doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.003

面向农业气象的区域地球系统模式技术路径与应用

蔡锡填[1]　吴晓露[1]　李明星[2]　郑　辉[2]　郑子彦[2]　李　凯[2]　高艳红[3]　丹　利[2]

(1. 中山大学土木工程学院, 广州 519082; 2. 中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029;
3. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

摘要: 在全球气候变化背景下,农业干旱、高温热害、低温冻害等极端气候事件频发,对我国农业生产稳定性与粮食安全保障构成严峻威胁。传统农业气象模型多采用单点、离线驱动的运行方式,难以表征农田下垫面与大气之间的动态双向反馈。相较于侧重大尺度气候长期演变的全球地球系统模式,区域地球系统模式凭借更高的空间分辨率和更完善的复杂地形处理能力,可更细致地描述局地中小尺度天气过程及农田下垫面对区域气象条件的影响,并为区域农业气象影响评估和业务应用提供模拟基础。现有研究表明,动态作物过程与陆-气系统在线耦合模拟能够加强农田下垫面反馈过程的表达,但不同模式和耦合方式的适用性取决于研究目标、时空尺度及观测约束;氮循环已由陆面模式内部生产力约束拓展至陆-气-化学多圈层耦合,磷循环区域在线耦合仍处于早期发展阶段。当前区域地球系统模式仍面临作物与管理参数区域化不足、极端损伤与恢复过程表征简化、多过程耦合误差传播及观测约束不足等问题。因此,本文围绕区域气候模式、陆面模式、作物模型与区域地球系统模式之间的功能联系,系统梳理农业过程进入区域地球系统模式的主要技术路径,重点总结作物生长-陆面水热-边界层反馈,以及播种、灌溉、施肥、水资源和氮-磷循环等关键过程耦合表达,并进一步归纳在极端与复合农业气象事件、典型农业区模拟以及农业气象预测与决策支持中应用进展。在此基础上,提出“最小充分反馈链”模式选型原则,并从高分辨率模拟、多源状态-参数同化、模块化耦合、物理信息人工智能及区域地球系统模式与农业气象业务协同等方面讨论未来研发方向,为区域地球系统模式支撑农业气象灾害评估与决策服务提供参考。

关键词: 区域地球系统模式; 农业气象; 区域气候模式; 农业过程耦合; 作物模型

中图分类号: S165; P456　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0030-16　　**OSID**:

Technical Pathways and Applications of Regional Earth System Models for Agricultural Meteorology

Cai Xitian[1]　Wu Xiaolu[1]　Li Mingxing[2]　Zheng Hui[2]　Zheng Ziyan[2]　Li Kai[2]　Gao Yanhong[3]　Dan Li[2]

(1. *School of Civil Engineering*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 519082, *China*
2. *Regional Center for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*
3. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences*, *Fudan University*, *Shanghai* 200438, *China*)

Abstract: Under global climate change, frequent agricultural droughts, heat stress, cold extremes, and other climate-related hazards pose increasing challenges to agricultural production and food security. Traditional agricultural meteorological models generally rely on offline simulations driven by prescribed meteorological forcing, making it difficult to represent dynamic feedbacks between cropland surfaces and the atmosphere. Compared with global Earth system models that focused on long-term, large-scale climate evolution, regional Earth system models (RESMs) with relatively high spatial resolution and improved representation of complex terrain can provide more detailed simulations of local- to mesoscale weather processes and the effects of cropland surface conditions on regional meteorology, thereby providing a modeling basis for regional agrometeorological impact assessment and operational applications. Recent applications in simulating extreme and compound agricultural meteorological events, representative agricultural regions, and agricultural meteorological prediction and decision-support systems were further

收稿日期: 2026-08-15　修回日期: 2026-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0805501)和国家自然科学基金项目(42375165)

作者简介: 蔡锡填(1982—),男,副教授,博士,主要从事区域地球系统模式研究,E-mail: caixitian@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 丹利(1973—),男,研究员,博士,主要从事陆气相互作用与区域地球系统模式研究,E-mail: danli@tea.ac.cn

discussed. Existing studies indicated that dynamic crop parameterizations and their online coupling with land – atmosphere systems can improve the representation of agricultural feedback processes, while model applicability depended on research objectives, spatial and temporal scales, and observational constraints. Nitrogen cycling had gradually expanded from internal land-surface productivity regulation to coupled land – atmosphere – chemical processes, whereas regional online coupling of phosphorus cycling remained under development. Current challenges included insufficient regionalization of crop and management parameters, simplified representations of extreme-event impacts and recovery processes, uncertainties in multi-process interactions, and limited observational constraints. This review summarized the development of RESMs for agricultural meteorological applications, focusing on the relationships among regional climate models, land surface models, crop models, and regional Earth system models. The major pathways for incorporating agricultural processes into regional models were systematically reviewed, including crop growth processes, land surface water – energy exchanges, agricultural management practices, and biogeochemical cycles. Future developments should focus on high-resolution simulations, multi-source state and parameter assimilation, modular coupling approaches, physics-informed artificial intelligence, and enhanced integration of regional models with agricultural meteorological services. This review can provide a reference for advancing regional Earth system models in agricultural meteorological risk assessment and decision support.

Key words: regional Earth system model; agricultural meteorology; regional climate model; agricultural process coupling; crop model

0　引言

气候变化通过气象要素平均态改变、年际变率加剧和极端事件变化，持续重塑农业生产的热量、水分与灾害约束[1-4]。全球尺度统计分析表明，生长季平均气候条件与极端事件共同可解释不同主要作物 20% ~49% 的产量异常方差，其中气候极端对已解释方差的贡献为 18% ~43%[5]；高温与水分异常复合发生时，还可通过作物生理响应及陆-气耦合形成复合影响，影响幅度与作物物候进程、根区土壤含水率及前期生长状态密切相关[6-9]。农业气象模型是解析气象-作物-环境互作机制、量化气候影响的核心工具[10]，以农业生产系统模拟模型（Agricultural Production Systems sIMulator，APSIM）和农业技术转移决策支持系统（Decision Support System for Agrotechnology Transfer，DSSAT）为代表的传统模型，在作物生理发育刻画、单点尺度气象响应模拟方面已形成成熟范式[11]，但模拟能力仍受限于下垫面反馈机制的缺失。此类模型普遍采用气象数据单向驱动的离线（offline，即不与大气模式耦合）运行模式，默认农田下垫面变化不会对大气过程产生反馈。事实上，农田植被动态、土壤含水率消耗及灌溉施肥等下垫面过程，可通过改变地表反照率、地表粗糙度及感热-潜热分配比例，影响近地面农业微气候与边界层演变；尤其在极端事件发生期间，陆-气双向反馈可参与调节灾害的演化（如干旱-高温协同放大过程），因而仅以气象场单向驱动离线模拟难以完整刻画农业灾害过程及农田-大气交互作用。

区域气候模式通过动力降尺度提升复杂地形区和中尺度过程的刻画能力[12-16]，但传统配置多采用静态植被参数表征农田下垫面。区域地球系统模式则在区域大气框架中耦合陆面、水文、生态、生物地球化学及人类活动过程，通过状态变量和守恒通量在线交换，实现跨圈层相互反馈[14-16]。相较于全球地球系统模式，区域地球系统模式具有较高的空间分辨率，更适于研究复杂地形、中小尺度天气系统及农田下垫面异质性对区域农业气象条件的影响，并可为全球和区域气候信息向农业影响模拟与应用转化提供区域尺度支撑。农业系统受人类活动影响强烈，对局地水热通量、物候动态及极端事件响应较为敏感，因而成为区域地球系统模式重要应用潜力、农业气象需求较为迫切的应用领域之一。我国人均耕地资源紧缺与极端气候频发叠加，对区域尺度精细化农业气象模拟提出了更为严峻的挑战，亟需发展适配东亚季风区气候-种植制度的自主模式技术。

近年来，农业过程参数化已由静态植被描述逐步拓展至动态物候、根系吸水、交互式灌溉、收获及复种制度等过程[10-11]，但针对不同模式层级的适用边界、在线耦合的核心触发条件，及其对极端事件预测与影响评估的增益效果，仍缺乏系统梳理与研发指引，特别是针对“何时需要复杂的多圈层耦合”这一核心选型问题，尚缺少明确的决策依据。本文聚焦农业气象业务与研发双重需求，系统梳理代表性区域模式的技术谱系，对比作物生理、农业管理、水资源及生物地球化学过程的耦合路径，评述现有模式在极端事件模拟、典型农区应用的性能短板，重点探讨高分辨率模拟、多源数据同化、物理信息人工智

能及我国自主研发的区域地球系统模式(如RIEMS)业务协同的研发方向,提出“最小充分反馈链”模式选型原则,以期提升区域地球系统模式对农业气象业务的支撑能力,为相关模式研发与应用提供参考。

1 区域地球系统模式

1.1 区域地球系统模式概念

区域气候模式、陆面模式与区域地球系统模式分属不同的技术研发层级,功能定位与耦合能力存在本质差异。天气研究与预报模式(Weather Research and Forecasting model,WRF)、耦合天气研究与预报模式(Climate - Weather Research and Forecasting model,CWRF)、第五代区域气候模式(The Fifth Generation Regional Climate Modeling System,RegCM5)、区域模式(Regional climate model 2020,REMO2020)及非静力气候区域模式(Climate limited-area mode of ICON,ICON - CLM)等区域大气模式以非静力动力框架与物理过程参数化为核心,主要承担有限区域天气-气候积分与动力降尺度任务。其中 REMO2020 农业扩展模块 iMOVE 基于生物圈-大气耦合耶拿方案(Jena Scheme for Biosphere-Atmosphere Coupling in Hamburg,JSBACH)框架开发,ICON - CLM 采用多层陆地环境模式(Terrestrial Environment Model-Multi-Layer,TERRA_ML)陆面方案,二者均为陆面过程的区域化定制研发成果。多参数化选项陆面模式(Noah land surface model with multi-parameterization options,Noah - MP)、社区陆地模式(Community Land Model,CLM)、能源大尺度地球系统模式陆面模式(Energy Exascale E3SM Land Model,ELM)、英国联合陆面环境模拟系统(Joint UK Land Environment Simulator,JULES)以及土壤-生物圈-大气相互作用模式(Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere,ISBA)等陆面模式则聚焦地表水、能量、碳及植被状态的动态模拟,为大气模式提供下边界通量,是陆-气耦合的物理基础。区域气候模式和陆面模式在线耦合后可形成区域陆-气系统,但仅当作物状态、农业管理措施或其他地球系统分量随环境动态演变并反向调控区域气象过程时,方可支撑农田-大气双向反馈的机制研究。

从农业气象需求出发,可将相关模式划分为 5 层级(表 1)。①区域气候模式,适于解析区域天气气候及极端事件,但农田过程多采用简化参数化方案。②离线气候-作物模型链,可精细化模拟物候、产量、品种筛选及播期优化,但无大气反馈能力。③集成作物过程的陆面模式(如 Noah - MP - Crop、CLM5 - Crop 等),作物状态直接参与水热与碳通量计算,支持离线运行。④在线大气-陆面-作物系统,可显式模拟农田与边界层之间的双向反馈。⑤多分量区域地球系统模式(如我国自主研发的 RIEMS、RegCM - ES 等),在上述基础上进一步耦合海洋、水文、生物地球化学或人类活动过程。模式层级越高并不意味着对所有农业问题更优,基本原则是匹配目标问题所需的“最小充分反馈链”,确保具备对应的观测约束能力。

表 1 面向农业气象的模式层级及其功能边界

Tab. 1 Model hierarchy and functional boundaries for agricultural meteorology

模式	核心组成	代表性模型	信息传递	主要农业用途	认识边界
区域气候模式	区域大气动力、物理参数化方案和简化陆面	WRF	大气-陆面在线双向交换,作物多为静态指定状态	气象要素降尺度、极端过程解析、气候资源评估	不能由静态农田推断作物反馈
离线气候-作物模型链	气象驱动、专业作物模型	APSIM DSSAT	气象单向驱动作物,无反馈回路	产量预估、物候模拟、品种筛选、播期优化、情景分析	不能闭合农田-大气反馈
集成作物过程的陆面模式	陆面水热模块、碳循环和动态作物参数化	Noah - MP - Crop CLM5 - Crop	作物状态参与地表通量计算,可离线运行	土壤-作物状态模拟、蒸散估算、灌溉需求分析	未在线耦合时不改变区域天气
在线大气-陆面-作物系统	区域大气 + 动态作物陆面分量	WRF - Noah - MP - Crop	作物生长和农业管理措施双向反馈大气过程	高温热害、农业干旱、灌溉及复种制度的局地气候效应评估	通常缺少完整水文或养分约束
多分量区域地球系统模式	大气、陆面、水文/海洋、生态、生物地球化学及人类活动	RIEMS RegCM - ES	耦合器或统一框架下多圈层双向变量交换	粮食-水-环境协同评估、跨圈层归因分析	复杂度高,分量误差辨识困难

在线耦合并非所有农业影响研究的必要配置。针对品种筛选、播期优化及长期产量情景模拟,经偏差订正校准的离线气候-作物模型链更便于开展多模式、多管理情景的对比研究;仅当研究灌溉降温、农田覆盖变化、边界层演变及局地降雨反馈等涉及下垫面-大气双向作用的问题时,才需采用在线耦合

方案。需注意的是，若气象强迫、农田空间分布或作物参数存在系统性偏差，在线耦合易引发跨分量误差循环传播，因此需结合预设大气强迫试验、离线陆面过程模拟与全耦合对照试验，系统识别反馈增益与偏差来源。

有限区域模式受侧边界条件强约束。农业扰动通常难以改变由侧边界强迫控制的大尺度环流背景，但可通过改变地表水热通量、植被状态和粗糙度，影响区域内部近地面温湿度、边界层结构、低层辐合及局地降雨，其反馈幅度具有尺度、季节和背景环流依赖性[17-24]。因此，区域地球系统模拟需严格区分外部边界强迫与区域内部反馈，通过敏感性对照试验（如农田-自然植被互换试验）、过程收支分析与因果诊断，明确农业扰动的净效应。若仅以区域平均气温或产量作为单一评价指标，易掩盖作物状态、地表通量与大气响应之间的参数等效性（即不同误差源相互抵消仍可得到相近的结果），导致反馈机制误判。

1.2　区域地球系统模式体系

现代区域地球系统模式研发通常以成熟的区域大气或气候模式为核心载体。WRF 具备非静力动力框架与丰富的物理过程参数化方案。CWRF 则在此基础上针对长期区域气候积分、侧边界处理及关键物理过程进行了系统性扩展与改进，更适用于长期区域气候模拟[25-26]。RegCM 历经多代发展，RegCM5 主要升级之一是引入非静力动力框架，支持积云参数化（分辨率≥10 km，属于常规分辨率）与对流可分辨（分辨率≤4 km，属于高分辨率，亦称对流允许）2 类配置，体现了区域气候模式向千米尺度和多用途平台演进的趋势[27]。REMO2020 则通过重构代码和模块接口，提高模式可维护性及新分量接入能力，保留的交互式植被（iMOVE）模块基于 JSBACH 框架开发，为农业陆面过程模拟提供了接口基础[28]。需指出的是，上述系统虽具备较强的可扩展性，但定位仍是区域大气模拟工具，不应直接等同于完整的多分量区域地球系统模式。

较完整的多分量区域地球系统模式通常强调多圈层在线耦合。区域耦合地球系统模式（Model of the Regional Coupled Earth system，MORCE）将区域大气、海洋、陆面及生物地球化学过程纳入可迁移耦合平台，较早展示了面向脆弱区域的多分量耦合思路[29]。RegCM-ES 在 RegCM 基础上集成区域海洋、陆面、水文和海洋生物地球化学分量，并在地中海等海气相互作用活跃的区域进行系统性评估[30-31]。基于小尺度模拟联盟模式（Consortium for Small-scale Modeling，COSMO）的气候区域模式（Climate Limited-area Modelling，COSMO-CLM）体系通过海洋-大气-海冰-土壤模型耦合器（Ocean，Atmosphere，Sea Ice，Soil Model Coupling Toolkit，OASIS3-MCT），实现了区域大气、海洋、陆面与全球地球系统分量间的双向高效通信，凸显了耦合器在网格映射、并行计算及分量独立开发中的重要作用[32]。全球海洋-大气-海冰-水文耦合地球系统模式（Geesthacht Coupled COAstal model System-Atmasphere and Land，Hydrological discharge）以 ICON-CLM 替换原有大气分量，并与欧洲海洋模拟核心模式（Nucleus for European Modelling of the Ocean，NEMO）及水文径流模式（Hydrological Discharge，HD）耦合，反映了区域模式从固定组合向可替换组件发展的新趋势[33]。

生物地球化学区域地球系统模式（Biosphere-relevat Earth System Model，BioEarth）代表了以资源管理问题组织模式系统的另一条研发路线，将区域气候、陆地水文、作物生产、营养物输移、空气质量和经济决策模型进行模块化集成，使区域地球系统模拟直接面向农业和自然资源管理[34]。但是，模式适用性不能仅由耦合分量数量判断，更取决于跨分量交换是否服务于清晰的科学或决策问题。例如，对于内陆农业区，海洋分量一般并非必要；但若研究灌溉水源、氮素损失或农业空气质量，则水文、生物地球化学或大气化学分量不可或缺。

我国区域地球系统模式发展具有深厚的技术积累。区域集成环境模拟系统（Regional Integrated Environmental Modeling System，RIEMS）早期版本已用于中国气温和降雨区域模拟评价[35]，而通用陆面模式（The Common Land Model，CoLM）与第三代区域气候模式（Regional Climate Model version 3，RegCM3）的耦合研究则体现了国内对陆面过程反馈机制的早期探索[36]。最新 RIEMS 研发已由区域气候-环境集成系统拓展为涵盖区域大气、海洋、陆面生态及人类活动的综合模拟框架，陆面生物地球化学分量引入 Noah 多参数化选项碳氮循环陆面模式（Noah land surface model with multi-parameterization options coupled with carbon and nitrogen cycles，Noah-MP-CN）和大气-植被相互作用碳氮循环模式（Atmosphere-vegetation interaction model coupled with carbon and nitrogen cycles，AVIM-CN）等碳氮循环方案，并将施肥和氮沉降等人为过程作为发展重点。这一演进使 RIEMS 具备连接区域气候、农业生产和环境效应的应用潜力，但在作物品种适应性、复种制度表征、灌溉规则参数化、磷循环限制及灾害胁迫响应等方面区域化精细模拟能力仍有待加强[16]。上

述代表性区域模式体系的组成特征、农业气象价值及主要局限归纳见表 2。

表 2 代表性区域模式体系及其农业气象相关性

Tab. 2 Representative regional modeling systems and their relevance to agricultural meteorology

模式体系	模式属性与大气核心	主要耦合分量或扩展	农业气象价值	主要局限
WRF/CWRF	非静力区域大气/气候模式	多种陆面、水文和化学分量可选	天气过程、动力降尺度和在线作物耦合基础	农业过程取决于外接陆面分量
RegCM5	社区区域气候/地球系统平台	非静力核心、陆面和可扩展分量	支持从积云参数化到对流允许(千米尺度)的无缝应用	农业专用过程仍有限
REMO2020	模块化区域气候模式	湖泊、积雪、气溶胶和 iMOVE 等	长期气候服务和灌溉-植被扩展	作物生理过程相对简化
MORCE	多分量区域耦合平台	大气、海洋、陆面及生物地球化学	跨圈层过程及区域脆弱性研究	农业并非核心应用
RegCM-ES	区域地球系统模式	大气、海洋、陆面、水文、海洋生物地球化学	海气耦合及区域环境过程	农田管理表达不足
COSMO-CLM/GCOAST	标准耦合器驱动的模块化系统	区域大气、海洋、径流及外部陆面分量	守恒交换、组件替换和区域水循环闭合	农业模块需进一步接入
BioEarth	资源管理导向的区域系统	气候、水文、农业、营养物、空气质量和经济	农业-水-环境-决策综合评价	区域移植和数据需求较高
RIEMS	我国区域地球系统集成模式	区域大气、海洋、Noah-MP-CN/AVIM-CN、陆面生态、人类活动及同化	东亚区域过程、碳氮循环和农业环境扩展	作物和管理精细化仍待加强

1.3 农业气象区域地球系统模式技术路径

农业过程嵌入区域地球系统模式的研发目前已形成 3 类差异化技术路径,主要差异在于作物/养分过程与陆面、大气模式的耦合深度及适配场景。

(1)综合陆面模式原生作物功能型(CFT)研发路径。在植物功能型(Plant functional type,PFT)分类框架下为作物增设独立功能亚型(Crop functional type, CFT),通过交互式作物管理参数化实现播种、收获、灌溉与器官碳分配过程全链条表征,是陆面模式原生支持农业模拟的标准化路径,代表模式为 CLM/ELM、JULES-crop。其中,社区地球系统模式(Community Earth System Model,CESM)中 CLM 通过交互式作物管理模块动态刻画播种-收获周期与农田通量交换,JULES-crop 在 JULES 中建立标准化作物参数化方案,第五代社区陆面模式(Community Land Model version 5,CLM5)拓展了作物类型覆盖、灌溉规则与生物地球化学循环过程[37-40]。该技术路径过程完整性高,适配长期气候模拟与碳-氮循环研究,但参数维度高、区域校准难度大、计算成本高,且作物管理规则灵活性弱于专用农业模块。

(2)在天气-气候陆面模式中嵌入相对紧凑的动态作物模块或养分循环模块。Noah-MP 提供可组合的土壤、植被、积雪和通量参数化[41],Noah-MP-Crop 进一步拓展了玉米和大豆物候、生物量及产量过程[42]。基于东北地区跨尺度验证表明,动态作物模块可明显改善叶面积指数、生物量及陆-气通量的季节模拟偏差,但区域结果仍受播期、作物空间分布、土壤初始场及大气强迫偏差的共同影响,需警惕参数等效性问题[43-44]。因此,Noah-MP-Crop 应定位为区域大气-陆面-作物系统中作物分量,不可直接等同于完整的区域地球系统模式。

与 Noah-MP 作物模块研发并行,Cai 等[45]将植物氮固定与吸收模型(Fixation and Uptake of Nitrogen,FUN)植物氮获取与 SWAT 土壤氮循环过程耦合至 Noah-MP,构建 Noah-MP-CN,实现了氮有效性对陆面水碳过程的调控。氮限制通过增加养分获取的碳成本、降低净初级生产力(Net primary productivity,NPP),进而改变植被碳分配格局,最终调控陆-气间水、碳通量交换。该模式可完整刻画施肥输入、有机质矿化、硝化、反硝化、植物吸收及氮淋溶的全链条氮循环过程[45]。中国区域模拟表明,氮限制可改变叶面积指数、总初级生产力及蒸散等水碳通量[46]。进一步与 WRF 在线耦合后,陆地氮动态引起的植被状态和能量分配变化能够改进中尺度近地面气象要素的模拟[47]。Noah-MP-CN 与 WRF-Chem 耦合又将土壤氨挥发、区域化学输送和氮沉降纳入在线闭环[48]。上述模式进展表明,氮循环已从陆面内部生产力限制因子,拓展为陆-气-化学多圈层交互的重要耦合环节,但现阶段 Noah-MP-Crop 与 Noah-MP-CN 仍为 2 条相对独立的并行研发路线,作物物候动态、养分限制与农业管理措施的一体化耦合仍有待深化。

(3)将专业作物模型或高级陆面模式通过耦合

接口接入区域大气模式。WRF－Noah－MP 通用作物模拟器（Genotype-by-Environment interaction on CROp growth Simulator）利用 GECROS 细化作物生理和碳-氮过程表征，并用于评估天气驱动作物生长对陆-气反馈的影响[17]；WRF－CLM4crop 借助 CLM 作物模块研究区域农业气候反馈[18]；ISBA/外部地表过程平台（Surface Externalisée，SURFEX）和 REMO2020－交互式植被模型（interactive MOdel for VEgetation，iMOVE）分别从作物物候-灌溉参数化和交互式植被方向扩展农业地表过程的描述能力[19,49]。WRF－ELM v1.0 通过轻量级陆-气耦合基础设施（Lightweight Infrastructure for Land Atmosphere Coupling，LILAC）/地球系统模式框架（Earth System Modeling Framework，ESMF）框架实现 WRF 与 ELM 模块化在线耦合，在保持陆地模型代码相对独立的同时，引入植物水力学、土地管理和更完整的陆地过程，是模块化陆-气耦合的代表性进展[50]。面向华北平原典型一年两熟种植制度研发的 WRF4.5 双季作物-交互式灌溉方案，则将冬小麦-夏玉米轮作、动态地表覆盖及土壤含水率触发的灌溉规则纳入在线耦合框架[20]。

3 类技术路径不存在普适的最优复杂度配置，模式选型需遵循“最小充分反馈链”原则。针对短期高温热害与边界层反馈研究，需重点保障物候动态、冠层能量平衡、根区土壤含水率及灌溉时序的模拟精度；开展长期气候适应性评估、农业非点源污染溯源及温室气体收支核算，则需完整刻画碳-氮-磷循环、流域尺度水文连通及资源约束过程。在观测约束不足时应避免盲目增加参数维度，也要防止因过度追求计算效率而遗漏调控农业风险的核心过程。各类农业气象模式耦合路线的代表模式、过程优势、适用问题和主要不足见表 3。区域大气核心、陆面与作物分量、在线耦合系统及多分量扩展之间的层级关系如图 1 所示。

表 3　农业区域气象模式耦合的主要技术路径

Tab.3　Major technical pathways for coupling agricultural processes into regional atmospheric models

技术路径	代表模式	主要优势	适用问题	主要不足
集成作物过程的陆面模式	CLM/ELM、JULES－crop	碳分配、生物地球化学和土地管理较完整	长期气候、碳氮与多目标评价	参数多，区域标定和计算代价高
天气陆面模式嵌入作物	Noah－MP－Crop	结构紧凑、便于 WRF 在线运行	区域天气反馈、灌溉和作物状态	作物类型、养分和损伤过程有限
陆面模式生物地球化学扩展	Noah－MP－CN、ORCHIDEE－CNP、JULES－CNP、ELM－FUN	氮-磷供需、土壤转化、植物获取碳-养分反馈	长期生产力、养分限制、沉降/排放和农业环境效应	作物管理一体化及区域氮-磷观测约束不足
专业作物模型在线嵌入	WRF－Noah－MP－GECROS 等	作物生理和胁迫机制较细	生育期、品种和胁迫响应	接口复杂，时间尺度匹配困难
管理过程扩展	ISBA/SURFEX、REMO2020－iMOVE	物候、灌溉和植被反馈表达清晰	欧洲农业用水与气候反馈	作物器官和产量过程较简化
模块化高级陆地耦合	WRF－ELM	保持分量独立并便于继承新过程	高分辨率陆-气反馈和复杂土地利用	数据与算力需求高
农业气象业务模式	CAMM 等	区域作物和灾害业务针对性强	监测、产量预报和灾害评估	通常缺少对区域大气的在线反馈

2　农业气象关键过程耦合表达

2.1　作物生长-陆面水热-边界层反馈

农业过程影响区域天气气候的主要路径是地表能量与水分分配的动态调整。物候进程决定冠层建立、衰老和收获时序；叶面积、冠层高度、覆盖度与地表粗糙度共同调控辐射截获效率和空气动力阻力；根系分布、土壤水势与气孔导度则直接决定蒸腾速率与冠层温度响应。上述地表属性的动态变化通过调控感热、潜热和地表温度，进而调节边界层高度、近地面温湿度、低层辐合强度及对流触发概率。动态作物参数化主要作用并非局限于改进产量模拟，更在于实现大气下边界条件随天气过程、土壤状态及农业活动的连续动态更新。

当前作物模块对物候进程和胁迫响应的表征能力存在较大差异。Noah－MP－Crop 采用相对紧凑的发育阶段和碳分配参数化方案，适配区域尺度在线耦合的计算需求；针对春小麦、冬小麦的模块扩展进一步引入了动态播收期、春化作用及温度胁迫响应机制[51-52]。动态根深参数化方案通过刻画根系吸水能力随生育阶段动态变化，有效缓解了固定根系分布假设对土壤水热过程模拟的偏差[53]。CLM/ELM 与 GECROS 等复杂模型虽可更精细地刻画光合作用、器官碳分配及生物地球化学循环过程，但面临参数可辨识性弱、区域校准难度大的问题。区域尺度模拟需优先验证物候进程、叶面积指数、根区土

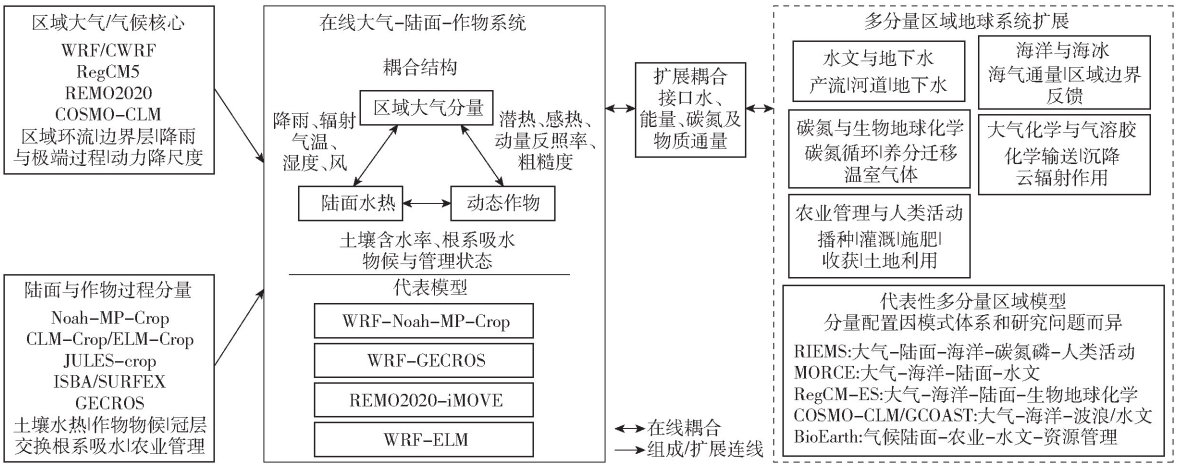


图 1 面向农业气象的区域地球系统模式谱系与耦合层次

Fig. 1 Evolution and coupling hierarchy of regional Earth system models for agricultural meteorology

壤含水率、冠层温度及湍流通量之间的过程一致性，不能仅以最终产量作为单一指标评判模型性能。

根区土壤含水率是衔接农业干旱、高温胁迫及陆-气反馈过程的重要状态变量。土壤含水率亏缺会诱发气孔部分关闭、蒸腾冷却效应减弱，使冠层温度相对于 2 m 气温升高；若仅以近地面最高气温作为高温胁迫判定指标，易低估水分受限条件下作物生殖器官的实际热暴露水平。与之相比，灌溉补水不仅可通过即时蒸发冷却降低冠层温度，还可通过促进叶面积扩展与根系生长，延长蒸腾作用的反馈时长。因此，区域模式模拟需同步核算气象暴露强度、作物敏感生育期及生理状态，同时留存前期土壤含水率异常对后续生育阶段的记忆效应。

水平分辨率的提升并不会自动转化为农业过程模拟可信度的提升。千米尺度模拟能够更精细地解析深对流过程以及地形和下垫面异质性，但同时对地表通量估算、土壤初始场精度及农田斑块空间表征提出了更高的要求。对流可分辨区域气候模拟试验表明，1 ~ 4 km 网格能够更精细地表征对流和强降雨过程，但计算成本也随之增加，从而限制长时间积分和大集合模拟规模[27]。农业气象应用需重点检验降雨、辐射及风场的模拟改进是否能有效传递到土壤含水率、蒸散、作物生育进程及灾害指标的模拟中，不能将气象变量的局地优化直接等同于农业风险模拟能力的提升。

2.2 农业管理、水资源与生物地球化学过程

播种、收获、复种、灌溉和施肥是具有时空异质性的动态边界条件。播收期控制裸地与冠层之间的季节转换，复种制度改变地表覆盖年内连续性，品种熟性影响生育期长度及对热量资源的利用。基于 WRF4.5 研发的华北平原双季作物-交互式灌溉方案表明，只有显式表示冬小麦-夏玉米轮作衔接关系及其空间变化，才能合理再现叶面积指数、蒸散发和灌溉需求的双峰结构[20]。若采用固定种植时间或单一品种参数，在气候异常年份易诱发物候错位，进而将误差传递至陆面通量模拟与边界层过程参数化环节。

灌溉过程参数化需要明确触发阈值、补水目标、施用时段、灌溉效率和可用水源。全球及区域尺度研究普遍表明，灌溉常通过增加潜热通量降低白天地表和近地面温度[54-55]；但不同模式对灌溉面积、用水量、方式和水源的表征差异较大，是气候响应不确定性的重要来源[56-57]。若模式采用无约束补水方案(仅依据土壤含水率亏缺阈值触发，忽略河流径流量、地下水可开采量、水库蓄水量及输配水工程能力)，将系统性高估农业气候适应潜力。在我国华北等地下水超采典型区，还需实现灌溉取水与含水层动态变化的闭合模拟，不能将气候收益与水资源代价割裂评估。

灌溉效应不能仅用干球温度下降评价。潜热增加在降低气温的同时提高近地层湿度，可能改变湿球温度和作物复合热风险；植被动态还会放大或延长灌溉间接效应。对农业气象而言，应综合诊断 2 m 气温、湿度、冠层温度、蒸散发、根区含水率和水资源消耗，并区分单次灌溉即时响应与土壤含水率-作物生长形成的跨季节记忆。

农业区域地球系统模式还需从水热过程拓展到碳氮循环和温室气体。稻田积水层改变地表热容量、蒸发及土壤氧化还原条件，常规旱地陆面方案难以直接适用。Noah - MP - Crop 加入稻田积水和水稻参数后，改善了水热与作物状态的模拟精度[58-59]；区域水稻模块进一步联合模拟产量、灌溉用水、甲烷和氧化亚氮，用于识别粮食-水-气候之间的协同和权衡[60]。对于旱地和长期气候情景，氮循环则连接施肥管理、植被生产力与环境损失。Noah -MP - CN 等模式通过耦合植物氮需求与土壤

矿化、硝化、反硝化、吸收和淋溶，使氮限制能够经光合作用、叶面积和蒸腾反馈水分与能量交换[45-47]；与大气化学在线耦合后，还可进一步描述氨排放-输送-沉降对陆地氮状态的反馈[48]。

相较于氮循环，磷循环在区域在线农业模式中实现案例仍较少，现有技术基础主要来自若干陆面模式已形成的技术路线。耦合碳-氮-磷的动态生态系统碳水模型（Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems coupled with Carbon - Nitrogen - Phosphorus，ORCHIDEE - CNP）在碳-氮框架上增加土壤磷库、吸附-解吸、矿化、根系吸收及含水率对磷移动性的约束[61]；JULES 的碳-氮-磷循环扩展（Carbon - Nitrogen - Phosphorus，JULES - CNP）进一步将植被和土壤磷库及其与碳-氮循环的相互作用纳入 JULES[62]；ELM - FUN 则以植物生产力优化为基础，显式计算主动吸收、菌根和磷酸酶等氮磷获取途径的碳成本[63]。这些模式表明，磷限制并非仅改变养分库存，还可通过光合作用、碳分配、根系生长和叶面积影响蒸腾及作物对干旱、温升和大气 CO_2 升高的响应。不过，磷循环不应被视为所有农业气象模拟的标准配置；应依据土壤风化程度、长期施肥历史和具体科学目标确定引入，并以土壤有效磷、植株磷吸收及损失通量观测进行约束。

2.3　参数区域化、数据同化与模式评价

区域农业模拟的主要挑战是空间尺度不匹配，作物参数多来自田间小区或单站控制试验，而区域网格代表多种土壤类型、作物品种和管理措施组合。将站点最优参数直接外推，易产生参数等效性问题：某一参数在校准点抵消了气象或土壤偏差，却在其他气候和管理条件下失去可迁移性。大尺度作物模型研究强调，作物分布、种植日历、品种参数、土壤属性和管理信息的区域化水平直接决定模拟性能的上限[64-65]。针对玉米、大豆和冬小麦的 Noah - MP - Crop 全球敏感性分析进一步表明，不同作物对物候、碳分配及含水率参数的敏感组合既有共性也有差异，统一参数集难以直接支撑跨作物和跨区域的模拟应用[66]。我国区域尺度作物及伴生过程研究也指出，输入数据空间化、参数尺度转换和多过程验证是由站点模型走向区域应用的关键环节[11]。

遥感和农业观测能够同时用于模型输入、状态更新和参数估计。叶面积指数、冠层覆盖、地表温度、土壤含水率和太阳诱导叶绿素荧光分别约束冠层结构、热状况、根区供水和光合作用。国内相关研究综述表明，作物模型与遥感信息集成已用于区域长势监测和产量估算，但模拟效果受观测误差、尺度不匹配、同化变量相关性和策略选择的多重影响[67]。我国自主研发的中国农业气象模式（CAMM1.0）体现了面向我国种植制度和业务需求的作物模拟系统研发思路[68]，优势在于针对性强，后续若与区域气候和陆面同化系统建立双向接口，可进一步增强过程一致性。

作物数据同化技术已由单变量状态更新向多变量和集合框架发展。相关综述指出，遥感同化需显式处理观测算子和误差协方差结构[69]。基于 Noah - MP - Crop 的联合同化试验表明，同步同化土壤含水率与物候信息可实现对陆面状态和作物生长的协同约束[70]；叶面积指数同化可改善灌溉用水估计[71]；作物模型、数据同化与机器学习的结合已成功应用于华北平原冬小麦产量预测[72]。2026 年粮农组织作物水分生产力模型（FAO Crop Water Productivity Model）v7.2 已进入美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）陆面信息系统，实现跨分辨率集合模拟和卫星冠层覆盖同化的统一高性能框架，为区域作物模拟跨分辨率集合化、多源同化和不确定性量化提供了可扩展框架和初步示范[73]。

区域地球系统模式评价体系应覆盖大气、陆面、作物、管理和环境效应。产量是整个生长季误差累积的结果，产量接近观测值并不能排除物候、土壤含水率、能量通量和养分状态之间的异参同效问题。在线耦合模式应结合离线陆面模拟、预设大气强迫试验和全耦合对照试验，分离气象驱动、陆面结构、作物参数和反馈机制等不同来源的误差；同时检查水量、能量及碳氮磷收支，并核对土壤矿质氮、有效磷、作物养分吸收和径流/淋溶损失，避免因单一变量模拟改善掩盖其他变量存在的系统性偏差。据此，从区域大气、陆面水热、作物状态、农业管理和资源环境 5 个维度，概括了相应的主要变量、观测约束和重点诊断内容，见表 4。

3　农业气象事件及模式应用

3.1　极端与复合农业气象事件

极端农业气象风险的定量化评估需遵循“气象事件-作物暴露-生理损伤-恢复过程-产量与环境效应”链式诊断逻辑。单一的气象阈值仅能表征外部气候强迫的强度，无法反映作物自身的响应特征。以农业干旱为例，需同步核算降雨亏缺、潜在蒸散需求、根区有效持水量及根系下扎深度，仅依赖降雨距平无法准确刻画作物实际受旱程度。针对高温胁迫，需耦合冠层温度、蒸腾冷却效率及开花至灌浆期的作物敏感特征，近地面气温往往无法反映冠层微环境的过热胁迫，在土壤含水率亏缺条件下尤为突

表 4 农业区域地球系统模式的多层次评价框架

Tab. 4 Multilevel evaluation framework for agricultural regional Earth system models

评价层级	主要变量	观测约束	重点诊断
区域大气	降雨、温湿度、辐射、风和边界层高度	地面气象站、天气雷达、探空和再分析	天气过程、极端结构及侧边界影响
陆面水热	地表温度、土壤含水率、蒸散、显热和潜热	通量塔、遥感、土壤剖面和水文观测	能量/水量闭合及陆-气耦合强度
作物状态	物候、叶面积、冠层温度、生物量和产量	农业气象站、田间试验和遥感物候产品	发育、胁迫和碳分配的一致性
农业管理	播期、品种、灌溉、施肥和复种制度	农业统计、农户调查、灌区和作业记录	管理时序、强度及空间异质性
资源环境	土壤矿质氮与有效磷、作物养分吸收、氮-磷损失、CH_4、N_2O 和 NH_3 排放	土壤/植株养分、施肥、水文水质及温室气体观测	水量与碳氮磷收支、养分利用及粮食-水-环境权衡

出;低温冻害致灾强度则受最低温、冠层辐射冷却、物候进程及抗寒锻炼状态共同调控,尤其需关注“暖冬后骤冷”物候错位效应;洪涝渍害影响时长则由土壤饱和持续时间、地表积水深度、地下水位及根区缺氧程度共同决定。区域地球系统模式可连续存储土壤含水率、叶面积指数、物候进程及碳库动态,为解释相同气象异常在不同前期条件下造成的差异化损失提供了物理基础。

当前多数区域地球系统模式极端事件参数化方案存在“恢复过快”的共性问题,即胁迫解除后会立即回归潜在生长速率,无法表征授粉失败、叶片早衰、根系坏死、倒伏及碳储备耗尽等不可逆或缓慢恢复过程。极端事件参数化需跳出单一经验减产系数的局限,将可观测的损伤状态变量(如叶面积衰减率、冠层温度异常值、倒伏率等)结合控制试验、冠层温度观测、遥感植被衰老产品、田间倒伏记录及灾情普查数据等共同约束。针对大风、台风等风灾,需进一步耦合阵风强度、冠层空气动力学阻力、土壤含水率及降雨-大风复合过程与倒伏风险的定量关系,尤其需关注前期土壤过湿条件下根系固着力下降对倒伏概率的放大效应。

复合与连续农业气象事件的影响常表现为非加和效应,而连续事件影响还具有明显的前期状态依赖性或路径依赖特征。例如高温与干旱同时发生时,土壤含水率亏缺会抑制蒸腾冷却并抬升冠层温度,从而加剧作物热胁迫;前期异常暖条件引起的物候提前可能增加后期晚霜冻害的暴露风险;前期渍涝造成的根系缺氧则可能削弱后续水分胁迫下吸水能力[6,9]。上述复合与连续效应受作物类型、生育阶段及土壤水热背景调节,其作用程度并不一致。模型不仅需要识别多种极端事件的共现,还应刻画事件发生顺序和间隔,并保留土壤含水率、物候状态、根系活力及前期损伤等能够表征前期影响的状态变量。相应地,农业气象风险评价也应由单变量阈值扩展至多变量联合或条件判据,并结合前期状态与作物生育阶段进行综合判断。

强降雨对农业影响还可能由渍涝和机械损伤延伸到养分输出及水环境响应。Noah - MP - CN 在珠江流域的应用表明,年降雨总量决定区域氮输出的背景水平,而极端降雨强度、持续时间及后续径流和淋溶响应控制短时氮损失的脉冲[74]。因此,湿润农业区极端事件评估在关注作物受损的同时,还应根据研究目标诊断前期土壤含水率、径流连通性、土壤无机氮储量和养分输出通量,以区分相同累积降雨量下不同降雨时空结构造成的环境效应。

农业管理措施对极端风险影响具有明显的指标依赖性。华北平原研究结果表明,灌溉可能在降低干球温度的同时增加土壤含水率,在强变暖条件下可能加剧湿热风险[21];春季灌溉产生的土壤含水率异常可延续至夏季并削弱极端高温[22];是否允许植被动态响应,也会改变灌溉气候效应的估计[23]。因此,适应措施评价应诊断气象暴露、冠层与根区状态、水资源消耗及环境代价,不能由单一降温或减产指标推断综合效益。主要灾害类型对应的过程变量、重点预报时效及模式需求见表 5。

3.2 典型农业区的模式应用

华北平原是动态作物-灌溉-气候耦合研究较集中区域。早期研究已指出双季种植能够改变夏季地表覆盖和区域气候[24];随后,Noah - MP - Crop 冬小麦区域化、双季作物交互式灌溉和数据同化研究逐步厘清了“种植制度-土壤含水率-作物生长-边界层-热环境”过程链[20,52,72]。该区域的主要研究共识是,采用固定植被季节循环会造成蒸散和粗糙度峰值的模拟偏差,固定时间灌溉也会忽略作物生长增强形成的间接反馈;但现有系统对地下水供给、氮肥和湿热风险的联合约束仍不足。

美国中部研究更强调大尺度作物与灌溉的联合表征。Noah - MP 作物-灌溉模拟表明,作物类型、物候和土壤含水率触发规则共同决定灌溉需水及地表通量;WRF - ELM 则在 5 大湖区域展示了先进陆面模式与区域大气模块化耦合的可行性[50]。这类研究表明,区域模型可以保持天气模式灵活的物理方案,又方便引入更复杂的植物水力和土地管理,但高分辨率耦合结果仍需多站点通量和土壤剖面观测

表 5　主要农业气象灾害过程指标、预报时效及模式需求

Tab. 5　Process indicators, operational forecast lead times, and model requirements for major agrometeorological hazards

灾害类型	气象暴露与常用指标	主要作物/陆面状态	主要损伤链与敏感阶段	预报时效及模式需求
农业干旱	降雨亏缺、蒸汽压亏缺、蒸散需求	根区水分、蒸散亏缺、气孔导度	营养生长至灌浆；水分记忆与生长受限	10 ~ 30 d 及月–季节；根系、土壤水分、灌溉和集合初始化
高温热害	最高温、高温持续时数、湿球温度	冠层温度、蒸腾冷却、物候阶段	开花授粉和灌浆；生殖器官损伤	0 ~ 10 d，兼顾 10 ~ 30 d；冠层能量、动态物候、湿度和概率阈值
低温冻害	最低温、霜冻时数、近地层逆温	冠层温度、物候阶段、抗寒状态	出苗、拔节和开花；细胞及花器官损伤	0 ~ 10 d；冠层辐射、动态物候和区域阈值
洪涝渍害	强降雨、积水持续时间	土壤饱和度、地下水位、根区缺氧	出苗至生殖期；根系损伤与恢复延迟	0 ~ 10 d；积水、地下水和损伤–恢复过程
大风/台风	阵风、持续风速、风雨组合	冠层阻力、株高、土壤含水率	抽穗至成熟；倒伏、折损和脱落	0 ~ 10 d；风场、冠层结构及风雨复合效应
复合/连续事件	联合阈值、事件顺序和间隔	前期水分、碳储备、损伤记忆	跨生育阶段；非加和损伤和不完全恢复	视事件组合而定；状态记忆、联合概率和不可逆损伤

检验。

欧洲研究形成了与北美不同的技术路线。ISBA/SURFEX 将作物物候和灌溉嵌入成熟陆面平台，REMO2020 – iMOVE 通过交互式植被和灌溉评估西南欧陆–气反馈[19,49]；RegCM – ES、COSMO – CLM 和 GCOAST 则重点发展海–陆–气及径流耦合[30–33]。这些系统对沿海农业区、地中海干旱和跨流域水资源具有优势，但作物品种及产量形成过程相对简化。农业应用需在区域地球系统完整性与作物过程精细度之间权衡，以免为追求多圈层耦合而牺牲关键农业过程的表征能力。

亚洲水稻区展示了农业区域模型向环境过程扩展的需求。积水层、灌溉制度和土壤氧化还原状态共同控制水稻生长、用水以及甲烷和氧化亚氮排放[58,60]。这类问题难以由传统区域气候模式或单一作物产量模型独立解决，需要连接陆面水热、作物生理、土壤生物地球化学和管理优化。其发展方向是利用区域气候模式提供极端天气和水资源背景，以作物–生物地球化学模型评估多目标管理，而不必强求所有过程均进行高频率双向耦合。

跨区域研究表明，作物和管理措施的精细化必须与区域大气过程的解析能力相匹配。对流可分辨区域模式有望改善短历时强降雨、局地环流和地形效应，但农业气象增益应通过土壤含水率、冠层状态、生育阶段和灾害指标加以验证，而不能仅依据降雨空间细节的改善作出判断[75]。不同区域代表性技术路线、主要研究问题、形成的共识及待解决问题见表 6。

表 6　典型农业区模式应用共识

Tab. 6　Model applications in representative agricultural regions

区域/系统	代表技术路线	主要研究问题	形成的共识	待解决问题
华北平原	WRF – Noah – MP – Crop、双季作物和交互灌溉	复种、灌溉、极端热和产量	物候与植被动态决定灌溉反馈幅度和持续性	地下水、氮肥和湿热风险联合约束
美国中部/五大湖	Noah – MP 作物灌溉、WRF – ELM	大尺度农田通量和模块化陆–气耦合	作物类型、根区水分和高级陆地过程共同影响区域响应	高分辨率参数及多站点验证
欧洲/地中海	ISBA/SURFEX、REMO2020 – iMOVE、RegCM – ES/GCOAST	灌溉、干旱及海陆水循环	标准耦合器和交互式植被有利于跨分量过程研究	作物品种和产量过程需细化
中国及亚洲水稻区	稻田陆面–作物–温室气体模型	积水、产量、用水和 CH_4/N_2O	农业管理需与水热及生物地球化学协同评价	区域观测、养分和多目标优化不确定性

3.3　农业气象预测与评价

农业气象预测应同时考虑预报时效和决策对象，并据此区分可预报源、初始化方式和评价对象。0 ~ 10 d 天气尺度依赖区域动力模式对强降雨、高温、低温和大风过程的解析，并需以实时土壤含水率、物候和冠层状态进行初始化，可服务于灌溉启动与时段选择、排涝、高低温防护以及收获等短期田间作业安排；10 ~ 30 d 延伸期主要利用陆面记忆和次季节环流信号，适于根区干旱及高温–干旱演变的概率预报，可为阶段性灌溉计划、农业用水调配和灾害防范准备提供依据；月–季节尺度侧重播期、品种、灌溉需求和产量分布，需要气候集合、作物状态和管理情景共同构建成员，可进一步支持播期与品种选择、季节灌溉配额和种植安排；年际至气候尺度则服务

种植制度迁移和长期资源配置,应依托多气候模式、多作物结构和适应情景。不同尺度不宜共用单次确定性积分和固定阈值。

热带卫星气象应用非洲预警系统(Tropical Applications of Meteorology using SATellite data-Africa-wide Lightweight Early-warning and Reporting Tool,TAMSAT-ALERT)将实时气候监测、历史气候集合和影响模型结合,可随观测更新农业不利事件概率[76],通用版本进一步降低了大集合风险预测的计算成本[77]。中国农业气象模式(China Agro-Meteorological Model,CAMM)等具有作物和灾害业务经验[68]。区域地球系统模式可提供过程一致的气象-土壤-作物状态,业务模型则补充品种参数、灾害阈值和服务产品;二者可通过状态同化、偏差订正和概率后处理连接,使业务目标由气温和降雨预报拓展为生育阶段相关的干旱、热害、低温、渍涝、产量和灌溉风险。

业务评价应区分确定性和概率产品。短期事件应检验发生时间、空间命中率、漏报率和虚警率;集合产品应评价可靠度、分辨能力和概率校准效果;影响类产品还应检验敏感生育期识别、风险等级排序及管理建议的实用价值。灾害阈值需依据作物类型、品种和区域气候进行校准,不宜将单一温度或降雨阈值直接跨区移植。长期影响评价则需借助多模式比较识别结构不确定性。农业模型比较与改进计划(Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project,AgMIP)及全球网格作物模型比较计划建立了统一驱动、试验协议和评价指标[78-80],相关研究表明,生育期调整可在部分地区减轻气候损失,但效果受水分约束和管理可实施性限制[81-82]。区域在线耦合研究应开展“相同大气强迫-不同作物模块”和“相同作物模块-不同大气物理方案”正交比较,避免将单一模式结果解释为确定性结论。

4 主要瓶颈与发展方向

4.1 区域模式主要瓶颈

区域模式主要瓶颈包括模式复杂度、空间尺度效应与不确定性。模式复杂度增加能够引入新的反馈,但也增加参数自由度并扩大误差来源。在线耦合后,降雨偏差可改变土壤含水率和作物生长,作物偏差又会反馈地表通量和边界层,使误差在分量间循环传播。若缺少足够观测,复杂模型可能通过不同参数组合获得相近产量或通量,形成等效性。因此,模型的研发和选择应遵循“最小充分反馈链”原则,避免无节制地增加过程复杂度。对每个新增的过程模块,须设置可观测的验证变量(如氮淋失量、冠层温度)和物质能量收支约束,并通过“预设大气强迫-离线陆面-全耦合”层级试验剥离其真实增益。

空间尺度不匹配是区域农业模式长期存在的结构性问题。气象网格、遥感像元、土壤图斑、农田地块和行政统计边界普遍不一致,区域平均管理参数也难以表示农户行为。千米尺度模式虽然减小网格面积,但仍不能直接等同于地块尺度,且高分辨率地表参数和作物类型资料可能成为新的主要误差源。应发展按作物覆盖度(各作物类型在网格内面积占比)、亚网格作物组合(同一作物内不同熟型与播期的集合表征)和随机管理参数化(播期、灌溉、施肥等田间作业统计分布特征),结合地块遥感和农业统计对网格内异质性进行约束。

不确定性的来源具有多层级特征,应按侧边界强迫、区域大气物理过程、陆面/作物结构、初始状态、参数集及管理情景进行解构。现有研究常只扰动气象驱动或作物参数,难以说明最终风险范围由何种来源主导。建议采用分层集合模拟策略,以较少成员的高分辨率动力集合捕捉大气不确定性,以中等规模多陆面/作物结构集合捕捉模型结构不确定性,辅以大规模的参数-管理蒙特卡洛集合捕捉人为活动不确定性。此外,模式比较不仅应报告均值和离散度,还应检验模式在极端年份预报的可靠度、概率校准能力及跨区域的可迁移性,这对农业风险管理至关重要。

4.2 区域模式发展方向

区域模式正向非静力和对流可分辨方向发展。RegCM5、ICON-CLM 和新一代 WRF 配置提高了对强对流天气、地形降雨和局地环流的解析能力[27,33,75]。对农业气象而言,潜在增益主要体现在短历时强对流性降雨、冰雹、雷暴大风和局地高温热害模拟,为农业气象灾害的精细化预警提供动力基础,但应用仍受长期积分成本、土壤-作物初值和集合规模限制。未来应优先在灾害高发区和关键生育期开展嵌套或时段化千米尺度模拟,而非不加区分地提升全年全域分辨率。

模块化耦合是控制复杂度和提高可维护性的关键。OASIS3-MCT、ESMF 和 LILAC 等框架允许大气、陆面、水文或作物分量独立开发,并通过标准接口交换状态和通量[32-33,50]。这种架构有利于比较不同作物/陆面模块,也便于将全球陆地模型的新过程引入区域尺度。但接口标准化必须与物理一致性同步推进,尤其要明确变量定义、时间平均方式(瞬时值或小时均值)、守恒变量的重映射算法及分量

模型的更新顺序，否则极易出现数值上运行正常但物理上能量不闭合的现象。

人工智能适用于参数反演、偏差订正、亚网格参数化、计算昂贵过程代理和集合后处理。数据驱动地球系统研究强调将深度学习与过程知识结合[83]，新一代多尺度气候建模也将人工智能视为加速模拟和构建大集合的重要手段[84]。农业区域模式中更稳健的路径由物理模式维持水、能量、碳和氮状态，人工智能学习观测充分且难以显式表达的残差或亚网格过程；训练和评价必须包含独立极端年份、跨区域试验和守恒检查，避免在气候外推中产生违背物理规律的不可解释结果。

4.3　我国区域模式与农业气象业务协同

我国已形成 RIEMS、CWRF 和 CAMM 等具有不同定位的模式基础。RIEMS 侧重多圈层反馈和人类活动耦合，CWRF 侧重高质量区域天气-气候模拟，CAMM 及作物陆面模块面向作物状态、灾害和管理响应[16,26,68]。三者不宜相互替代，而应按任务分层使用：RIEMS 用于长期情景和粮食-水-环境协同研究，CWRF 或其他区域大气模式提供高分辨率气象过程，CAMM 及作物模块承担品种、物候、灾害指标和管理方案表达。

协同研发首先需要建立共享数据层和标准变量接口。基础数据应持续更新作物类型、种植制度、播收期、品种熟性、灌溉面积与水源、施肥、耕作和土壤属性，并对农业气象站、通量站、土壤剖面、遥感产品和统计产量规定统一版本、空间尺度和不确定性。区域大气模式向作物系统提供降雨、辐射、气温、湿度、风及必要的二氧化碳或沉降条件；作物-陆面系统向大气返回叶面积、冠层高度、反照率、粗糙度及热量、水分和碳通量。面向农业环境效应的扩展还应按需传递土壤矿质氮、有效磷、作物氮磷吸收、氨挥发、氮沉降以及径流和淋溶养分。Noah - MP - CN 与 WRF/WRF - Chem 在线耦合为氮过程接口提供了实例[45-48]，ORCHIDEE - CNP、JULES - CNP 和 ELM - FUN 则为磷库、植物磷获取和养分获取碳成本的接口设计提供了参考[61-63]。上述变量应依据科学问题选择性启用，接口还需统一变量定义、单位、时间平均方式、网格映射和质量控制。

面向上述接口协同，区域模式还需具备 3 个相互关联的基础能力：①流域尺度水量分量的闭合与检验。Noah - MP 在密西西比河流域的水文评价为径流、蒸散和陆地水储量的一致性诊断提供了代表性范例[85]。②观测与模式网格之间的尺度转换。SMAPVEX15 研究基于 30 m 分辨率（可达田块尺度）的 HydroBlocks 超高分辨率模型将点尺度土壤含水率上推至卫星足迹尺度，表明高分辨率陆面模拟可作为遥感验证和数据同化的尺度桥梁[86]。③下垫面结构变化过程表达。E3SM 陆面模式对毁林后叶面积、根系、径流和蒸散响应的改进表明，植被结构扰动需通过水热和生理过程共同传递至陆-气通量[87]。这些接口同样适用于农田类型、复种制度和管理变化的区域化表达，并为作物、养分与大气过程进一步耦合提供基础。

技术实施可采用分阶段路线：以离线或单向耦合完成多区域参数化和业务检验，再在灌溉强度高、农田覆盖广或陆-气反馈敏感的区域和关键生育期开展在线耦合；通过土壤含水率、叶面积和物候同化更新初始状态，以分层集合输出不同生育阶段的干旱、高温热害、低温、渍涝、产量、灌溉需求和环境代价概率。科研与业务之间应建立年度评估和典型灾害复盘机制，将检验结果分别反馈至参数区域化、同化策略、模式结构和概率校准。区域观测、状态-参数联合同化、集合预测、风险诊断、管理决策与业务检验之间的闭环关系如图 2 所示。

5　结论

（1）面向农业气象的区域地球系统模式由区域大气核心、集成作物过程的陆面分量、在线大气-陆面-作物系统及按科学问题配置的水文、海洋、生物地球化学和人类活动分量共同构成的层级化体系，而非某一陆面模式的泛称。农业过程表达已由静态植被季节循环发展到动态物候、根系吸水、复种和交互式灌溉，并逐步纳入养分限制、温室气体和水资源约束。在生物地球化学方向，氮循环已由 Noah - MP - CN 等陆面内部碳-氮耦合，扩展到中尺度近地面气象反馈以及氨排放-输送-沉降的在线模拟；磷循环则主要在 ORCHIDEE - CNP、JULES - CNP 和 ELM - FUN 等陆面模式中发展，但向区域农业气象系统在线接入尚处于起步阶段。

（2）在线耦合与离线模拟各有适用场景。在线耦合适用于灌溉降温、边界层演变和局地天气反馈等问题，离线模型链在品种、播期和长期管理情景比较中仍具有计算效率和可解释性优势。面向极端气候预测与影响评价，模式需要贯通气象事件、作物暴露、生理损伤、恢复及产量与环境效应，并针对天气、延伸期、季节和气候尺度采用不同的初始化、集合构建和评价方法。当前制约区域应用的关键并非单纯缺少模式分量，而是作物与管理参数区域化不足、极端损伤与恢复过程简化、灌溉水源和氮-磷约束不完整，以及耦合误差和概率不确定性难以辨识。

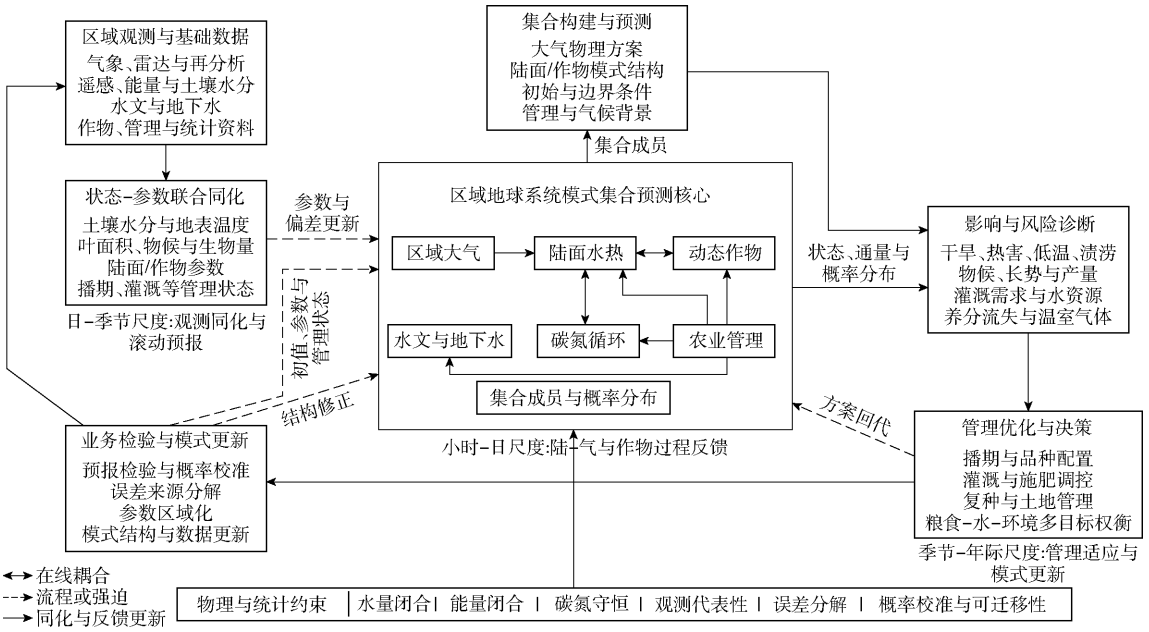


图 2 区域地球系统模式支撑农业气象业务的闭环框架

Fig. 2 Closed-loop framework linking regional Earth system models with agrometeorological services

(3)未来应以水量、能量和碳-氮-磷收支及多层次观测评价为基础,推进对流可分辨分层集合、标准化耦合接口、多源状态-参数同化和物理信息人工智能,并建立区域气象、作物、水文与生物地球化学模式之间可追溯的数据、变量和业务检验接口,使区域地球系统模式的应用领域由传统的高分辨率气象模拟进一步拓展到作物状态、农业灾害、资源消耗和环境效应的概率预测与多目标决策支持。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group ii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2] Ray D K, Gerber J S, MacDonald G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 5989.

[3] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529(7584): 84 - 87.

[4] Zhao C, Liu B, Piao S, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(35): 9326 - 9331.

[5] Vogel E, Donat M G, Alexander L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(5): 054010.

[6] Lesk C, Anderson W, Rigden A, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(12): 872 - 889.

[7] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3 - 4): 125 - 161.

[8] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. Science, 2004, 305(5687): 1138 - 1140.

[9] Zscheischler J, Martius O, Westra S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(7): 333 - 347.

[10] McDermid S S, Mearns L O, Ruane A C. Representing agriculture in earth system models: approaches and priorities for development[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2017, 9(5): 2230 - 2265.

[11] 刘文丰, 白亚玮, 杜太生, 等. 区域尺度作物生长及伴生过程模型研究进展[J]. 中国科学:地球科学, 2025, 55(3): 669 - 685.
Liu Wenfeng, Bai Yawei, Du Taisheng, et al. Advances in regional-scale crop growth and associated process modeling[J]. Scientia Sinica Terrae, 2025, 55(3): 669 - 685. (in Chinese)

[12] 徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 49(3): 487 - 498.
Xu Zhongfeng, Han Ying, Yang Zongliang. Review of dynamical downscaling methods for regional climate[J]. Scientia Sinica Terrae, 2018, 49(3): 487 - 498. (in Chinese)

[13] Giorgi F. Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? [J]. Journal of Geophysical

Research：Atmospheres，2019，124(11)：5696－5723.
[14] Giorgi F，Gao X J. Regional earth system modeling：review and future directions[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters，2018，11(2)：189－197.
[15] 张焓，戴永久，张树磊. 区域地球系统模式研究进展[J]. 大气科学学报，2024，47(2)：216－223.
Zhang Han，Dai Yongjiu，Zhang Shulei. Advances in regional Earth system models[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，2024，47(2)：216－223.（in Chinese）
[16] 郑辉，丹利，符淙斌，等. 区域地球系统集成模式(RIEMS)的研发进展与未来展望[J]. 科学通报，2026，71(13)：2896－2903.
Zheng Hui，Dan Li，Fu Congbin，et al. Development and future prospects of the regional integrated Earth system model (RIEMS)[J]. Chinese Science Bulletin，2026，71(13)：2896－2903.（in Chinese）
[17] Warrach-Sagi K，Ingwersen J，Schwitalla T，et al. Noah-MP with the generic crop growth model gecros in the WRF model：effects of dynamic crop growth on land-atmosphere interaction[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2022，127(14)：e2022JD036518.
[18] Lu Y，Jin J，Kueppers L M. Crop growth and irrigation interact to influence surface fluxes in a regional climate-cropland model (WRF3.3－CLM4Crop)[J]. Climate Dynamics，2015，45(11－12)：3347－3363.
[19] Asmus C，Hoffmann P，Pietikäinen J P，et al. Modeling and evaluating the effects of irrigation on land-atmosphere interaction in southwestern Europe with the regional climate model REMO2020－iMOVE using a newly developed parameterization[J]. Geoscientific Model Development，2023，16(24)：7311－7337.
[20] Fan Y，Yang Z，Lo M H，et al. Applying double cropping and interactive irrigation in the North China Plain using WRF4.5[J]. Geoscientific Model Development，2024，17(18)：6929－6947.
[21] Kang S，Eltahir E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. Nature Communications，2018，9(1)：2894.
[22] Liu G，Wang W，Xu H. Spring irrigation reduces the frequency and intensity of summer extreme heat events in the North China Plain[J]. Geophysical Research Letters，2024，51(5)：e2023GL107094.
[23] Fan Y，Im E S. The role of vegetation dynamics in assessing irrigation impacts[J]. Geophysical Research Letters，2025，52(12)：e2024GL114566.
[24] Jeong S J，Ho C H，Piao S，et al. Effects of double cropping on summer climate of the North China Plain and neighbouring regions[J]. Nature Climate Change，2014，4(7)：615－619.
[25] Liang X Z，Xu M，Yuan X，et al. Regional climate-weather research and forecasting model[J]. Bulletin of the American Meteorological Society，2012，93(9)：1363－1387.
[26] 刘冠州，梁信忠. 新一代区域气候模式(CWRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展，2017，32(7)：781－787.
Liu Guanzhou，Liang Xinzhong. Progress of the climate extension of weather research and forecast (CWRF) model application in China[J]. Advances in Earth Science，2017，32(7)：781－787.（in Chinese）
[27] Giorgi F，Coppola E，Giuliani G，et al. The fifth generation regional climate modeling system，RegCM5：description and illustrative examples at parameterized convection and convection-permitting resolutions[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2023，128(6)：e2022JD038199.
[28] Pietikäinen J P，Sieck K，Buntemeyer L，et al. Remo2020：a modernised modular regional climate model[J]. Geoscientific Model Development，2025，18(20)：7907－7949.
[29] Drobinski P，Anav A，Lebeaupin B C，et al. Model of the regional coupled Earth system (MORCE)：application to process and climate studies in vulnerable regions[J]. Environmental Modelling & Software，2012，35：1－18.
[30] Sitz L E，Di S F，Farneti R，et al. Description and evaluation of the Earth system regional climate model (RegCM－ES)[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems，2017，9(4)：1863－1886.
[31] Reale M，Giorgi F，Solidoro C，et al. The regional Earth system model RegCM－ES：evaluation of the mediterranean climate and marine biogeochemistry[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems，2020，12(9)：e2019MS001812.
[32] Will A，Akhtar N，Brauch J，et al. The COSMO－CLM 4.8 regional climate model coupled to regional ocean，land surface and global earth system models using OASIS3－MCT：description and performance[J]. Geoscientific Model Development，2017，10(4)：1549－1586.
[33] Ho-Hagemann H T M，Maurer V，Poll S，et al. Coupling the regional climate model ICON－CLM v2.6.6 to the Earth system model GCOAST－AHOI v2.0 using OASIS3－MCTt v4.0[J]. Geoscientific Model Development，2024，17(21)：7815－7834.
[34] Adam J C，Stephens J C，Chung S H，et al. BioEarth：envisioning and developing a new regional Earth system model to inform natural and agricultural resource management[J]. Climatic Change，2014，129(3－4)：555－571.
[35] 赵得明，符淙斌，延晓冬. 区域环境集成模拟系统 RIEMS2.0 对中国多年降水和气温模拟能力分析[J]. 科学通报，2009，54(16)：2379－2387.
Zhao Deming，Fu Congbin，Yan Xiaodong. Evaluation of RIEMS2.0 in simulating multi-year precipitation and temperature over China[J]. Chinese Science Bulletin，2009，54(16)：2379－2387.（in Chinese）
[36] 郑婧，谢正辉，戴永久，等. 陆面过程模型 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 的耦合及初步评估[J]. 大气科学，2009，33(4)：737－750.

Zheng Jing, Xie Zhenghui, Dai Yongjiu, et al. Coupling of CoLM with RegCM3 and preliminary evaluation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(4): 737 - 750. (in Chinese)
[37] Levis S, Bonan G B, Kluzek E, et al. Interactive crop management in the community Earth system model (CESM1): seasonal influences on land-atmosphere fluxes[J]. Journal of Climate, 2012, 25(14): 4839 - 4859.
[38] Drewniak B, Song J, Prell J, et al. Modeling agriculture in the community land model[J]. Geoscientific Model Development, 2013, 6(2): 495 - 515.
[39] Osborne T, Gornall J, Hooker J, et al. JULES - Crop: a parametrisation of crops in the joint UK land environment simulator [J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8(4): 1139 - 1155.
[40] Lombardozzi D L, Lu Y, Lawrence P J, et al. Simulating agriculture in the community land model version 5[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, 125(8): e2019JG005529.
[41] Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah - MP): 1. model description and evaluation with local-scale measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D12): D12109.
[42] Liu X, Chen F, Barlage M, et al. Noah - MP - Crop: introducing dynamic crop growth in the Noah-MP land surface model [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(23): 13953 - 13972.
[43] Partridge T F, Winter J M, Kendall A D, et al. Cross-scale evaluation of dynamic crop growth in WRF and Noah - MP - Crop [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 296: 108217.
[44] Yu L, Liu Y, Liu T, et al. Coupling localized Noah - MP - Crop model with the WRF model improved dynamic crop growth simulation across Northeast China[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107323.
[45] Cai X, Yang Z L, Fisher J B, et al. Integration of nitrogen dynamics into the Noah - MP land surface model v1.1 for climate and environmental predictions[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(1): 1 - 15.
[46] Liang J, Yang Z L, Cai X, et al. Modeling the impacts of nitrogen dynamics on regional terrestrial carbon and water cycles over China with Noah - MP - CN[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(7): 679 - 695.
[47] Cai X, Cao Y, Zhang G, et al. Influence of terrestrial nitrogen dynamics on mesoscale near-surface meteorological fields[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024, 129(14): e2023JD040168.
[48] Cao Y, Ren C, Zhang H, et al. Dynamic modeling of ammonia emissions and nitrogen deposition via online coupling of WRF - Chem and Noah - MP - CN[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2026, 131(2): e2025JD044260.
[49] Druel A, Munier S, Mucia A, et al. Implementation of a new crop phenology and irrigation scheme in the ISBA land surface model using SURFEX_v8.1[J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(22): 8453 - 8471.
[50] Huang H, Qian Y, Bisht G, et al. WRF - ELM v1.0: a regional climate model to study land-atmosphere interactions over heterogeneous land use regions[J]. Geoscientific Model Development, 2025, 18(5): 1427 - 1443.
[51] Zhang Z, Li Y, Chen F, et al. Developing spring wheat in the Noah - MP land surface model (v4.4) for growing season dynamics and responses to temperature stress[J]. Geoscientific Model Development, 2023, 16(13): 3809 - 3825.
[52] Wang F, Li Y, Li Z, et al. Enhancing winter wheat representation in Noah - MP - Crop for improved dynamic crop growth simulation in the North China Plain[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2024, 129(8): e2024JG008150.
[53] Liu X, Chen F, Barlage M, et al. Implementing dynamic rooting depth for improved simulation of soil moisture and land surface feedbacks in Noah - MP - Crop[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, 12(2): e2019MS001786.
[54] Sacks W J, Cook B I, Buenning N, et al. Effects of global irrigation on the near-surface climate[J]. Climate Dynamics, 2008, 33(2 - 3): 159 - 175.
[55] Thiery W, Davin E L, Lawrence D M, et al. Present - day irrigation mitigates heat extremes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(3): 1403 - 1422.
[56] Valmassoi A, Keller J D. A review on irrigation parameterizations in Earth system models[J]. Frontiers in Water, 2022, 4: 906664.
[57] McDermid S, Nocco M, Lawston-Parker P, et al. Irrigation in the Earth system[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(7): 435 - 453.
[58] Xu X, Maruyama A, Kusaka H. Improvements in the land and crop modeling over flooded rice fields by incorporating the shallow paddy water[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2023, 15(8): e2022MS003248.
[59] Xing L, Dan L, Li K, et al. Development of a paddy rice module coupled with the Noah - MP - Crop model[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2026: 100857.
[60] Bo Y, Liang H, Li T, et al. Process-based modeling framework for sustainable irrigation management at the regional scale: integrating rice production, water use, and greenhouse gas emissions[J]. Geoscientific Model Development, 2025, 18(12): 3799 - 3817.
[61] Goll D S, Vuichard N, Maignan F, et al. A representation of the phosphorus cycle for ORCHIDEE (revision 4520)[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(10): 3745 - 3770.
[62] Nakhavali M A, Mercado L M, Hartley I P, et al. Representation of the phosphorus cycle in the joint UK land environment simulator (vn5.5_JULES - CNP)[J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(13): 5241 - 5269.
[63] Braghiere R K, Fisher J B, Allen K, et al. Modeling global carbon costs of plant nitrogen and phosphorus acquisition[J].

Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2022, 14(8): e2022MS003204.
[64] Manivasagam V S, Rozenstein O. Practices for upscaling crop simulation models from field scale to large regions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105554.
[65] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444 - 459.
Sun Yangyue, Shen Shuanghe. Research progress in application of crop growth models[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 444 - 459. (in Chinese)
[66] Fang J, Wang F, Cai X, et al. Identifying sensitive parameters of global major staple crops in the Noah - MP crop model: similarities and differences[J]. European Journal of Agronomy, 2026, 181: 128289.
[67] 彭慧文, 赵俊芳, 谢鸿飞, 等. 作物模型应用与遥感信息集成技术研究进展[J]. 中国农业气象, 2022, 43(8): 644 - 656.
Peng Huiwen, Zhao Junfang, Xie Hongfei, et al. Advances in integration of crop models and remote sensing information[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(8): 644 - 656. (in Chinese)
[68] 马玉平, 霍治国, 王培娟, 等. 中国农业气象模式(CAMM1.0)构建与应用[J]. 应用气象学报, 2019, 30(5): 528 - 542.
Ma Yuping, Huo Zhiguo, Wang Peijuan, et al. Development and application of the Chinese agricultural meteorological model (CAMM1.0)[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(5): 528 - 542. (in Chinese)
[69] Jin X, Kumar L, Li Z, et al. A review of data assimilation of remote sensing and crop models[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 92: 141 - 152.
[70] Xu T, Chen F, He X, et al. Improve the performance of the Noah - MP - Crop model by jointly assimilating soil moisture and vegetation phenology data[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2021, 13(7): e2020MS002394.
[71] Nie W, Kumar S V, Peters-Lidard C D, et al. Assimilation of remotely sensed leaf area index enhances the estimation of anthropogenic irrigation water use[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2022, 14(11): e2022MS003040.
[72] Zhuang H, Zhang Z, Cheng F, et al. Integrating data assimilation, crop model, and machine learning for winter wheat yield forecasting in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 347: 109909.
[73] De Lannoy G J M, Busschaert L, Bechtold M, et al. Advancing crop modeling and data assimilation using AquaCrop v7.2 in NASA's land information system framework v7.5[J]. Geoscientific Model Development, 2026, 19(6): 2551 - 2575.
[74] Cai X, Wu X, Huang H, et al. Disentangling the influence of precipitation on nitrogen loss in the Pearl River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2026, 677: 135809.
[75] Lucas-Picher P, Argüeso D, Brisson E, et al. Convection-permitting modeling with regional climate models: latest developments and next steps[J]. WIREs Climate Change, 2021, 12(6): e731.
[76] Asfaw D, Black E, Brown M, et al. Tamsat-alert v1: a new framework for agricultural decision support[J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11(6): 2353 - 2371.
[77] Black E, Ellis J, Maidment R I. A computationally lightweight model for ensemble forecasting of environmental hazards: general Tamsat-alert v1.2.1[J]. Geoscientific Model Development, 2024, 17(22): 8353 - 8372.
[78] Rosenzweig C, Jones J W, Hatfield J L, et al. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170: 166 - 182.
[79] Elliott J, Müller C, Deryng D, et al. The global gridded crop model intercomparison: data and modeling protocols for phase 1 (v1.0)[J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8(2): 261 - 277.
[80] Müller C, Elliott J, Chryssanthacopoulos J, et al. Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(4): 1403 - 1422.
[81] Jägermeyr J, Müller C, Ruane A C, et al. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models[J]. Nature Food, 2021, 2(11): 873 - 885.
[82] Minoli S, Jägermeyr J, Asseng S, et al. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7079.
[83] Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science[J]. Nature, 2019, 566(7743): 195 - 204.
[84] Eyring V, Gentine P, Camps-Valls G, et al. AI-empowered next-generation multiscale climate modelling for mitigation and adaptation[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(10): 963 - 971.
[85] Cai X, Yang Z L, David C H, et al. Hydrological evaluation of the Noah - MP land surface model for the Mississippi River Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(1): 23 - 38.
[86] Cai X, Pan M, Chaney N W, et al. Validation of smap soil moisture for the SMAPVEX15 field campaign using a hyper-resolution model[J]. Water Resources Research, 2017, 53(4): 3013 - 3028.
[87] Cai X, Riley W J, Zhu Q, et al. Improving representation of deforestation effects on evapotranspiration in the E3SM land model[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11(8): 2412 - 2427.