

# 中国植被物候研究进展及展望\*

付永硕<sup>1,2)†</sup> 张晶<sup>1)</sup> 吴兆飞<sup>1)</sup> 陈首志<sup>1)</sup>

(1)北京师范大学水科学研究院,北京师范大学中国绿色发展协同创新中心,100875,北京;

2)比利时安特卫普大学生物系,B-2016,安特卫普,比利时)

**摘要** 本文围绕气候变化背景下的中国植被物候研究,梳理了植被物候对气候变化的响应机制,分析了中国植被物候变化对陆地生态系统碳、水和能量循环的影响,植被物候变化对局地气候的反馈机制以及通过大气环流对气候系统的影响。主要结论:1)中国植被生长季开始日期提前 $1\sim 6\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,结束日期推迟 $2\sim 5\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ,生长季显著延长;2)中国中高纬度地区植被对温度的响应明显高于亚热带和热带地区,温度在控制植被物候的过程中起到多重作用,降水主要影响干旱和半干旱地区的植被物候;3)植被生长季延长增加陆地生态系统生产力,增加中国碳汇;4)植被物候变化改变植被的蒸散发量,从而改变我国的流域尺度河流径流;5)在中国大部分地区,植被物候变化对气候系统产生负反馈作用,甚至影响大气环流过程。中国植被物候的研究越来越多,但仍存在亟待解决的科学问题,比如未来中国植被物候研究需要更加关注遥感数据反演精度,明确物候响应气候变化机制的尺度效应,结合机器学习等智能算法改进物候模型提高物候模拟精度,并重视农作物物候,加强物候与森林管理结合研究以提高我国生态系统碳汇能力,积极面对碳中和带来的机遇与挑战。

**关键词** 植被物候;气候变化;生态系统;响应机制;反馈机制

**中图分类号** Q142.2

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022170

## 0 引言

气候变化深刻影响陆地生态系统结构和功能,适应气候变化需要更加深入理解气候变化对陆地生态系统的影响机制。物候是气候变化最敏感的生物学指标。植被物候对气候变化的响应与反馈直接或间接影响陆地生态系统的碳源-汇转换、生态系统水平衡等一系列生物地球化学和生物地球物理过程<sup>[1]</sup>。以全球气候变化为背景,本文综述了中国植被物候的发展进程,探讨了植被物候对气候变化的响应机制,梳理了植被物候变化对陆地碳汇与气候系统的反馈机制,浅析了气候变化背景下中国植被物候研究亟待关注和解决的关键科学问题,并展望气候变化背景下中国植被物候如何通过影响陆地生态系统碳源-汇过程以达到服务碳中和这一目标。

传统意义上的物候主要服务于古代农业生产活动,指示农耕农收的各个阶段。现代意义上的物候学是研究自然界的植物(包括农作物)、动物和环境条件(气候、水文、土壤条件)的周期变化之间相互关

系的科学<sup>[2]</sup>。随着气候变化问题受关注程度持续增加,以及卫星遥感和计算机模型等技术快速发展,物候学研究也从单一描述现象的传统研究发展为大尺度植被物候研究,关注植被物候对气候变化的响应机制,以及物候变化对陆地生态系统和气候系统的反馈作用。20世纪50年代以来,特别是1990年之后,物候学研究发展迅速,年发文数量呈指数式增加,目前涉及物候相关的研究学科和方向达50个以上,主要涉及环境生态学、植物科学、大气科学、农业科学、林业、生物多样性保护等。因此,物候学已成功发展为一门多学科交叉、跨多个领域的交叉前沿科学(图1)。

中国近代物候学研究始于竺可桢先生<sup>[2]</sup>,并于20世纪60年代建立了中国第一个物候观测网(CPON, <http://www.cpon.ac.cn/>)。传统物候观测方法以地面观测为主,中国物候观测网是一个多学科、跨行业、跨地域的科技基础条件平台,为后续中国物候观测的完善与发展提供了珍贵的第一手资料。2002年建成的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX, <http://chinaflux.org/>)是全球通量网络(FLUXNET, <https://>

\* 国家杰出青年科学基金资助项目(42025101)

† 通信作者:付永硕(1979—),男,教授,博士生导师。研究方向:全球变化生态学、植被物候学和生态水文学。E-mail: yfu@bnu.edu.cn  
收稿日期:2022-04-11

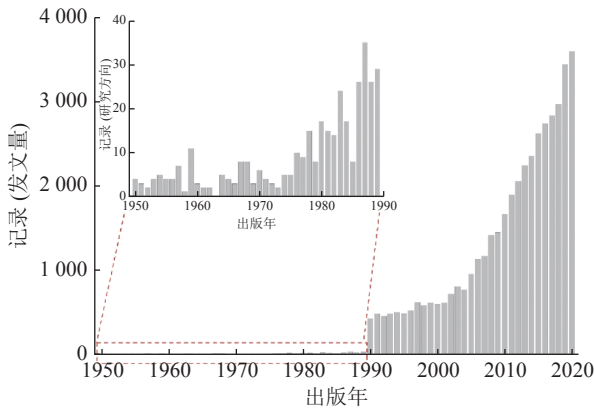


图 1 1950—2020 年物候相关研究的发文章量与研究方向 (来自 Web of Science)

fluxnet.org/) 的重要组成部分之一, 主要用于植被光合物候、碳吸收物候研究以及大尺度遥感地表物候验证。除了地面观测, 卫星遥感和近地面遥感已成为大

尺度物候学研究的重要手段。无人机小区域遥感航拍由于可获取高清晰度的影像, 目前应用于小区域冠层物候研究以及大尺度物候验证。自动拍照、高频实时连续、网络传输的物候相机, 为近地面植被群落物候监测提供了有效手段, 但物候相机在我国架设站点较少, 也未进行组网建设, 亟待建立中国物候相机观测网络。卫星遥感提供了区域甚至全球尺度时空连续的植被生长变化信息, 为物候研究提供了宏观大尺度的植被监测方案。遥感物候监测方法, 一方面弥补了实地观测站点尺度覆盖有限问题, 极大地推动了植被物候研究的发展; 另一方面引入了地面实测站点与遥感数据混合像元之间的空间尺度效应等问题(图 2)。基于遥感的植被物候提取过程主要分为 2 个步骤: 首先是使用 Savitzky-Golay 滤波法<sup>[3-4]</sup>、不对称高斯滤波法<sup>[5]</sup>、双 Logistic 函数法<sup>[6]</sup>、时间序列谐波分析<sup>[7]</sup>等方法, 重构时间序列归一化差分植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)等植被指数曲线; 然后再使用阈值法<sup>[8-9]</sup>、导数法<sup>[10-11]</sup>、拟合法<sup>[12]</sup>等方法提取关键物候参数。时序数据曲线重构与物候参数提取方法的多个组合使用或者取其平均值, 是目前遥感物候研究较为趋向于使用的方法, 但不同方法之间仍存在一定的差异, 遥感物候数据仍具有较大的不确定性, 无法有效反演植被生理物候期。

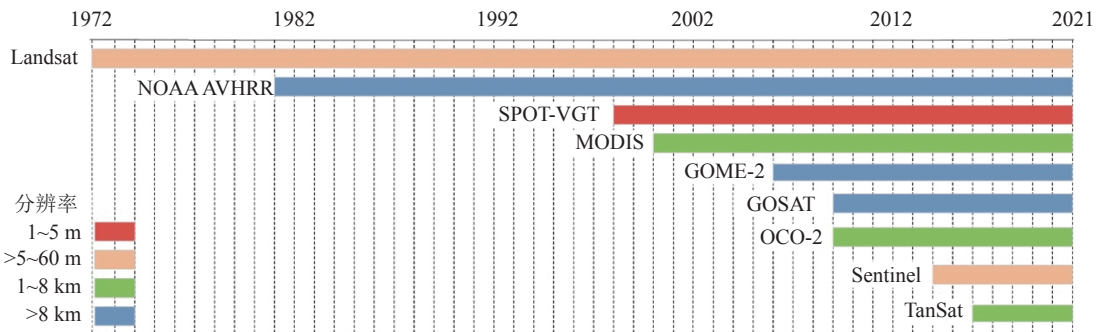


图 2 用于反演植被物候的遥感数据

植被物候的研究方法, 除了实地观测和遥感监测, 还有控制实验和模型模拟, 时间范围从天、季、年扩展至世纪, 空间范围从植株个体、生态群落扩展至景观尺度(图 3)。控制实验、实地观测、遥感监测与模型模拟等 2 个或以上的研究方法耦合是多尺度植被物候研究的常用手段, 各方法的优缺点见表 1。控制实验可以获得基于单株植物的物候响应过程, 但研究物种有限且多用于幼林树种, 而且获得的物候响应气候变化的机制应用到大尺度也需要考虑尺度效应等问题。植被物候模型可归纳为基于统计分析的经验模型或者统计模型, 以及基于物候机制的过程模型<sup>[13]</sup>。

植被物候参数方法的选择, 对物候结果的精度存在不确定性, 但目前物候模型中的重要参数仍缺乏生理意义的表征, 多采用统计方法获得, 因此物候模型结果具有较大的不确定性<sup>[14]</sup>。

全球变化背景下, 植被物候呈现出不同程度的春季物候(又称为返青期, SOS)提前趋势、秋季物候(又称为枯黄期, EOS)推迟趋势, 进而导致植被生长季长度(LOS)延长。植被物候结果并不完全一致, 例如青藏高原高寒草地存在返青期推后、提前、没有明显变化和在波动中提前 4 种观点<sup>[15-18]</sup>。本综述总结中国区域植被物候对气候变化的响应, 并探讨植被物候变化

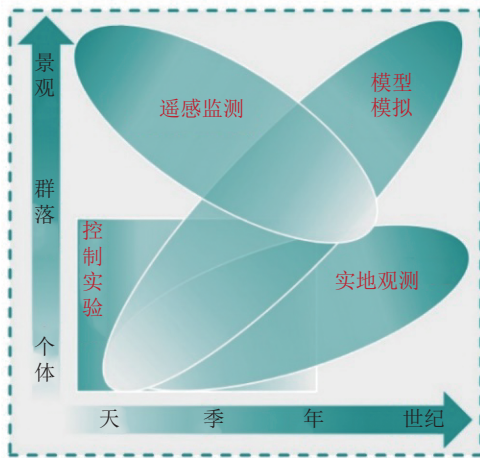


图 3 植被物候研究方法

对生态系统和气候系统的反馈效应。物候变化通过影响大气圈和生物圈之间的生物地球化学过程和生物地球物理过程<sup>[19]</sup>, 改变陆地生态系统碳、营养循环过程与能量交换过程, 进而改变生态系统结构与功能并反馈于局地气候变化, 而大气系统通过环流进行能量和水汽传输, 因此物候变化还会影响大尺度气候系统的变化(图 4)。

## 1 植被物候对气候变化的响应及驱动因子

目前中国植被物候实地观测网络建设主要包括中国物候观测网络, 中国生态系统研究网格, 以及付永硕等基于大学校园建设的校园物候观测网络, 目前这些网络站点的空间分布不均匀, 总体呈现东南部多西北部少的特点, 我国西北部植被物候观测站点有待增加(图 5)。基于 1960—2011 年中国 145 个站点的 112 个物种物候观测研究结果表明: 90.8% 的春/夏季物候期记录显示平均每 10 a 提前了 2.75 d, 69.0% 的秋季物候记录显示平均每 10 a 延迟了 2.00 d, 而且木本植物春/夏季物候期的变化率通常与其中 49 个站点的局部变暖相匹配<sup>[20]</sup>。这一结果与基于遥感监测发现相一致, 即 1982—2011 年期间中国春季物候每 10 a 提前 5.5 d, 秋季物候每 10 a 提前 2.6 d<sup>[1]</sup>。通过地面观测、遥感监测和模型模拟研究中国植被物候, 结果表明在过去 30 年间, 气温每升高 1 °C, 春季物候期提前约 4.93 d<sup>[21]</sup>。即中国区域总体春季物候提前而秋季物候延迟, 植被生长季延长, 但是中国植被物候变化存在较大的空间差异性。

表 1 中国植被物候研究方法优缺点

研究方法	优点	缺点
控制实验	假设验证, 周期短, 易操作	物种少, 缺乏热带物种和生态系统尺度实验, 尺度小
实地观测	直接长期和连续地获取个体或群落物候期	站点少, 覆盖尺度有限, 观测过程存在人为主观性
遥感监测	获取大尺度植被物候时空动态变化	无法准确对应植被生理物候期, 反演过程存在较大不确定性
模型模拟	模拟物候发生机制, 预测未来物候变化	模型参数缺乏生理学意义, 模型参数本地化水平较低, 模型结果不确定性大

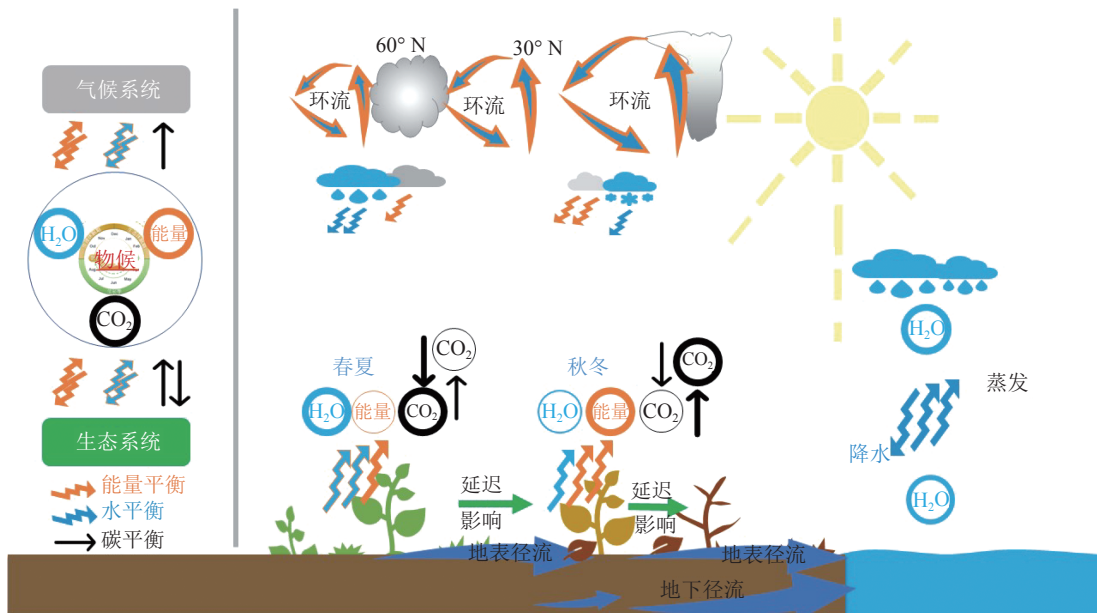


图 4 植被物候对气候变化的响应与反馈效应示意

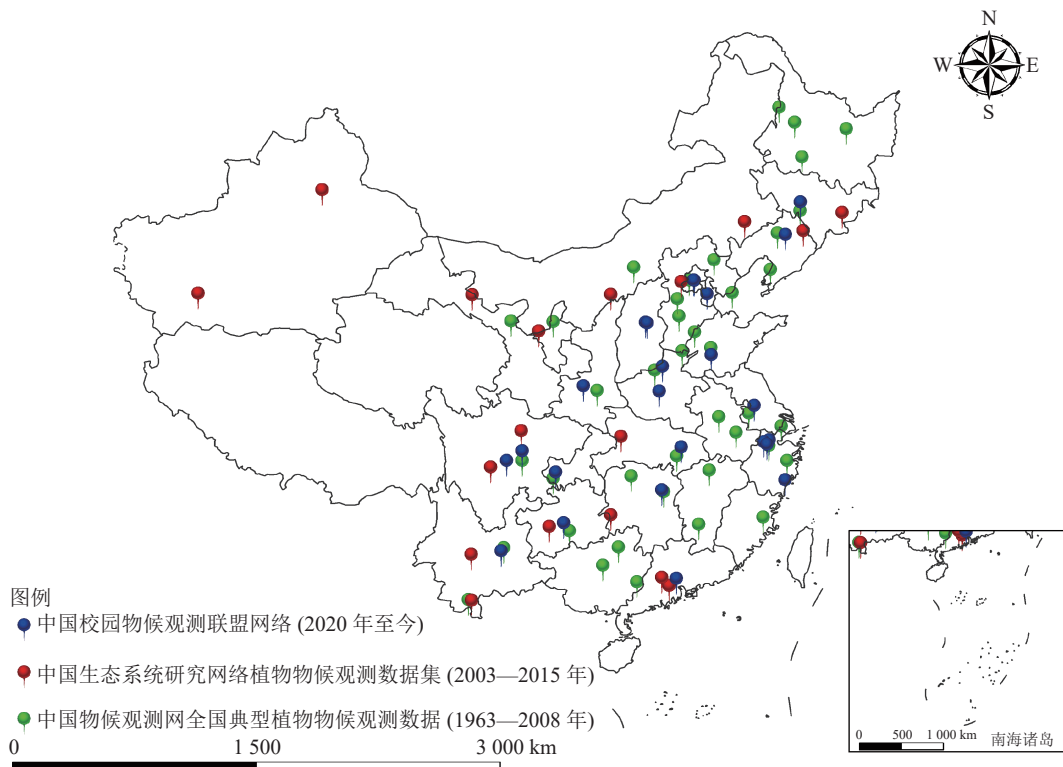


图5 中国植被物候观测数据的站点分布

1982—2015年,中国北方大部分纬度带的植被随着春季升温, SOS提前、EOS延迟,其中东北、华北、青海、新疆的大部分地区植被生长季有明显的延长趋势<sup>[22]</sup>,但是长江中游等地春季降温造成春季物候期推迟<sup>[23]</sup>。1982—2015年中国东北地区 SOS每10 a提前约1.3 d, EOS每10 a延迟约2.5 d,整个时期常绿针叶林和草地的生长季长度延长约21 d<sup>[24]</sup>。春季物候提前量随温度升高有下降趋势,基于城乡 SOS变化分析表明,2009—2016年东北地区城区 SOS年际变化趋势和乡村一致,但变化速率不同,城市植被的变化率较小<sup>[25-26]</sup>。1982—2015年中国温带春季物候与高纬度地区相比, SOS提前量较大而 EOS延迟略小<sup>[27]</sup>。由于存在其他环境因子的影响,气候变暖并不一定导致春季物候提前、秋季物候延迟,研究发现东北地区春季干旱导致草原生态系统 SOS推迟<sup>[28]</sup>,而生长季干旱导致内蒙古干旱草原的 EOS出现了提前趋势<sup>[29]</sup>。中国亚热带和热带地区植被对温度变化的响应明显低于中高纬度<sup>[30]</sup>。然而目前研究集中在中国温带和青藏高原等地区,针对中国亚热带和热带地区的植被物候研究较少<sup>[31-33]</sup>。

植被生长由生物与非生物(温度、降水、太阳辐射等)因素共同驱动,植被对气候变化响应存在时间滞后效应<sup>[34]</sup>,另外驱动因子具有较大的区域差异,在外来物种与本地物种有不同物候的情况下,随着外来

物种数量增加,很可能会改变当地的物候。有研究表明,当地物种到外来物种的转化使春季物候更早、秋季物候更晚,衰老过程中当地物种与外来物种的差异显著大于温度升高引起的差异,而返青过程中差异不显著,这种影响应与全球变暖一起考虑<sup>[35]</sup>。春秋季节物候间的关系也会受到植物对营养的可用性的影响<sup>[36]</sup>。除了资源限制,竞争和遗传基础对植被物候及其变化也存在至关重要的影响<sup>[37-38]</sup>。热带地区的温度和光周期全年变化幅度很小,植被对热量要求高,植物物候变化主要依赖水分(包括土壤水分和大气干旱程度如饱和水汽压差(VPD))和光强等<sup>[33, 39]</sup>。温度和光周期通常是控制温带和寒带地区植被物候变化的重要因素<sup>[40]</sup>。日最高温是春季物候最主要的决定因子<sup>[41]</sup>,但光周期通过调控积温需求调控春季物候期<sup>[42-43]</sup>。日最低气温强烈控制中国亚热带植被秋季物候,季前最低气温升高显著推迟常绿林、灌木与草地的 EOS<sup>[44]</sup>。物候对光周期和温度的响应存在物种差异,对于生长季开始较早的物种,冬季一旦达到对低温的需求,则对温度升高的响应非常敏感。而对于生长季开始较晚的物种,光周期则起到主要控制作用,温度只是起到一个限制性调节作用。温度在控制植被物候事件的过程中起多重作用<sup>[45-46]</sup>,如高山草甸地区植被返青与冬季、春季降水表现负相关,而当温度升高时植被返青时间提前<sup>[47]</sup>。1999—2013年树木春季展叶物候对

春季温度的敏感性较 1980—1994 年间下降了 40%，植被春季物候表现出对气候变暖的适应性<sup>[48]</sup>。而且秋季叶片衰老的温度响应明显大于春季叶片脱落<sup>[49]</sup>。降水主要影响干旱和半干旱地区的植被物候<sup>[50]</sup>。但是最新研究发现春季物候对气候变化的响应也可能随气候变化而改变，1982—1998 年降水主导中国温带半干旱草原的 SOS 变化，1999—2015 年期间随着降水增加，干旱草原 SOS 变化由温度控制<sup>[51]</sup>。降水与较冷地区的 EOS 表现为负相关，这可能归因于土壤水分限制受永久冻土影响的地区植物生长的营养可用性<sup>[52]</sup>。在高纬度地区，太阳辐射增加可以延缓植物脱落酸的积累，并减缓叶片衰老速度<sup>[53]</sup>，进而增强植被光合能力和 CO<sub>2</sub> 封存率，提高叶绿素对光合有效辐射的吸收比率<sup>[54]</sup>，从而促进 EOS 推迟。除了温度，降水和光周期等环境因子的作用，极端气候事件也影响植被物候变化。研究发现，极端干旱年（2011 年）与极端湿润年（2016 年）之间植被物候发生了突变<sup>[55]</sup>，但极端气候如何影响植被物候期的相关研究不多，需要开展更多的研究，特别是开展更多实验研究以理解极端气候变化对物候影响的生理过程。

## 2 植被物候变化对生态系统的影响

气候变暖导致植被物候变化、延长植被生长季长度，直接影响陆地生态系统生物量<sup>[56]</sup>，进而影响生态系统结构和功能，比如改变生态系统碳循环过程<sup>[57]</sup>，影响水循环过程<sup>[58]</sup>、生态系统碳水平衡<sup>[59]</sup>，氮、磷等养分的矿化与吸收速率<sup>[60]</sup>等。植被生长季是植被冠层的光合作用活跃期，生长季的延长显著增加了陆地生态系统碳汇能力。1984—2017 年长期野外观测数据表明，中国北方草原的最大地上净初级生产力对 SOS 比 EOS 更敏感<sup>[61]</sup>。2001—2019 年东北地区森林 NPP 以平均  $3.95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  趋势增加<sup>[62]</sup>。青藏高原秋季物候每延迟 1 d 使 GPP 增加  $0.5 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $P < 0.01$ )<sup>[63]</sup>。春季物候期延长，植被光合作用增加量比呼吸作用多，植被可以固定更多的碳，从而提高陆地碳汇；但是如果夏季干旱胁迫增加，会导致生产力下降；秋季升温，物候期延长，促使呼吸作用增加，可能消耗部分植被固定的 CO<sub>2</sub>，最终导致生态系统固碳能力下降<sup>[64]</sup>。目前，植被物候与碳循环研究侧重于关键物候信息与碳循环之间的定量关系研究，其影响机制仍存在一定的争论，植被物候究竟如何影响碳循环过程，还需要进行更加深入的研究。

植被物候变化也显著影响陆地生态系统水循环过程。植被冠层截留降水可以影响地表下垫面层与大气之间的水分交换，减小地表径流、增加向土壤中

的渗透，进而改变地表水文过程，还存在明显的蓄水作用，一定程度上减少土壤侵蚀、水土流失以及减轻旱、涝灾害。随着植被生长季的延长与生长阶段叶面积的增加，蒸腾作用增强意味着向大气中输送更多水蒸气<sup>[65]</sup>。植被物候在调节陆地生态系统水分能量平衡方面发挥着重要作用<sup>[66]</sup>。例如秋季物候强烈影响青藏高原草地生态系统水分利用效率（WUE，GPP 与 ET 之比），秋季物候每延迟 1 d 使平均蒸散量（ET）增加  $2.7 \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $P < 0.01$ )，而不是增加 WUE<sup>[63]</sup>。1982—2015 年滦河流域河流径流呈现减少趋势，主要与由 SOS 提前导致的生长季延长有关<sup>[67]</sup>。我国典型亚热带森林生态系统 SOS 提前导致 GPP 增加高于 ET 增加，春季 WUE 年均值增加 ( $0.0024 \pm 0.0038$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )，但不确定性较大。EOS 延迟导致 GPP 增加同时 ET 减少或稳定，秋季 WUE 增加 ( $0.0066 \pm 0.004$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )<sup>[68]</sup>。Hwang 等<sup>[69]</sup>首次将植被物候引入流域水文模型，发现 LOS 在探究气候变化下的水文系统变化中发挥重要作用。但是，也有研究表明，物候变化高估了 ET 的增长<sup>[70]</sup>，因此，植被物候如何影响流域尺度水循环仍未形成统一观点，需要更多研究，尤其是耦合物候过程到水文模型，以深入理解物候变化对流域水循环过程的影响。

植被物候变化的种间差异会影响生态系统结构和功能的稳定。物候时间反映了生态系统中物种的生存策略，物候的时间生态位分化是生物多样性维持的重要决定性因素<sup>[71-72]</sup>。气候变化下的物种之间的物候关系也会发生改变，研究发现，在 1984—2016 年快速变暖时期与 1951—1983 年略微变暖时期之间，早展叶物种 ( $6.7 \pm 0.3$ ) d 的展叶期提前显著大于晚展叶物种 ( $5.9 \pm 0.2$ ) d，气候增暖增加了种间物候差异<sup>[73]</sup>。青藏高原物候差异的空间变化可能会改变 2 种草本植物物种之间的种间相互作用<sup>[74]</sup>。物种间物候时间的改变，可能导致物种间竞争关系加剧，影响生态系统稳定和功能。不同种类植物物候对气候变化的响应差异，也会对植物间和动植物间的竞争与依赖关系产生影响<sup>[75]</sup>，比如春季升温导致玉米物候与玉米螟物候匹配度发生改变<sup>[76]</sup>。有研究表明，气候变暖和物候变化加速了入侵植物的生命周期，气候变暖预计使入侵物种的年种群增长率增加 15.0%<sup>[77]</sup>。中国东北地区的整体植被物候不对称性特征呈现显著的年际变异趋势，存在一个约 10 a 的周期<sup>[78]</sup>。青藏高原高山植物群落的种间差异的增加产生了复杂的气候响应，可能改变植物群落，甚至影响区域气候-植被反馈<sup>[79]</sup>。了解种间物候差异的机制有助于促进物种共存、提高物种多样性<sup>[80]</sup>。

### 3 植物物候变化对气候系统的反馈

气候变化引起植物物候变化,反过来物候变化也调控植被对气候系统的反馈<sup>[57, 81]</sup>。植物物候通过改变陆地生态系统和大气之间的CO<sub>2</sub>、水蒸气和可挥发性有机质(VOC)等浓度变化,从而对局地气候产生影响。例如植物的生长季延长,增加生物圈的CO<sub>2</sub>吸收,从而降低当前大气CO<sub>2</sub>浓度上升及其对温室效应的影响<sup>[19]</sup>。植物物候变化也会改变地表下垫层状况(如地表反照率、粗糙度、温度、土壤湿度以及叶面积等),从而改变太阳辐射以及热量平衡,改变局地地表吸收辐射与蒸腾或者蒸散发水分的能力,例如改变大气温度、湿度、风向、风速等,对局地和区域气候产生显著反馈作用<sup>[82]</sup>。植被变绿通过增强蒸腾作用导致土壤水分和地表径流减少,还可扰动大气环流,引起降水格局变化,从而起到弥补(下风向)或加剧(上风向)蒸腾作用增强导致的水分散失作用<sup>[57]</sup>。青藏高原是近几十年来全球升温最显著的区域之一,其植被变化对近地表气温产生“负反馈”作用<sup>[83]</sup>。植物物候变化过程改变下垫面的潜热和显热通量,进而改变陆地和大气之间的耦合效率甚至大气边界层,对气候变化产生耦合影响。由于植被覆盖变化,植被的反射和辐射会改变热量平衡,植被冠层也会抬升作用面,改变下垫面的粗糙度,进而改变对垂直热对流和水平热交换产生的影响,改变局部环流过程。例如中国黄河流域的年际降水与植被生长变化在调控季节性ET变化中起主导作用,而温度具有边际效应<sup>[84]</sup>。植物物候变化可以增加陆地植被与大气之间的水、热交换,甚至对大气环流变化也存在一定程度的影响(即中远程效应)。春季返青期提前增加植被蒸散发,从而增加大气中的水汽含量,如欧亚大陆冠层ET的平均潜热增加 $0.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,增加的水汽通过大西洋和太平洋水汽通道向北极输送,水汽的正反馈具有增温效应,也会改变高纬度的降雪与云量分布,显著影响高纬度气候<sup>[65]</sup>。变暖引起的植物物候变化可能通过控制地表水和热通量的季节性模式改变地表气候的季节性<sup>[1]</sup>。

### 4 中国植物物候研究展望

中国植物物候研究取得了快速发展,但全球气候变化背景下的物候研究存在一些关键科学问题亟需解决。

1)中国植物物候多源监测体系初步建立,地面观测结合近地面遥感与卫星遥感的方法已经被广泛采用,但遥感物候数据仍具有较大的不确定性,主要原因是多源数据融合过程中的混合效应和尺度效应仍未得到解决,需要进行更多深入研究。遥感物候和地

面观测数据生理期对照实验或可成为遥感物候数据生理指标表征不准确问题的解决方案。

2)物候模型模拟不准确是限制陆地碳汇能力估算的最重要因子之一,结合机器学习等智能算法的物候模型,可以提供较为准确的结果,但因为缺乏对机制过程的理解,基于机器学习物候模型的可靠性还需要进一步验证。机器学习结合植物生理实验,尤其是基于分子生物学方法明确物候过程的重要参数阈值,是提高物候模型准确性的重要方向,需要更加重视。

3)中国陆地森林生态系统碳汇是实现碳中和目标的重要一环,植被春季物候提前提升春季植被生产力,但也会导致夏季水分胁迫增强以及极端事件增加,进而影响陆地碳汇能力。植物物候变化如何影响植被季节生产力变化以及其空间分异规律等仍不清楚,因此植物物候的延迟效应如何影响陆地碳汇能力需要进一步研究。另外,在强调“固碳增汇”的可持续森林管理过程中,植物物候如何发挥作用,是否可以考虑根据物候差异合理选择物种组合,构建物种多样性丰富的森林生态系统以提高生态系统碳汇能力,需要进行深入研究。

4)中国物候学研究集中在森林和草地生态系统,农作物物候研究相对较少。物候是农业产量的决定性因素之一,作为作物生长发育关键因素,其变化可能影响光合作用产物的分配,进而影响农作物产量<sup>[85]</sup>。因此,需对农作物如何响应气候变化、物候积温需求的时空变化,以及物候变化如何影响农作物产量等进行深入研究。

5)物候的生态效应研究目前集中在碳循环过程。研究发现,物候变化尤其是秋季物候变化,影响凋落物分解,进而会影响陆地生态系统的氮、磷等循环过程,最终影响陆地生态系统的碳汇能力。植物物候变化如何影响生态系统营养循环过程仍不清楚,物候变化影响生态系统水循环过程,进而影响营养物质输移过程,目前相关研究较为缺乏。

6)极端气候事件通过不同的过程影响陆地生态系统碳循环<sup>[86]</sup>,极端事件发生前后物候变化如何调节植被与极端气候的关系也需要更加深入系统的研究。

目前,物候学作为最直接的科学被人们广泛接受,伴随着大数据、人工智能、云计算和5G等新技术的快速发展,公众科学背景下物候学研究迎来了新的机遇。借助大数据、人工智能等新兴技术,结合自然教学等手段,广泛开展公众参与的植物物候研究,将自然教育与科学研究相融合,既可以提供丰富的科研基础数据,又可以开展气候变化科普教育等活动,增强公众环境意识。同时,物候研究还体现在提供花卉

欣赏期预报、园林绿化景观构建等休闲娱乐效用<sup>[87]</sup>。随着城市化进程加快与城市热岛效应加剧,城市物候研究不仅需要关注城郊物候之间的差异与变化,也需要研究展叶和花期等物候变化带来的花粉期变化,并关注由此引发的哮喘、花粉过敏等城市人群公众健康问题。除此之外,物候研究还能够辅助制定农业区划、预防病虫害、估算草原生态承载力以及维护生物多样性等。因此,从长远来看,未来植被物候研究涉及的应用领域势必会更加广泛,物候响应与反馈机制将更加明确,以此更好地调控生态系统与气候系统,进而在实现碳中和进程中有效发挥遏制气候变化的作用。

## 5 参考文献

- [1] PIAO S L, LIU Q, CHEN A P, et al. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922
- [2] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学[M]. 北京: 科学出版社, 1984
- [3] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627
- [4] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 332
- [5] JÖNSSON P, EKLUNDH L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824
- [6] BECK P S A, ATZBERGER C, HÖGDA K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 321
- [7] ROERINK G J, MENENTI M, VERHOEF W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911
- [8] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698
- [9] FISCHER A. A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 220
- [10] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672
- [11] MOULIN S, KERGOAT L, VIOVY N, et al. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(6): 1154
- [12] BADHWAR G D. Automatic corn-soybean classification using Landsat MSS data: I. Near-harvest crop proportion estimation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 14(1/2/3): 15
- [13] 付永硕, 李昕熹, 周轩成, 等. 全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(9): 1206
- [14] RICHARDSON A D, ANDERSON R S, ARAIN M A, et al. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American Carbon Program Site Synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 566
- [15] CHEN X Q, HU B, YU R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate Eastern China[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1118
- [16] SHEN M G, ZHANG G X, CONG N, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190: 71
- [17] WANG X H, PIAO S L, XU X T, et al. Has the advancing onset of spring vegetation green-up slowed down or changed abruptly over the last three decades?[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(6): 621
- [18] ZHAO J J, WANG Y Y, ZHANG Z X, et al. The variations of land surface phenology in Northeast China and its responses to climate change from 1982 to 2013[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 400
- [19] PEÑUELAS J, RUTISHAUSER T, FILELLA I. Phenology feedbacks on climate change[J]. *Science*, 2009, 324(5929): 887
- [20] GE Q S, WANG H J, RUTISHAUSER T, et al. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265
- [21] MA T, ZHOU C H. Climate-associated changes in spring plant phenology in China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(2): 269
- [22] 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 504
- [23] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响[J]. *科学通报*, 2002, 47(20): 1582
- [24] YU L X, LIU T X, BU K, et al. Monitoring the long term vegetation phenology change in Northeast China from 1982 to 2015[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14770
- [25] 侯学会, 牛铮, 高帅. 近十年中国东北森林植被物候遥感监测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 515

- [26] 胡召玲, 戴慧, 侯飞, 等. 中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4137
- [27] ZHOU X C, GENG X J, YIN G D, et al. Legacy effect of spring phenology on vegetation growth in temperate China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 281: 107845
- [28] YUAN M X, ZHAO L, LIN A W, et al. Impacts of pre-season drought on vegetation spring phenology across the Northeast China Transect[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 140297
- [29] LIU Q, FU Y H, ZENG Z Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 644
- [30] DU Y J, MAO L F, QUEENBOROUGH S A, et al. Macro-scale variation and environmental predictors of flowering and fruiting phenology in the Chinese angiosperm flora[J]. Journal of Biogeography, 2020, 47(11): 2303
- [31] 陈效述, 亓孝然, 阿杉, 等. 我国东部北亚热带植物群落季相的时空变化[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3559
- [32] DU J Q, FANG S F, SHENG Z L, et al. Variations in vegetation dynamics and its cause in national key ecological function zones in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(24): 30145
- [33] LI X X, FU Y H, CHEN S Z, et al. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 304/305: 108427
- [34] WU D H, ZHAO X, LIANG S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520
- [35] WILSEY B J, MARTIN L M, KAUL A D. Phenology differences between native and novel exotic-dominated grasslands rival the effects of climate change[J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(2): 863
- [36] FU Y H, PIAO S L, DELPIERRE N, et al. Nutrient availability alters the correlation between spring leaf-out and autumn leaf senescence dates[J]. Tree Physiology, 2019, 39(8): 1277
- [37] BLACKFORD C, GERMAIN R M, GILBERT B. Species differences in phenology shape coexistence[J]. The American Naturalist, 2020, 195(6): E168
- [38] SATAKE A, NAGAHAMA A, SASAKI E. A cross-scale approach to unravel the molecular basis of plant phenology in temperate and tropical climates[J]. New Phytologist, 2022, 233(6): 2340
- [39] CHEN X Z, CIAIS P, MAIGNAN F, et al. Vapor pressure deficit and sunlight explain seasonality of leaf phenology and photosynthesis across Amazonian evergreen broadleaved forest[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2021, 35(6): e2020GB006893
- [40] KRAMER K, LEINONEN I, LOUSTAU D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview[J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 67
- [41] PIAO S L, TAN J G, CHEN A P, et al. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature[J]. Nature Communications, 2015(6): 6911
- [42] KÖRNER C, BASLER D. Phenology under global warming[J]. Science, 2010, 327(5972): 1461
- [43] FU Y H, PIAO S L, ZHOU X C, et al. Short photoperiod reduces the temperature sensitivity of leaf-out in saplings of *Fagus sylvatica* but not in horse chestnut[J]. Global Change Biology, 2019, 25(5): 1696
- [44] REN P X, LIU Z L, ZHOU X L, et al. Strong controls of daily minimum temperature on the autumn photosynthetic phenology of subtropical vegetation in China[J]. Forest Ecosystems, 2021, 8(1): 31
- [45] 代奎, 曾秀, 王鑫洋, 等. 春季增温对亚热带木本植物物候和生长的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3881
- [46] SHEN X J, LIU B H, HENDERSON M, et al. Asymmetric effects of daytime and nighttime warming on spring phenology in the temperate grasslands of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 240
- [47] GANJURJAV H, GAO Q Z, SCHWARTZ M W, et al. Complex responses of spring vegetation growth to climate in a moisture-limited alpine meadow[J]. Scientific Reports, 2016(6): 23356
- [48] FU Y H, ZHAO H F, PIAO S L, et al. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding[J]. Nature, 2015, 526(7571): 104
- [49] FU Y H, PIAO S L, DELPIERRE N, et al. Larger temperature response of autumn leaf senescence than spring leaf-out phenology[J]. Global Change Biology, 2018, 24(5): 2159
- [50] ZHANG X Y, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D12): D12103
- [51] FU Y H, ZHOU X C, LI X X, et al. Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(2): 490
- [52] BONAN G B, SHUGART H H. Environmental factors and ecological processes in boreal forests[J]. Annual Review of

- Ecology and Systematics, 1989, 20: 1
- [53] GEPSTEIN S, THIMANN K V. Changes in the abscisic acid content of oat leaves during senescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1980, 77(4): 2050
- [54] KIM J H, MOON Y R, WI S G, et al. Differential radiation sensitivities of *Arabidopsis* plants at various developmental stages[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008: 1491-1495
- [55] JAVED T, LI Y, FENG K, et al. Monitoring responses of vegetation phenology and productivity to extreme climatic conditions using remote sensing across different sub-regions of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(3): 3644
- [56] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122
- [57] PIAO S L, WANG X H, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews: Earth & Environment, 2020, 1(1): 14
- [58] JEONG S J, HO C H, KIM K Y, et al. Reduction of spring warming over East Asia associated with vegetation feedback[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(18): L18705
- [59] JEONG S J, MEDVIGY D, SHEVLIAKOVA E, et al. Uncertainties in terrestrial carbon budgets related to spring phenology[J/OL]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117[2022-04-10]. <https://doi.org/10.1029/2011JG001868>
- [60] BARR A, BLACK T A, MCCAUGHEY H. Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in western Canada[M]. New York: Springer, 2009: 3-34
- [61] XU L L, ZHANG X Z, WANG Y L, et al. Drivers of phenology shifts and their effect on productivity in northern grassland of China during 1984-2017: evidence from long-term observational data[J]. International Journal of Biometeorology, 2021, 65(4): 527
- [62] WANG C L, JIANG Q N, DENG X Z, et al. Spatio-temporal evolution, future trend and phenology regularity of net primary productivity of forests in Northeast China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3670
- [63] CHENG M, JIN J X, JIANG H. Strong impacts of autumn phenology on grassland ecosystem water use efficiency on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107682
- [64] PIAO S L, CIAIS P, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming[J]. Nature, 2008, 451(7174): 49
- [65] XU X Y, RILEY W J, KOVEN C D, et al. Earlier leaf-out warms air in the north[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(4): 370
- [66] JIN J X, WANG Y, ZHANG Z, et al. Phenology plays an important role in the regulation of terrestrial ecosystem water-use efficiency in the Northern Hemisphere[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 664
- [67] GENG X J, ZHOU X C, YIN G D, et al. Extended growing season reduced river runoff in Luanhe River basin[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124538
- [68] GUO F S, JIN J X, YONG B, et al. Responses of water use efficiency to phenology in typical subtropical forest ecosystems: a case study in Zhejiang Province[J]. Science China: Earth Sciences, 2020, 63(1): 145
- [69] HWANG T, MARTIN K L, VOSE J M, et al. Nonstationary hydrologic behavior in forested watersheds is mediated by climate-induced changes in growing season length and subsequent vegetation growth[J]. Water Resources Research, 2018, 54(8): 5359
- [70] KIM J H, HWANG T, YANG Y, et al. Warming-induced earlier greenup leads to reduced stream discharge in a temperate mixed forest catchment[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(6): 1960
- [71] HILLERISLAMBERS J, ADLER P B, HARPOLE W S, et al. Rethinking community assembly through the lens of coexistence theory[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2012, 43: 227
- [72] USINOWICZ J, CHANG-YANG C H, CHEN Y Y, et al. Temporal coexistence mechanisms contribute to the latitudinal gradient in forest diversity[J]. Nature, 2017, 550(7674): 105
- [73] GENG X J, FU Y H, HAO F H, et al. Climate warming increases spring phenological differences among temperate trees[J]. Global Change Biology, 2020, 26(10): 5979
- [74] ZHU W Q, ZHENG Z T, JIANG N, et al. A comparative analysis of the spatio-temporal variation in the phenologies of two herbaceous species and associated climatic driving factors on the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 177
- [75] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 923
- [76] 王姝心, 郭亚会, 付永硕, 等. 夏玉米和亚洲玉米螟物候同步性研究[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(4): 462
- [77] KELLER J A, SHEA K. Warming and shifting phenology accelerate an invasive plant life cycle[J]. Ecology, 2021, 102(1): e03219
- [78] 周玉科. 基于遥感的中国东北植被物候不对称特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 345
- [79] AN S, CHEN X Q, SHEN M G, et al. Increasing

- interspecific difference of alpine herb phenology on the Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 844971
- [80] LIU Y Z, LI G Y, WU X W, et al. Linkage between species traits and plant phenology in an alpine meadow[J]. *Oecologia*, 2021, 195(2): 409
- [81] RICHARDSON A D, KEENAN T F, MIGLIAVACCA M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156
- [82] PIELKE R A, AVISSAR R, RAUPACH M, et al. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 461
- [83] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842
- [84] PEI T T, WU X C, LI X Y, et al. Seasonal divergence in the sensitivity of evapotranspiration to climate and vegetation growth in the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(1): 103
- [85] GUO Y H, ZENG J, WU W X, et al. Spatial and temporal changes in vegetation in the Ruoergai region, China[J]. *Forests*, 2021, 12(1): 76
- [86] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1321
- [87] 戴君虎, 高新月, 刘浩龙, 等. 物候学在旅游地理理论与实践中的应用基础和前景[J]. *中国生态旅游*, 2021, 11(2): 161

## Vegetation phenology response to climate change in China

FU Yongshuo<sup>1,2)</sup> ZHANG Jing<sup>1)</sup> WU Zhaofei<sup>1)</sup> CHEN Shouzhi<sup>1)</sup>

(1) College of Water Sciences, Green Development Institute, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) University of Antwerp, Belgium, B-2016, Antwerp, Belgium)

**Abstract** This article reviews response mechanisms of vegetation phenology to climate change, clarifies impacts of vegetation phenological changes on carbon, water, and energy cycles of terrestrial ecosystems, and feedback mechanisms of vegetation phenological changes on local climate and the climate system through atmospheric circulations. The start of the vegetation growing season in China was found to have an advanced trend (about  $1-6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ), the end of the growing season has a delayed trend (about  $2-5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ), growing season significantly extended. Responses of vegetation phenology to temperature in mid-high latitudes are now significantly higher than in subtropical and tropical regions. Temperatures were found to play multiple roles in controlling vegetation phenology. Precipitation was found to mainly affect vegetation phenology in arid and semi-arid regions. Vegetation phenological changes (growing season prolonged, photosynthesis of vegetation greater than respiration, thereby fixing more carbon) were found to increase productivity of terrestrial ecosystems and increase China's carbon sink. Vegetation phenological changes could adjust vegetation evapotranspiration, thereby changing China's watershed-scale river runoff. Vegetation phenological changes have a negative feedback effect on climate system in most parts of China, and affect atmospheric circulation process. Therefore, temporal and spatial characteristics and trends of vegetation phenology provide reference for reducing emissions and increasing carbon in different regions of China. Although works on vegetation phenology in China have been done, certain uncertainties remain to be resolved. Future works should pay more attention to inversion accuracy of remote sensing data, clarify scale effect of phenological response to climate change, combine machine learning, manipulative experiments and ecophysiological methods to improve accuracy of phenology simulation. Also we should focus on crop phenology to ensure food insecurity, strengthen researches on combination of phenology and forest management to improve carbon sink capacity of ecosystem. We must face opportunities and challenges brought about by carbon neutrality.

**Keywords** vegetation phenology; climate change; ecosystem; response mechanism; feedback mechanism

【责任编辑: 武佳】