态学报, 44: 436–448

孙爽, 郑东海, 刘绍民, 等. 2022. Noah-MP陆面模式在高寒草地生长季水热交换的模拟评估和改进. 中国科学: 地球科学, 52: 679–696

汪家伦, 张芳. 1990. 中国农田水利史. 北京: 农业出版社

魏明孔, 杜常顺. 2019. 青藏高原社会经济史. 北京: 社会科学文献出版社

亿里. 2000. 论唐宋时代的烧田(畲田)农业. 中国历史地理论丛, (2): 223–249

袁宇锋, 翟盘茂. 2022. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. 大气科学学报, 45: 161–166

张童瑶, 胡月明, 任向宁, 等. 2020. 弃耕行为对亚热带农田土壤有机质时空变化作用机理研究. 农业资源与环境学报, 37: 805–817

张学珍, 刘欣睿, 严建武, 等. 2022. 中亚费尔干纳盆地灌溉气候效应的数值模拟研究. 气象学报, 80: 819–834

周尚兵. 2006. 唐代南方畲田耕作技术的再考察. 农业考古, (1): 145–149, 155

Adalibieke W, Cui X Q, Cai H W, et al. 2023. Global crop-specific nitrogen fertilization dataset in 1961–2020. Sci Data, 10: 617

Adil M, Lv F L, Cao L, et al. 2024. Long-term effects of agronomic practices on winter wheat yield and NUE in dryland regions of USA and China: A long-term meta-analysis. Sci Rep, 14: 24777

Ahn M S, Kang I S. 2018. A practical approach to scale-adaptive deep convection in a GCM by controlling the cumulus base mass flux. NPJ Clim Atmos Sci, 1: 13

Allen M R, Frame D J, Huntingford C, et al. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. Nature, 458: 1163–1166

Bird M I, Brand M, Comley R, et al. 2024. Late Pleistocene emergence of an anthropogenic fire regime in Australia’s tropical savannahs. Nat Geosci, 17: 233–240

Blyth E M, Arora V K, Clark D B, et al. 2021. Advances in land surface modelling. Curr Clim Change Rep, 7: 45–71

Bondeau A, Smith P C, Zaehle S, et al. 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Glob

Change Biol, 13: 679–706
Bordoni S, Kang S M, Shaw T A, et al. 2025. The futures of climate modeling. NPJ Clim Atmos Sci, 8: 99
Bouwman L, Goldewijk K K, Van Der Hoek K W, et al. 2013. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. Proc Natl Acad Sci USA, 110: 20882–20887
Braconnot P, Zhu D, Marti O, et al. 2019. Strengths and challenges for transient Mid- to Late Holocene simulations with dynamical vegetation. Clim Past, 15: 997–1024
Brown K S, Marean C W, Herries A I R, et al. 2009. Fire as an engineering tool of early modern humans. Science, 325: 859–862
Cao P, Lu C, Yu Z. 2018. Historical nitrogen fertilizer use in agricultural ecosystems of the contiguous United States during 1850–2015: Application rate, timing, and fertilizer types. Earth Syst Sci Data, 10: 969–984
Chakraborty T C, Qian Y. 2024. Urbanization exacerbates continental- to regional-scale warming. One Earth, 7: 1387–1401
Chang J F, Viovy N, Vuichard N, et al. 2013. Incorporating grassland management in ORCHIDEE: Model description and evaluation at 11 eddy-covariance sites in Europe. Geosci Model Dev, 6: 2165–2181
Chini L, Hurtt G, Sahajpal R, et al. 2021. Land-use harmonization datasets for annual global carbon budgets. Earth Syst Sci Data, 13: 4175–4189
Conedera M, Tinner W, Neff C, et al. 2009. Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation. Quat Sci Rev, 28: 555–576
Cook B I, Shukla S P, Puma M J, et al. 2015. Irrigation as an historical climate forcing. Clim Dyn, 44: 1715–1730
Dahlström A. 2008. Grazing dynamics at different spatial and temporal scales: Examples from the Swedish historical record A.D. 1620–1850. Veget Hist Archaeobot, 17: 563–572
Davies B, Power M J, Braun D R, et al. 2022. Fire and human management of late Holocene ecosystems in southern Africa. Quat Sci Rev, 289: 107600
Davin E L, Rechid D, Breil M, et al. 2020. Biogeophysical impacts of forestation in Europe: First results from the LUCAS (Land Use and Climate Across Scales) regional climate model intercomparison. Earth Syst Dynam, 11: 183–200
de Noblet-Ducoudré N, Boisier J P, Pitman A, et al. 2012. Determining robust impacts of land-use-induced land cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. J Clim, 25: 3261–3281
de Oliveira E, Colaço M C, Fernandes P M, et al. 2023. Remains of traditional fire use in Portugal: A historical analysis. Trees Fors People, 14: 100458
Deng M S, Meng X H, Lu Y Q, et al. 2022. The response of vegetation to regional climate change on the Tibetan Plateau based on remote sensing products and the dynamic global vegetation model. Remote Sens, 14: 3337
Dinh T L A, Goll D, Ciais P, et al. 2024. Impacts of land-use change on biospheric carbon: An oriented benchmark using ORCHIDEE land surface model. Geosci Model Dev, 15:3519–3535
Dombrowski O, Brogi C, Hendricks Franssen H, et al. 2024. Land surface modeling as a tool to explore sustainable irrigation practices in Mediterranean fruit orchards. Water Resour Res, 60: e2023WR036139
Ellis E C, Kaplan J O, Fuller D Q, et al. 2013. Used planet: A global history. Proc Natl Acad Sci USA, 110: 7978–7985
Ellis E C, Gauthier N, Klein Goldewijk K, et al. 2021. People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. Proc Natl Acad Sci USA, 118: e2023483118
Floors R, Badger M, Troen I, et al. 2021. Satellite-based estimation of roughness lengths and displacement heights for wind resource modelling. Wind Energ Sci, 6: 1379–1400
Fuchs R, Herold M, Verburg P H, et al. 2015. Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900 and 2010. Glob Change Biol, 21: 299–313
Gaillard M J, Strandberg G, Miller P A. 2025. Land Use as a Climate Forcing in Europe Over the Last 7,000 Years: A Review. Oxford: Oxford University Press
Ge Q S, Hao Z X, Zheng J Y, et al. 2013. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere. Clim Past, 9: 1153–1160
Giorgi F. 2019. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? J Geophys Res-Atmos, 124: 5696–5723
Hajima T, Kawamiya M, Ito A, et al. 2025. Consistency of global carbon budget between concentration- and emission-driven historical experiments simulated by CMIP6 Earth system models and suggestions for improved simulation of CO_2 concentration. Biogeosciences, 22: 1447–1473
Hanan E J, Kennedy M C, Ren J N, et al. 2022. Missing climate feedbacks in fire models: limitations and uncertainties in fuel loadings and the role of decomposition in fine fuel accumulation. J Adv Model Earth Syst, 14: e2021MS002818
He L, Xi Q R, Sun M, et al. 2025. Radiative forcing and albedo dynamics in the Yellow River Basin: trends, variability, and land-cover effects. Remote Sens, 17: 3009
Heinke J, Rolinski S, Müller C. 2023. Modelling the role of livestock grazing in C and N cycling in grasslands with LPJmL5.0-grazing. Geosci Model Dev, 16: 2455–2475
Hill C, Madella M, Whitehouse N J, et al. 2024. Per capita land use through time and space: A new database for (pre)historic land-use reconstructions. Land, 13: 1144
Hoffmann R. 2014. An Environmental History of Medieval Europe. Cambridge: Cambridge University Press
Houghton R A, Lefkowitz D S, Skole D L. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 I. Progressive loss of forests. For Ecol Manage, 38: 143–172
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. Geosci Model Dev, 13: 5425–5464
IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
Jenkins S, Povey A, Gettelman A, et al. 2022. Is anthropogenic global warming accelerating? J Clim, 35: 7873–7890
Jones M W, Abatzoglou J T, Veraverbeke S, et al. 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. Rev Geophys, 60: e2020RG000726
Jones M W, Peters G P, Gasser T, et al. 2023. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. Sci Data, 10: 155
Jones M W, Veraverbeke S, Andela N, et al. 2024. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. Science, 386: eadl5889
Jordon M W, Smith P. 2022. Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe. Soil Tillage Res, 222: 105428
Kabora T K, Stump D, Thomas C D, et al. 2024. Assessing inconsistencies in historical land-use reconstructions for Africa at 1800. Reg Environ Change, 24: 55
Kaplan J O, Krumhardt K M, Zimmermann N. 2009. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. Quat Sci Rev, 28: 3016–3034

Kaplan J O, Krumhardt K M, Ellis E C, et al. 2011. Holocene carbon emissions as a result of anthropogenic land cover change. Holocene, 21: 775–791

Kelly L T, Giljohann K M, Duane A, et al. 2020. Fire and biodiversity in the Anthropocene. Science, 370: eabb0355

Klein Goldewijk K, Beusen A, Doelman J, et al. 2017. Anthropogenic land use estimates for the Holocene-HYDE 3.2 Earth Syst Sci Data, 9: 927–953

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. Geosci Model Dev, 9: 2973–2998

Lawrence D M, Fisher R A, Koven C D, et al. 2019. The community land model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. J Adv Model Earth Syst, 11: 4245–4287

Lejeune Q, Seneviratne S I, Davin E L. 2017. Historical land-cover change impacts on climate: Comparative assessment of LUCID and CMIP5 multimodel experiments. J Clim, 30: 1439–1459

Li F, Val Martin M, Andreae M O, et al. 2019. Historical (1700–2012) global multi-model estimates of the fire emissions from the Fire Modeling Intercomparison Project (FireMIP). Atmos Chem Phys, 19: 12545–12567

Li F, Song X, Harrison S P, et al. 2024. Evaluation of global fire simulations in CMIP6 Earth system models. Geosci Model Dev, 17: 8751–8771

Li R S, Pei H F, Zhang S W, et al. 2024. Influence of grazing management strategy and data time scales on estimates of sensible heat flux in grasslands. J Hydrol-Reg Stud, 55: 101949

Li S C, He F N, Zhang X Z. 2016. A spatially explicit reconstruction of cropland cover in China from 1661 to 1996. Reg Environ Change, 16: 417–428

Li Y K, Ye Y, Zhang C P, et al. 2019. A spatially explicit reconstruction of cropland based on expansion of polders in the Dongting Plain in China during 1750–1985. Reg Environ Change, 19: 2507–2519

Lombardozzi D L, Lu Y, Lawrence P J, et al. 2020. Simulating agriculture in the Community Land Model version 5. J Geophys Res-Biogeosci, 125: e2019JG005529

Lu C Q, Yu Z, Zhang J, et al. 2022. Century-long changes and drivers of soil nitrous oxide (N_2O) emissions across the contiguous United States. Glob Change Biol, 28: 2505–2524

Lutz F, Herzfeld T, Heinke J, et al. 2019. Simulating the effect of tillage practices with the global ecosystem model LPJmL (version 5.0-tillage). Geosci Model Dev, 12: 2419–2440

Marlon J R, Bartlein P J, Carcaillet C, et al. 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. Nat Geosci, 1: 697–702

Martín Belda D, Anthoni P, Wårlind D, et al. 2022. LPJ-GUESS/LSMv1.0: A next-generation land surface model with high ecological realism. Geosci Model Dev, 15: 6709–6745

Mathison C, Challinor A J, Deva C, et al. 2021. Implementation of sequential cropping into JULESvn5.2 land-surface model. Geosci Model Dev, 14: 437–471

McClain W E, Ruffner C M, Ebinger J E, et al. 2021. Patterns of anthropogenic fire within the midwestern tallgrass prairie 1673–1905: Evidence from written accounts. Nat Areas J, 41: 283–300

Meinshausen M, Nicholls Z R J, Lewis J, et al. 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. Geosci Model Dev, 13: 3571–3605

Namdar L, Gadot Y, Sapir-Hen L. 2024. Between cities and villages: The livestock economy in historical Palestine. Archaeol Anthropol Sci, 16: 105

Oberhagemann L, Billing M, von Bloh W, et al. 2025. Sources of uncertainty in the SPITFIRE global fire model: Development of LPJmL-SPITFIRE1.9 and directions for future improvements. Geosci Model Dev, 18: 2021–2050

Pan X D, Chen D L, Pan B X, et al. 2025. Evolution and prospects of Earth system models: Challenges and opportunities. Earth-Sci Rev, 260: 104986

Pascual D, Johansson M, Pongracz A, et al. 2024. Accounting for winter warming events in the ecosystem model LPJ-GUESS: Evaluation and outlook. J Geophys Res-Biogeosci, 129: e2023JG007464

Petersen K, Kraus D, Calanca P, et al. 2021. Dynamic simulation of management events for assessing impacts of climate change on pre-alpine grassland productivity. Eur J Agron, 128: 126306

Pfeiffer M, Spessa A, Kaplan J O. 2013. A model for global biomass burning in preindustrial time: LPJ-LMfire (v1.0). Geosci Model Dev, 6: 643–685

Pitman A J, de Noblet-Ducoudré N, Cruz F T, et al. 2009. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. Geophys Res Lett, 36: L14814

Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, et al. 2008. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. Glob Biogeochem Cycle, 22: GB3018

Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, et al. 2010. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. Geophys Res Lett, 37: L08702

Rabin S S, Melton J R, Lasslop G, et al. 2017. The Fire Modeling Intercomparison Project (FireMIP), phase 1: Experimental and analytical protocols with detailed model descriptions. Geosci Model Dev, 10: 1175–1197

Ramankutty N, Foley J A. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. Glob Biogeochem Cycle, 13: 997–1027

Rolinski S, Müller C, Heinke J, et al. 2018. Modeling vegetation and carbon dynamics of managed grasslands at the global scale with LPJmL 3.6 Geosci Model Dev, 11: 429–451

Ruddiman W F. 2003. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. Clim Change, 61: 261–293

Sato H, Itoh A, Kohyama T. 2007. SEIB-DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. Ecol Model, 200: 279–307

Shen N C, Wang W J, Tan J N, et al. 2024. Roles of historical land use/cover and nitrogen fertilizer application changes on ammonia emissions in farmland ecosystem from 1990 to 2020 in China. Sci Total Environ, 906: 167565

Siebert S, Kummu M, Porkka M, et al. 2015. A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. Hydrol Earth Syst Sci, 19: 1521–1545

Simpson I R, Shaw T A, Ceppi P, et al. 2025. Confronting Earth system model trends with observations. Sci Adv, 11: eadt8035

Sluyter A. 2021. Reconstruction of anthropogenic land-cover change for Middle America, 1500 CE. Adv Environ Eng Res, 02: 1–29

Stephens L, Fuller D, Boivin N, et al. 2019. Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. Science, 365: 897–902

Sweeney L, Harrison S P, Linden M V. 2022. Assessing anthropogenic influence on fire history during the Holocene in the Iberian Peninsula. Quat Sci Rev, 287: 107562

Thiery W, Davin E L, Lawrence D M, et al. 2017. Present-day irrigation mitigates heat extremes. J Geophys Res-Atmos, 122: 1403–1422

Thiery W, Visser A J, Fischer E M, et al. 2020. Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation. Nat Commun, 11: 290

Vahmani P, Hogue T S. 2014. High-resolution land surface modeling utilizing remote sensing parameters and the Noah UCM: A case study in the Los Angeles Basin. Hydrol Earth Syst Sci, 18: 4791–4806

van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, et al. 2017. Global fire

emissions estimates during 1997-2016. Earth Syst Sci Data, 9: 697–720
van Marle M J E, Kloster S, Magi B I, et al. 2017. Historic global biomass burning emissions for CMIP6 (BB4CMIP) based on merging satellite observations with proxies and fire models (1750–2015). Geosci Model Dev, 10: 3329–3357
Wang D J, Peng Q Y, Li X Q, et al. 2024. A long-term high-resolution dataset of grasslands grazing intensity in China. Sci Data, 11: 1194
Wang F H, Ye Y, Zhang C P, et al. 2023. Reconstruction of cropland cover using historical literature in Northern China, Sui Dynasty, AD 609. Holocene, 33: 310–320
Wang F H, Ye Y, Fang X Q. 2024. Reconstruction of cropland cover in topographically complex areas: The case of Sichuan Province, China, from 1671 to 2019. Glob Planet Change, 236: 104417
Wang F, Guo L F, Lin X F, et al. 2024a. Integration of prognostic sowing and harvesting schemes to enhance crop dynamic growth simulation in Noah-MP-Crop model. Ecol Inf, 82: 102785
Wang F, Fang J C, Yao L, et al. 2024b. Applications of land surface model to economic and environmental-friendly optimization of nitrogen fertilization and irrigation. Heliyon, 10: e27549
Welton L, Hammer E, Chelazzi F, et al. 2025. A multi-proxy reconstruction of anthropogenic land use in southwest Asia at 6 kya: Combining archaeological, ethnographic and environmental datasets. Quat Sci Rev, 349: 109142
Wu C, Sitch S, Huntingford C, et al. 2022. Reduced global fire activity due to human demography slows global warming by enhanced land carbon uptake. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2101186119
Wu Z L, Hu Z Q, Chen Q, et al. 2025. Historically, how much cropland was on the Qinghai-Tibetan Plateau? Case study of the Tubo Kingdom and the Yuan Dynasty Reg Environ Change, 25: 64
Yang F, Dong G P, Wu P F, et al. 2024. Stylized facts of past 1000-year of China's cropland changes. Land Use Policy, 144: 107258
Yang X H, Jin X B, Guo B B, et al. 2015. Research on reconstructing spatial distribution of historical cropland over 300years in traditional cultivated regions of China. Glob Planet Change, 128: 90–102
Yang X H, Jin X B, Du X D, et al. 2016. Multi-agent model-based historical cropland spatial pattern reconstruction for 1661–1952, Shandong Province, China. Glob Planet Change, 143: 175–188
Yao Y, Vanderkelen I, Lombardozzi D, et al. 2022. Implementation and evaluation of irrigation techniques in the Community Land Model. J Adv Model Earth Syst, 14: e2022MS003074
Ye Y, Liu Y T, Lou L, et al. 2025. The spatial reconstruction of 5′×5′ cultivated land cover in the three provinces of Northeast China in the Qing Dynasty based on historical settlements and reclamation sites. Environ Res Commun, 7: 105029
Yu Z, Liu J, Kattel G. 2022. Historical nitrogen fertilizer use in China from 1952 to 2018. Earth Syst Sci Data, 14: 5179–5194
Zaehle S, Ciais P, Friend A D, et al. 2011. Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. Nat Geosci, 4: 601–605
Zhang D Y, Lu Y J, Fang X Q, et al. 2023. Identifying a scenario for preindustrial cropland cover using cultivation data: A case study of France, Germany and Italy. Anthropocene, 43: 100388
Zhang X Z, Ding N N, Han S J, et al. 2020. Irrigation-induced potential evapotranspiration decrease in the Heihe River Basin, Northwest China, as simulated by the WRF model. J Geophys Res-Atmos, 125: e2019JD031058
Zhou S, Yu B F, Zhang Y. 2023. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change. Sci Adv, 9: eabo1638

（责任编委：张仲石）