

春季物候对森林蒸腾的直接与间接效应

Direct and indirect effects of spring phenology on forest transpiration

作者 (Authors) : Lvlv Wang a,b , Dunxian She a,b , Yuting Yang c,d , Lin Meng e , Jun Xia a,b

作者单位 (Affiliations) : *

a 武汉大学 水资源与水利工程科学国家重点实验室, 中国

b 武汉大学 海绵城市水系统科学湖北省重点实验室, 中国

c 清华大学 水利系、水沙科学国家重点实验室, 北京, 中国

d 水利部 水圈科学重点实验室, 北京, 中国

e 范德堡大学 地球与环境科学系, 纳什维尔, 美国

通讯作者 (Corresponding author) : * shedunxian@whu.edu.cn (D. She)

期刊: Agricultural and Forest Meteorology 372 (2025) 110661

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110661>

收到日期 (Received) : 2024-10-25; 修改后接收 (Accepted) : 2025-05-27

在线发布日期: 2025-05-31

© 2025 Elsevier B.V. 保留所有权利, 包括文本与数据挖掘、AI 训练及类似技术的权利。

ARTICLE INFO (文章信息)

关键词 (Keywords) : Phenology (物候) ; Vegetation transpiration (植被蒸腾) ; SIF; Direct and indirect effects (直接与间接效应) ; Climate change (气候变化) ; Ecohydrology process (生态水文学过程)

摘要 (ABSTRACT)

植被物候是陆地生态系统中的关键影响因素, 但与广泛研究的“植被—碳耦合”相比, 其对水文过程—尤其是季节尺度蒸腾变化—的长期影响仍研究不足。本文基于长期的太阳诱导叶绿素荧光 (SIF) 与卫星反演的植被蒸腾 (TR) 数据集, 评估了1982—2018年间中国范围内生长季起始 (SOS) 与季节峰值 (POS) 阶段物候变化对蒸腾的响应。我们将 SOS 与 POS 期间累计 TR 的增加分解为两个部分: 由春提早直接引起的 TR_{pheno} 以及由植被生产力驱动的 TR_{product}。结果显示, SOS 每提前 1 天可直接使 TR_{pheno} 增加 1.80 ± 0.44 mm, 但会通过间接途径使 TR_{product} 减少 -1.08 ± 0.80 mm。该间接效应是因为更早的 SOS 会提高春季 SIF, 从而加快 TR_{pheno}, 同时加剧土壤水分消耗, 限制随后阶段的 TR_{product}。基于 15 年移动窗口分析, 我们发现春季物候对 TR 的直接与间接效应在过去 37 年中呈增强趋势。此外, 不同植物类型之间的差异表明植物水力性状在调控蒸腾中发挥作用。针叶林的 SIF 增幅较小, 且 SIF 与土壤水分呈正相关, 从而缓解了对 TR_{product} 增长的水分限制 (系数 = 0.11, $p < 0.05$)。我们的研究强调了通过植物蒸腾过程体现的“物候—水文循环”反馈, 并凸显在气候变化情景下的水文预估中纳入“植被—环境相互作用”的重要性。

1. Introduction (引言)

森林是陆地生态系统的基础组成部分, 在碳循环与能量通量中发挥关键作用 (Bonan, 2008; Harris et al., 2021), 同时通过植被蒸腾 (TR) 构成陆面—大气水分交换的重要界面 (Chen et al., 2022; Liu et al.,

2017)。近年来,关于“植被变绿与物候反馈对季节尺度植被—碳耦合”的研究受到更多关注(Marques et al., 2023; Ren et al., 2024; Wang et al., 2019),然而关于物候变化对水文过程及其年际变化影响的认识仍显不足。过去数十年,遥感与地面观测共同记载了北方植被春季物候的普遍提前(Ge et al., 2015; Piao et al., 2019)。同时,生长季起始(SOS)的提前会引发生态系统结构与功能的改变(Piao et al., 2019),进而影响TR的强度及其时空格局。这些变化对生态系统的水文循环具有重要意义,可能改变降水与蒸发之间的平衡(Meier et al., 2021),从而影响土壤水分与地表径流的分布(Buechel et al., 2022; Geng et al., 2020; Tan et al., 2023)。因此,理解物候与TR之间的关系对于认识生态系统内的生态—水文过程至关重要。

春季物候变化与水文过程的相互作用从叶片尺度延伸至区域与全球尺度(Chen et al., 2022)。大量区域与全球研究表明,植被覆盖与绿度的增强会通过显著提升蒸散发而改变景观水分可利用性(Bonan, 2008; Cui et al., 2022)。以往研究揭示,春季物候的变化(如SOS提前)会通过延长生长季与扩大叶面积来增强植被TR(Novick et al., 2016; Yang et al., 2023),但这些研究多评估整个生长季的TR增加(Yang et al., 2023),忽视了“早期物候驱动的需水增加”与“随后土壤水分限制”之间在季节尺度上的关键解耦。新证据显示,更早的物候会先期提升TR,但同时会使浅层土壤水分下降12–25%(Lian et al., 2020; Piao et al., 2019),产生一种自我限制的反馈,从而约束“早生长季(即SOS到季节峰值POS期间)”的植被蒸腾。如果不区分“由物候转变导致的TR增加”与“由光合活动导致的TR增加”,就可能误解季节尺度上的“植被—水文”相互作用。因此,有必要将“由物候提前导致的TR增加”与“由植被生产力驱动的TR增加”加以区分,以理解植被蒸腾在季节尺度上的动态及其背后水文响应机制。

植物性状是调节蒸腾过程应对水分胁迫(由土壤缺水与大气需水增加引起)的另一关键因素(Grossiord et al., 2020; Humphrey et al., 2021; Novick et al., 2016)。不同的植物功能型(PFTs)依赖不同水力学特性(包括木质部结构特征(Choat et al., 2018; Urli et al., 2013)与叶片气孔导度(Grossiord et al., 2020))来适应该地水文气候条件,并在多变的环境中优化用水策略(Eller et al., 2020; Manzoni et al., 2011)。例如,根系更深且水分获取更充足的物种,即使在水分胁迫下也倾向维持更高的蒸腾率;而根系较浅或气孔导度较低的物种则可能通过降低蒸腾来保水(Zhang et al., 2001)。来自野外观测与模型模拟的证据表明,不同PFT在蒸腾对水分亏缺的响应上存在差异(Giardina et al., 2023; Li et al., 2021)。然而,在“春季物候提前”的背景下,PFT在“蒸腾需水—土壤水分消耗”平衡上的调节作用仍不清楚。理解这些关系对于精确模拟生态系统水通量并预测其对环境变化的响应至关重要。

基于植被蒸腾与环境要素之间的生态生理耦合,我们提出假设:春季物候通过“双路径”影响TR:(1)直接途径——更早的SOS延长TR时段;(2)间接途径——土壤水分耗竭限制随后生长季的水分可利用性。借助卫星遥感的进展(包括长期重建的植被指数与高分辨率的植被蒸腾数据集),我们研究了1982–2018年间中国森林植被物候的变化及其水文联系。本文目标为:(1)量化更早春季物候导致的植被蒸腾增加幅度;(2)分解春季物候对TR的直接(时段延长)与间接(土壤水分介导)敏感性;(3)评估森林功能型(PFTs)如何调节“生产力—蒸腾”耦合。为此,我们建立了一个新的框架,将累计蒸腾(TR_c)划分为两部分:由更早SOS驱动的TR_{pheno},以及与植被生产力相关的TR_{product}。该分解使我们能够同时检验春季物候对TR变化的直接与间接效应。此外,不同物种间这些效应的差异有助于理解植物水力策略如何影响“植被—用水”的关系。本研究为理解由“植被动态—水分可利用性”相互作用驱动的生态水文学过程中的物候反馈提供了新的见解。

2. Materials and methods (材料与方法)

2.1. Datasets (数据集)

2.1.1. Undisturbed forests (未扰动森林)

我们采用MODIS年度土地利用/覆盖(MCD12Q1.006),按照国际地圈—生物圈计划(IGBP)定义,在中国范围(73°33'E ~ 135°05'E, 3°51'N ~ 53°33'N)圈定未发生土地覆盖变化的森林生态系统(图1)。受数据时段(2001–2022)的限制,我们使用2001年的景观图作为基期、2015年的景观图作为后期。中国的水文与气象特征存在显著梯度:东南部暖湿、西北部寒旱。考虑到区域内森林类型的多样性,我们选择五类在研究期内未

发生土地覆盖变化的森林进行分析：常绿针叶林（ENF）、常绿阔叶林（EBF）、落叶针叶林（DNF）、落叶阔叶林（DBF）与混交林（MF）（图1）。土地覆盖图由500 m 分辨率重采样至 0.1°，以与其他数据集匹配。基于多年平均气温、降水与湿润程度，中国被划分为七个区域：暖温带半湿润（WTSH）、中纬度干旱（MLA）、北亚热带湿润（NSTH）、中纬度半湿润（MLSH）、中纬度半干旱（MLSA）、高原温带半干旱（PTSA）、边缘热带湿润（MTH）（Yao et al., 2018）。实际分析中仅有五个气候带有可用网格：MLSH、WTSH、PTSA、NSTH 与 MTH。

2.1.2. Vegetation indices (植被指数)

卫星观测的太阳诱导叶绿素荧光（SIF）在检测植被光合活动方面发挥重要作用，相较其他植被指数具有更高的灵敏度与准确性（Kooistra et al., 2024; Verrelst et al., 2016）。长期 SIF 广泛被用作总初级生产力（GPP）的代理，并与植被蒸腾动态密切相关（Butterfield et al., 2023; Yang et al., 2024; Zhang et al., 2024）。本研究使用 1982—2018 年双月分辨率、空间连续的长期 SIF 数据，该数据通过对 AVHRR 与 MODIS 可用波段应用机器学习算法重建而成（Lian et al., 2022）。原始空间分辨率为 0.05°，我们聚合至 0.1° 网格。为减小稀疏森林与裸地引起的偏差，剔除年均 SIF < 0.05 $\text{m}^2 \text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 的网格。我们定义 3—5 月为春季、6—8 月为夏季，计算春季 SIF（SIFspr）与夏季 SIF（SIFsum）的季节平均，以表征季节尺度的植被生产力。

图1. 2001—2015 年间中国范围内未变化森林类型的空间分布（MODIS LULC）。森林类型包括 ENF、EBF、DNF、DBF 与 MF。七个气候区缩写为：WTSH、MLA、NSTH、MLSH、MLSA、PTSA、MTH。

2.1.3. Vegetation transpiration (植被蒸腾)

Global Evaporation Amsterdam Model（GLEAM v3.8a）通过整合卫星反演的植被光学厚度与根区土壤水分来估算陆地蒸散及其组分（Martens et al., 2017）。该数据具有长期性，并与超过一千个通量观测点进行过验证，已广泛用于生态—水文关系研究（Li et al., 2022; Lian et al., 2020）。在中国月尺度上，GLEAM 与通量塔观测的平均相关系数达 $r = 0.86$ （Yang et al., 2017），且在 ET 估算上优于其他遥感产品（Shi et al., 2024; Yu et al., 2023; Zuo et al., 2025）。基于这些验证，我们使用 1982—2018 年的日尺度蒸腾（ mm d^{-1} ），并将其由 0.25° 重采样至 0.1° 与其他数据一致。

为进一步验证 GLEAM 蒸腾数据，我们采用了中国 1981—2015 年 0.05° 分辨率的“蒸腾/蒸散比（T/ET）”数据集（Niu et al., 2020）。该数据通过模型—数据同化得到，融合了 PT-JPL 模型、GLASS 与 GLOBMAP 的 LAI，以及中国生态系统研究网络（CERN）的气象数据。我们将其重采样至 0.1° 并与 GLEAM（1982—2015 重叠期）对比。结果显示两套数据的蒸腾估算在空间格局上一致（图 S1），皮尔逊相关 $R = 0.88$ （ $p < 0.001$ ）。此外，研究区 77% 的网格在时间变化上保持一致（Preseason 系数 $p < 0.05$ ）。

2.1.4. Soil moisture (土壤水分)

地表土壤水分（0—10 cm，SMsurf， $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ）与根区土壤水分（10—250 cm，SMroot， $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ）的日值同样来自 GLEAM 数据集，并已在全球 2325 个站点与实测对比验证（Martens et al., 2017）。GLEAM 融合了 L 波段植被光学厚度（VOD），包含植被生长对土壤水分的信号，使我们能够计算物候通过土壤水分对 TR 的潜在约束效应。

2.1.5. Meteorological data (气象数据)

气象变量来自中国气象强迫数据集（CMFD），以其高空间（0.1°）与高时间（日尺度）分辨率而著称，覆盖 1982—2018 年。变量包括近地面气温（ T_a ，°C）、向下短波辐射（ R_s ， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）与降水率（ $\text{mm} \cdot \text{hour}^{-1}$ ）（Kun et al., 2019）。其中日降水量 P （mm）由“降水率 $\times 24 \text{ h}$ ”计算而得。我们将 R_s （代表太阳能输入）视为影响植被蒸腾的主导驱动（Tu and Yang, 2022; Yang and Roderick, 2019）。

2.2. Data process (数据处理)

2.2.1. Phenology indicators (物候指标)

我们利用 R 包 “phenofit” (Kong et al., 2022) 在长期连续 SIF 上提取 SOS。首先剔除数据质量较低的像元 (年均 SIF < 0.05)。随后采用改进的 Whittaker 滤波并结合 Savitzky-Golay 方法对原始时间序列进行平滑。之后使用对数函数形式的双物流模型拟合平滑后的序列:

$$VI(t) = \begin{cases} \frac{VI_{max} - VI_{min}}{1 + e^{-a_1(t-SOS)}} + VI_{min}, & t \leq t_0 \\ \frac{VI_{max} - VI_{min}}{1 + e^{a_2(t-EOS)}} + VI_{min}, & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $VI(t)$ 为第 t 个日序 (DOY) 的平滑植被指数, VI_{min} 与 VI_{max} 为年内最小与最大值; t_0 为绿度由增转降的转折点。SOS 为生长季起始日期, EOS 为生长季结束日期。参数 a_1 表示春季返青速率, a_2 表示衰老速率。我们将 SOS 定义为 $VI(t)$ 上升速率最大的日期, EOS 定义为下降速率最大的日期。为确保春季范围内识别, 物候指标被限定在 0—第 150 天 (DOY) 内。季节峰值 (POS) 定义为年内 $VI(t)$ 达到最大值的日期。进一步地, 我们将 “早生长季” 定义为 SOS 至 POS 的时段, 并计算该时段长度 LSP。

2.2.2. Cumulative transpiration and hydrometeorological variables (累计蒸腾与水文气象变量)

为研究 TR 对春季物候的敏感性, 我们利用 GLEAM 日数据计算 “由更早 SOS 引起的累计 TR” (记为 TRc)。具体而言, 在每个网格内, 我们计算 1982—2018 年间每年的 “从 SOS 到 POS 的累计 TR (mm)” 以及 LSP; 同时计算 LSP 期间的 SMsurf 与 SMroot 的平均, 以及 Ta、Rs、P 的平均。

在 “早生长季 (SOS—POS)” 内, 植被 TR 的增加既可能来源于 “更早的生理活动启动 (由 SOS 提前导致)”, 也可能来源于 “更致密的冠层带来的生产力提升”。因此, 我们将 TRc 的变化策略性地分解为两个部分: **TRpheno** (物候增量) 与 **TRproduct** (生产力增强) (图2)。第一步: 计算 1982—2018 年年际 TR 时间序列的多年平均, 以及多年平均的 SOS (SOSav) 和 POS (POSav), 作为基线。第二步: 基于多年平均的 TR 时间序列, 在 SOSav 与 POSav 之间计算 TRc 的多年平均 (TRc_av)。类似地, 每年采用当年的实际 TR 时间序列 (在当年的 SOS 与 POS 之间) 计算该年的 TRc。于是, 早生长季内 TRc 的年际变化可分解为: $TRc = TRc_{av} + TRpheno + TRproduct$ 。第三步: 由 SOS 变动引起的 TR 增量 (TRpheno) 可通过 “按 SOS' (当年值) 与 SOSav (多年均值) 差异计算的累计 TR 差” 获得。进而, 用 TRc 减去 TRc_av 与 TRpheno, 得到 TRproduct, 表征 “早生长季内由生产力增强引起的累计 TR 变化”。

我们重点关注 “春季物候变化期间 TR 及其组分的变化幅度”, 并在每个网格上使用一元线性回归, 估计 TRc、TRpheno、TRproduct 相对于年际 SOS 异常 (ΔSOS) 的变化率。注意: 若 $\Delta SOS > 0$, 则 TRpheno 记为正值; 反之亦然。全部数据处理在 Matlab 2022a 平台完成。

图2. 累计 TR 的计算与 TRpheno / TRproduct 的分离示意。a: 多年平均的 TR 时间序列与物候指标基线; TRc_av 为在 SOSav—POSav 之间 (橙色阴影) 的日 TR 总和。b: TRc_av、TRpheno 与 TRproduct 随 SOS' (当年) 变化的关系。橙色曲线为 1982—2018 年 “日 TR 多年平均”, 黑色曲线为某年的 “实际日 TR”。当年 TRc 由 TRc_av、TRpheno、TRproduct 组成; TRpheno 为 SOS' 与 SOSav 之间 (蓝色阴影) 的日 TR 之和; TRproduct 为两条曲线在 SOS'—POS' 之间 (绿色阴影) 的差值。

2.3. Attribution analysis (归因分析)

我们采用两类模型评估 “更早春季物候引起的 TRc 增量” 的敏感性。首先, 在整个 37 年期间计算 TRc 对各变量的敏感性, 以识别总体效应; 随后采用 15 年移动窗口考察敏感性的时间演变。

第一种方法为 **偏相关分析**, 量化 “早生长季内蒸腾变化 (TR)” 对 “时段长度 (LSP)”、季节植被生长以及气候因子 (Ta、Rs、P) 的响应。为削弱量纲影响, 解释变量与响应变量均进行 Z 分数标准化。模型形式为:

$$f(\text{TR}) \sim \beta_1 x_{\text{LSP}} + \beta_2 x_{\text{SM}} + \beta_3 x_{\text{Ta}} + \beta_6 x_{\text{P}} + \beta_7 x_{\text{Rs}} + \beta_4 x_{\text{SIF}_{\text{spr}}} + \beta_5 x_{\text{SIF}_{\text{sum}}} \quad (3)$$

其中 β_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 为各自敏感系数; x_{LSP} 为当年 SOS—POS 的天数, x_{SM} 为 LSP 期间 SMroot 或 SMsurf 的平均, x_{Ta} 、 x_{Rs} 、 x_{P} 为对应变量在 LSP 的平均; $x_{\text{SIF}_{\text{spr}}}$ 与 $x_{\text{SIF}_{\text{sum}}}$ 分别为春、夏季 SIF 的季节平均。系数在 $p < 0.05$ 时认为显著。我们还使用 Theil–Sen 斜率与 Mann–Kendall 检验 (Kendall, 1975; Mann and Econometrica, 1945) 对 15 年移动窗口的敏感性趋势 (R trend) 进行评估 (显著性 $p < 0.05$)。在偏相关分析中, $|R| > 0.1$ 的变量视为主要影响因子。

显然, TRpheno 的增加主要由 SOS 提前主导, 而“春季物候提前与 TRproduct 的负相关”仍需进一步探究。为深入研究“春季物候对 TRproduct 的直接/间接影响”, 我们在结构方程模型 (SEM) 中引入“土壤水分”作为关键中介 (图7)。春季 (3—5月) 与夏季 (6—8月) 更高的 SIF 表征生产力增强: 一方面在时间上与“早生长季”重叠, 直接贡献于 TRproduct; 另一方面会影响土壤水分可利用性, 进而间接调节蒸腾过程。因此, 在 SEM 中我们令春、夏季 SIF 对 TRproduct 具有**直接效应**, 同时通过其对土壤水分的影响对 TRproduct 施加**间接效应**。此外, 依据偏相关结果, 我们在 SEM 中加入对 TRproduct 具有显著影响的两个主导因子: LSP 与 Ta。SEM 的标准化路径系数给出变量间“假设因果关系”的方向与大小 ($p < 0.05$ 为显著)。为避免多重共线性, 在网格尺度拟合前计算所有自变量的方差膨胀因子 (VIF), 剔除 $VIF > 10$ 的变量 (Khuri, 2013)。考虑分解过程可能对蒸腾组分带来的影响, 我们亦重复对 TRc 的偏相关与 SEM 分析, 以检验“TRc 增量对物候、土壤水分 (SMroot/SMsurf)、Ta、Rs、P 的响应”。

3. Results (结果)

3.1. Spatiotemporal changes in forest phenology and transpiration (森林物候与蒸腾的时空变化)

在中国森林中, 植被物候与蒸腾沿南—北梯度呈现清晰的空间趋势 (图3、图 S2—S3)。多年平均 SOS 随纬度升高由 84 DOY 推迟至 146 DOY (图3a), 而多年平均 POS 则由 207 DOY 提前至 158 DOY (图3b)。因此, SOS—POS 的时段长度 LSP 自南向北由 86 d 降至 33 d (图3c)。与之对应, LSP 期间的多年平均累计 TR (TRc) 亦由 235.7 mm 降至 74.5 mm (图3d)。这些趋势在跨越南北的五个气候带 (MTH、NSTH、PTSA、WTSH、MLSH) 中一致可见 (图3a—b)。此外, 沿海拔梯度也观察到显著变动: 与北方相比, 南方高海拔地区随着海拔升高, SOS 提前、POS 推迟、LSP 延长 ($p < 0.05$, 图 S3a—c)。

时间上, 1982—2018 年中国森林 SOS 呈不显著提前 (每十年提前 0.6 d, 图 S2)。其中 16.9% 的像元显示显著提前 (每十年 2.5 d, $p < 0.05$, 图 S2h&k), 主要集中于 WTSH 与 NTSH (图 S2a&e)。POS 在大多数区域不显著推迟 (每十年 0.7 d, $p = 0.22$, 图 S2f&i), 但在 6.9% 的像元中显著推迟 (每十年 7.6 d, $p < 0.05$), 主要位于 PTSA (图 S2b、f&l)。LSP 在 1982—2018 年期间略增 (每十年 1.5 d, 图 S2j)。统计显示, 1982—2018 年中国森林“早生长季”TRc 年际平均以 $0.44 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率上升 ($p < 0.05$, 图3e), 其中 9.4% 的网格斜率达显著 ($p < 0.05$)。将前五年 (1982—1986) 与后五年 (2014—2018) 对比, 可见后期植被活动显著增强, 且全年蒸腾量更大 (Student t 检验 $p < 0.05$) (图3f)。春季 SIFspr 的显著上升亦印证了早生长季生产力增强。与此同时, 根区土壤水分在整个区域呈下降趋势, 率为 $-0.0006 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$, 图 S4a&d); 28.9% 的像元在多年均值上显著下降 (主要位于 MLSH 与 WTSH, 图 S4g&j)。地表土壤水分也呈相似下降 ($-0.0006 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$, $p < 0.05$; 37.2% 像元显著下降, 图 S4b&e)。在“生长季延长”与“土壤水分下降”的相互作用下, 其对 TRc 的作用方式值得深入探讨。

图3. 1982—2018 年中国森林植被物候与蒸腾的时空变化。a: 多年平均 SOS 的空间分布; 右侧为随纬度的变化; 内嵌箱线图五个气候带 (MLSH、WTSH、PTSA、NSTH、MTH) 的差异。b: 多年平均 POS 的空间分布。c: 多年平均 LSP 的空间分布。d: LSP 内多年平均累计 TR (TRc) 空间分布。e: LSP 与 TRc 的年序列 (黑点为各年全域平均, 误差棒为 1 个标准差)。f: 半月尺度 TR 与 SIF 在前后两个五年期的差异 (点为五年平均, 阴影为 90% 置信区间)。

3.2. Increasing TRpheno but decreasing TRproduct with earlier spring phenology (春季物候提前提高 TRpheno 但降低 TRproduct)

以 TRc 对春季物候 (SOS) 的变化率评估, 1982—2018 年森林中, SOS 每提前 1 天与 TRc 增加 0.76 ± 0.97 mm 显著相关 (图4a)。TRpheno 的增加具有纬向依赖性: 自南部 MTH 区约 $+2.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 递减至北部 MLSH 区约 $-0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图4d&h)。我们将“随 SOS 变化的 TR 增加”拆解为两部分: 更早 SOS 引起的 TRpheno 与“更致密冠层导致生产力提高”的 TRproduct。结果显示, TRpheno 为 $1.80 \pm 0.44 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图4b), 而 TRproduct 为 $-1.04 \pm 0.80 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图4c)。TRpheno 在五个气候带中均随 SOS 提前而增加, 且南部 MTH 的增加更显著、北部 MLSH 较弱 (图4e&i)。负的 TRproduct 在南部 (NSTH、MTH) 不那么明显, 而在北部 (MLSH、WTSH) 更强 (图4f&j)。尽管随海拔升高, TR 变化率显著下降 ($p < 0.05$, 图 S3g—i), 但 TRc 与 TRpheno 的趋势仍为正, 而 TRproduct 的变化率沿海拔梯度始终为负。上述结果验证了分解方法的可靠性, 并确认了 TR 对春季物候的稳健响应: SOS 提前可直接提升早生长季蒸腾, 但随后冠层生产力对水通量呈负相关, 部分抵消“更早启动蒸腾过程”带来的 TR 增加。

图4. 春季物候提前使 TRc 与 TRpheno 增加, 但使 TRproduct 降低 (1982—2018)。a—c: TRc、TRpheno、TRproduct 相对 SOS 的变化率直方图 (正值: SOS 提前时 TR 增加; 负值: SOS 提前时 TR 减少)。d—f: 对应变化率的空间分布。h—j: 五个气候带 (MLSH、WTSH、PTSA、NSTH、MTH) 的箱线图。变化率由一元线性回归计算。

3.3. Drivers of TRproduct decrease with spring phenology change (TRproduct 随春季物候变化降低的驱动)

在未变化的森林中 (1982—2018), 更长的 LSP 是 TRproduct 增加的首要因素, 其偏相关系数明显高于土壤水分与气候因子 (图5)。在 NSTH 中部表现尤为突出, TRproduct 对 LSP 的敏感性最高。Ta 的影响次之, 较有利的热力条件 (更高 Ta) 促进 TRproduct 增加 (图5b)。此外, 夏季更高的植被生产力 (SIFsum) 亦通过正相关增强 TRproduct。水分可利用性亦重要: 更高的 SMroot 与 P 均指向 TRproduct 的增加 (图5b)。然而, 春季更高的生产力 (SIFspr) 则抑制 TRproduct 增加, 表明春季更强的生长会在随后生长季阻碍蒸腾过程, 从而部分抵消由 LSP 变长带来的 TRc 增量 (图5d)。在五个气候带中的一致结果支持结论的可信度。引入 SMSurf 后结论仍然稳健 (图 S5)。

进一步地, 采用 15 年移动窗口, SIFspr 与 TRproduct 的负相关随时间增强 ($R \text{ trend} = -0.0080$, $p < 0.05$, 图 6c), 表明近 37 年来“春季生产力越高, LSP 内 TRproduct 的降低越明显”。SMroot—TRproduct 与 SIFsum—TRproduct 的关系呈不显著下降 (分别 $R \text{ trend} = -0.0018$, $p = 0.16$; $R \text{ trend} = -0.0005$, $p = 0.18$, 图6b、6d)。将 TRc 与 LSP、SIFspr、SIFsum、SMroot (或 SMSurf)、Ta、P 的关系重复分析, 结果一致表明 LSP 与 Ta 是“早生长季 TRc 增量”的两个最大因子 (图5c&d)。SIFspr 对 TRc 的正向作用仅为边缘显著 ($R \text{ trend} = 0.0013$, $p < 0.05$, 图6g), 而 SIFsum—TRc 的敏感性显著下降 ($R \text{ trend} = -0.0021$, $p < 0.1$, 图 6h)。

图5. 基于偏相关系数的 TR 对 LSP、SMroot、Ta、P、Rs、SIFspr、SIFsum 的敏感性。a: TRproduct—LSP 的空间分布。b: 全域及五个气候带的箱线图。c: 与 a 同理, 但对象为 TRc—LSP。d: 与 b 同理, 但对象为 TRc 与各因子之间的偏相关。

3.4. Direct and indirect effects of spring phenology on TRproduct change among species (不同物种中春季物候对 TRproduct 的直/间接效应)

通过 SEM, 我们验证了“物候与生产力对 TRproduct 在过去 37 年的直接与间接效应”这一假设 (图7)。就全森林而言, LSP 延长是影响 TRproduct 增加的首要因素 ($R = 0.82$, $p < 0.05$, 图7a), 更高的 Ta 亦促进 TRproduct ($R = 0.16$, $p < 0.05$)。重要的是, 更高的 SIFspr 与 TRproduct 存在直接负相关 ($R = -0.37$, $p < 0.05$), 同时 SIFspr 对 SMroot 为负向作用 ($R = -0.03$, $p < 0.05$); SIFsum 则直接正向影响 TRproduct ($R = 0.39$, $p < 0.05$), 但对 SMroot 为负向作用 ($R = -0.08$, $p < 0.05$)。因此, SMroot 的减少进一步限制了生

产力增强所带来的 TRproduct 增加 (SMroot—TRproduct: $R = -0.07$, $p < 0.05$)。用 SMsurf 重复分析得到一致结论, 且 SIFspr 对 SMsurf 的负面影响更强 (图 S10)。

当将 SEM 应用于 TRc 与相关因子时, 同样观察到“LSP 与 SIFsum 主要对 TRc 增加有正向作用” (图 S11、S12)。与此同时, SIFspr 对 TRc 的直接与间接效应均为负, SIFsum 通过对 SMroot/SMsurf 的负向作用也间接限制 TRc。这些结果共同支持了我们的假设: 更早的春季物候一方面通过更早启动蒸腾而直接增加 TRc, 另一方面通过诱发土壤水分亏缺而在早生长季间接约束 TRc。

分物种看, LSP—TRproduct 的正相关与 SIFspr—TRproduct 的负相关在各 PFT 中均一致, 但“春/夏季 SIF 经由土壤水分作用对 TRproduct 的间接效应”存在显著差异 (图7)。在针叶林 (NF, 含 ENF 与 DNF) 中, SIFspr ($R = 0.11$, $p < 0.05$) 与 SIFsum ($R = 0.22$, $p < 0.05$) 均与 SMroot 呈正相关, 进而间接促进 TRproduct ($R = 0.11$, $p < 0.05$, 图7b)。相反, 在阔叶林 (BF, 含 EBF 与 DBF) 与混交林 (MF) 中, SIFspr 与 SIFsum 对 SMroot 为负、经由 SMroot 对 TRproduct 的效应亦为负 (BF: $R = -0.10$, $p < 0.05$; MF: $R = -0.08$, $p < 0.05$, 图7c&d)。这种差异与 TR 过程中的植物性状有关: 我们发现, NF 的 SIFspr 与 SIFsum 趋势在三类森林中最低 (图8)。在物候提前幅度相近的情况下, BF 与 MF 冠层生产力的更大提升带来更大的土壤水分消耗, 因而相较 NF 更易减缓 TR 速率。

图6. 15 年移动窗口下, TRproduct 或 TRc 对 LSP、SMroot、SIFspr、SIFsum 的敏感性时间变化。y 轴为路径系数 R, x 轴为窗口首年。实心点为全域网格系数的平均, 误差棒为 1/4 个标准差。a—d: 对象为 TRproduct; e—h: 对象为 TRc。

图7. 1982—2018 年基于 SEM 的 TRproduct 对 LSP、SMroot、SIFspr、SIFsum 与气候因子的敏感性 (全森林、针叶林、阔叶林、混交林)。蓝色箭头为负效应, 红色为正效应; 箭头旁数字为系数; 实线为 $p < 0.05$; 线宽表征系数大小; 双箭头为协变量关系, 单箭头为有方向关系。

4. Discussion (讨论)

4.1. Direct and indirect effects of spring phenology on transpiration increment (春季物候对蒸腾增量的直接与间接效应)

物候变化在调节生态系统水文循环中发挥关键作用 (Chen et al., 2023; Helfter et al., 2022; Peñuelas et al., 2009)。我们的研究表明, 更早的生长季起始通过两条彼此竞争的路径影响 TR 累积: 其一, 延长蒸腾时段的**直接增强**; 其二, 土壤水分消耗导致随后季节 TR 受限的**间接抑制**。不同于将“物候效应”与“光合效应”混为一谈的做法, 本文显式地将“春季展叶提前”对季节蒸腾的作用分解为直接与间接两类机制。首先, 我们定量表明全国森林中, SOS 每提前 1 天, TRpheno 增加 1.80 ± 0.44 mm (与 Yang et al., 2023 的发现一致并有所扩展): 更早的生长启动意味着更充分的叶面积发展与逐步升高的冠层导度 (Blanken and Black, 2004)。其次, 我们揭示: 更早的 TR 启动会引发后续 TR 动力学的级联效应, 预期在后期的 TR 放大未必发生, 主要原因在于早生长季更高的用水导致土壤水分耗竭 (Lian et al., 2020)。TRproduct 的降低说明: 更早的 TR 起点并不必然转化为更长时间内的水通量增加, 而是改变了季节内的用水分配。

上述“双路径”阐释了“物候提前如何影响季节蒸腾及其水文约束”。根区水分储量为蒸腾提供必要水源, 这在我们分析中体现为 SMroot—TRproduct 的正相关。南部气候带中 TRproduct 负向趋势较弱, 归因于水分更为充足; 而在 MLSH, 土壤水分更显著下降、TRc 的负趋势更明显。我们的结果确认: 更高的冠层生产力会导致土壤含水量下降 (春/夏季 SIF 与 SMroot/SMsurf 的负相关), 从而**间接约束**蒸腾的增长。在干旱区, 若忽视“物候诱导的土壤水分动态”, 会低估 TR 响应的空间异质性。

4.2. Plant hydraulic traits in mediating transpiration in different species (植物水力性状在不同物种中对蒸腾的调节)

尽管 SIF 对 TRc 的负效应在总体上成立，但由于植物生理性状与地方适应机制的差异 (Anderegg and Venturas, 2020; McDowell et al., 2008; Mrad et al., 2019)，不同森林类型中的“生长—供水耦合”仍需深入解读。我们在针叶林中观察到春/夏季 SIF 与土壤水分的正相关，这很可能源自针叶类群的水力特征：更深的根系使其在干旱时段仍能维持蒸腾；同时针叶林往往具有更高的水分利用效率 (WUE)，在减少水分损失的同时维持光合与蒸腾。此外，针叶类群相对等水势 (isohydric) 的调节策略——在水分受限时更快关闭气孔、维持较小的叶水势波动——有助于减少水分损失并为后续生长季保留足够的土壤水分 (Matheny et al., 2017; McDowell et al., 2008)。SIFspr—SIFsum 的正相关也提示了生长季的“携带效应” (carryover effect) (Lian et al., 2024)。针叶林春/夏季 SIF 趋势较弱，说明其生产力增幅较小，可能与更小的叶面积与更低的气孔密度有关；反观阔叶林，SIFspr 对 SIFsum 的负效应主要来自更大的叶面积导致的水分损失与较浅的根系，使得可持续蒸腾的水源受限；阔叶林的“非等水势 (anisohydric)”策略 (干旱时仍保持气孔开放) 虽然延续了蒸腾，但也提高了水分损失。春季物候提前提高了生产力，加速了 (尤其上层) 土壤水分的消耗；在夏季干旱时段，浅根系难以维持持续取水，从而限制了生长季的蒸腾。这强调了气孔导度、根系深度等水力性状在介导“水分可利用性变化—生态系统生产力”中的作用。

4.3. Mechanism of sensitivity change in vegetation transpiration to phenology (蒸腾对物候敏感性变化的机制)

将 TRc 分解为 TRpheno 与 TRproduct 不仅揭示了 TR 的季节动态 (物候提前伴随 TRc 为正、TRproduct 为负)，也为过去 37 年中“生物与非生物因子对 TR 的敏感性变化”提供了洞见。作为增强“陆—气水交换”的关键过程 (Cui et al., 2022; Grossiord et al., 2020)，TRpheno 的增加主要由 SM 与 SOS 提前共同驱动。然而，TRc 与 TRproduct 对 SIFsum 的敏感性下降提示“夏季生产力—蒸腾耦合”正在减弱，这与“土壤水分的下降趋势 + 春季更高用水”的共同作用有关，从而降低了后期的水分可用性——这也体现在 SIFspr—TRproduct 负相关的增强上。另一方面，TRproduct 对土壤水分敏感性的下降亦可能反映了在 CO₂ 升高背景下的“节水机制” (Ainsworth and Rogers, 2007; Liang et al., 2023)：气孔关闭降低了蒸腾 (Leakey et al., 2009)。年际间蒸腾对环境因子敏感性的迁移凸显了在气候变化条件下，植被生长受到水分限制风险的上升 (Fu et al., 2024; Jiao et al., 2021)。

4.4. Uncertainty and future implications (不确定性与未来启示)

植被蒸腾是受生物因子 (如物候变化) 与非生物因子 (如土壤水分与气候条件) 共同影响的复杂过程。本文揭示了过去四十年间“物候对森林蒸腾过程的影响及其与气候与土壤水分的耦合关系”。GLEAM 的长期日尺度数据使我们能够在未扰动森林中，从日到季节尺度更细致地刻画“TR 对 SOS 的响应” (1982—2018)。尽管 GLEAM 与相似数据产品相比表现可靠 (Shi et al., 2024; Zuo et al., 2025)，遥感数据固有的不确定性仍然存在 (Zeng et al., 2020)。例如，遥感模型算法可能未能充分考虑人类活动的影响，这会扰动“气候变化对物候与蒸腾过程的自然信号”，尤其在人工造林区域 (Feng et al., 2016; Wang et al., 2022)。因此我们在研究中排除了森林覆盖发生变化的区域。上述不确定性提示需要更多外业试验与原位观测，以进一步阐明人工林中“植被—水分耦合机制”。

重要的是，本文关于季节蒸腾变化的发现对森林经营具有启示意义：需要重视“植被与土壤水分的遗留效应 (legacy)”。鉴于春季物候推进仍在持续，其对陆面模式中的水文过程具有重要影响 (Li et al., 2023; Meng et al., 2021; Mo et al., 2024)，模型中有必要在“陆—气水碳耦合” (Gentine et al., 2019) 中同时考虑物候对蒸腾的直接与间接效应。在未来情景下，土壤水分可能进一步减少、夏季干旱增多 (Dai, 2012; Jiao et al., 2021)，植物蒸腾对“更早变绿”的敏感性下降，或将放缓蒸腾增速。春季物候提前对随后 TR 的负遗留效应受“可利用土壤水”与“植物水力性状”双重制约 (Grossiord et al., 2020; Matheny et al., 2017)。若模型仅考虑“春季物候提前 + 生产力提高”的正效应，便可能高估森林水通量。

图8. 1982—2018 年不同 PFT 的 SIFspr 与 SIFsum 趋势。小提琴图中黑线为均值，红线为中位数；三组之间差异显著 (双尾 t 检验 $p < 0.05$)。

5. Conclusion (结论)

本研究不仅量化了“春季物候提前对蒸腾增强的**直接效应**”，也揭示了通过“土壤水分减少”体现的**间接限制效应**。该“双重影响”凸显了“植物—水分相互作用”的复杂性：更早的春季物候显著提高了植被蒸腾，但随后的土壤水分耗竭限制了早期生长阶段的进一步蒸腾。通过 15 年移动窗口分析，我们观察到“植被蒸腾对由 SOS 提前导致的春季生产力信号”的敏感性下降，提示“变绿—蒸腾”之间出现解耦。不同 PFT 的差异凸显“植物生理性状—水分可利用性”的交互作用。本研究强调：理解通过蒸腾所体现的“物候—环境要素在季节内的相互作用”，对于改进陆地生态系统“年内与年际”生态水文变化的预估至关重要。

Data availability statement (数据可得性声明)

MCD12Q1.006 (土地利用/覆盖) : <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
GLEAM v3.8a (蒸腾与土壤水分) : <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/MERZN>
中国 T/ET 比值时空连续数据集 : <https://www.nature.com/articles/s41597-020-00693-x>
中国气象强迫数据集 (CMFD) : <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y>
长期全球空间连续 SIF 产品 : <https://doi.org/10.5281/zenodo.7916851> 与 <https://doi.org/10.5281/zenodo.7916879>
GIMMS NDVI3g : <https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/>

CRedit authorship contribution statement (作者贡献声明)

Lvlu Wang: 初稿撰写; 方法; 形式化分析; 数据整理; 构思
Dunxian She: 指导; 资源; 项目管理; 经费获取
Yuting Yang: 审稿与修改; 验证; 调查
Lin Meng: 审稿与修改; 可视化; 方法; 形式化分析
Jun Xia: 指导; 资源

Declaration of competing interest (利益冲突声明)

所有作者均无相关利益冲突披露。

Acknowledgements (致谢)

本研究得到国家自然科学基金 (52179023、41890823) 与湖北省自然科学基金 (2023AFA081、2023BCA003) 资助。

Supplementary materials (补充材料)

本文的补充材料可在线获取: [doi:10.1016/j.agrformet.2025.110661](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110661)。

References (参考文献; 以下每条先保留英文原文, 下一行附中文译文)

Ainsworth, E.A., Rogers, A., 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant Cell Environ.* 30 (3), 258–270.

- [中文] Ainsworth, E.A., Rogers, A. 2007. 光合作用与气孔导度对大气 CO₂ 升高的响应: 机制与环境互作。《植物细胞与环境》30(3): 258–270。
- Anderegg, W.R.L., Venturas, M.D., 2020. Plant hydraulics play a critical role in Earth system fluxes. *New Phytologist* 226 (6), 1535–1538.
- [中文] Anderegg, W.R.L., Venturas, M.D. 2020. 植物水力学在地球系统通量中起关键作用。《新植物学家》226(6): 1535–1538。
- Blanken, P.D., Black, T.A., 2004. The canopy conductance of a boreal aspen forest, Prince Albert National Park, Canada. *Hydrol. Process.* 18 (9), 1561–1578.
- [中文] Blanken, P.D., Black, T.A. 2004. 加拿大阿尔伯特王子国家公园北方杨树林的林冠导度。《水文过程》18(9): 1561–1578。
- Bonan, G.B., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320 (5882), 1444–1449.
- [中文] Bonan, G.B. 2008. 森林与气候变化: 强迫、反馈及森林的气候效益。《科学》320(5882): 1444–1449。
- Buechel, M., Slater, L., Dadson, S., 2022. Hydrological impact of widespread afforestation in Great Britain using a large ensemble of modelled scenarios. *Commun. Earth. Environ.* 3 (1). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00334-0>.
- [中文] Buechel, M., Slater, L., Dadson, S. 2022. 大量情景模拟集合评估英国广泛造林的水文影响。《地球与环境通讯》3(1)。
- Butterfield, Z., et al., 2023. Accounting for changes in radiation improves the ability of SIF to track water stress-induced losses in summer GPP in a temperate deciduous forest. *J. Geophys. Res.* 128 (7).
- [中文] Butterfield, Z. 等, 2023. 考虑辐射变化可提升 SIF 追踪温带落叶林夏季水分胁迫导致 GPP 损失的能力。《地球物理研究杂志》128(7)。
- Chen, S., et al., 2022. Vegetation phenology and its ecohydrological implications from individual to global scales. *Geography. Sustainabil.* 3 (4), 334–338.
- [中文] Chen, S. 等, 2022. 植被物候及其从个体到全球尺度的生态水文学意义。《地理与可持续性》3(4): 334–338。
- Chen, Z., Wang, W., Cescatti, A., Forzieri, G., 2023. Climate-driven vegetation greening further reduces water availability in drylands. *Glob. Chang. Biol.* 29 (6), 1628–1647.
- [中文] Chen, Z., Wang, W., Cescatti, A., Forzieri, G. 2023. 气候驱动的植被变绿进一步降低干旱区的水分可用性。《全球变化生物学》29(6): 1628–1647。
- Choat, B., et al., 2018. Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558 (7711), 531–539.
- [中文] Choat, B. 等, 2018. 干旱下树木死亡的触发因素。《自然》558(7711): 531–539。
- Cui, J., et al., 2022. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport. *Nat. Geosci.* 15 (12), 982–988.
- [中文] Cui, J. 等, 2022. 植被驱动的大气水汽输送变化提升了全球水分可用性。《自然—地球科学》15(12): 982–988。
- Dai, A., 2012. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat. Clim. Chang.* 3 (1), 52–58.
- [中文] Dai, A. 2012. 观测与模型中的全球变暖致干旱增强。《自然—气候变化》3(1): 52–58。

Eller, C.B., et al., 2020. Stomatal optimization based on xylem hydraulics (SOX) improves land surface model simulation of vegetation responses to climate. *New. Phytol.* 226 (6), 1622–1637.

[中文] Eller, C.B. 等, 2020. 基于木质部水力学的气孔优化 (SOX) 改进了陆面模式对植被气候响应的模拟。《新植物学家》226(6): 1622–1637。

Feng, X., et al., 2016. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat. Clim. Chang.* 6 (11), 1019–1022.

[中文] Feng, X. 等, 2016. 中国黄土高原的再植被化正在逼近可持续水资源极限。《自然—气候变化》6(11): 1019–1022。

Fu, Z., et al., 2024. Global critical soil moisture thresholds of plant water stress. *Nat. Commun.* 15 (1).

[中文] Fu, Z. 等, 2024. 植物水分胁迫的全球关键土壤含水量阈值。《自然通讯》15(1)。

Ge, Q.S., Wang, H.J., Rutishauser, T., Dai, J.H., 2015. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* 21 (1), 265–274.

[中文] 葛全胜、王会军、Rutishauser T.、戴君虎, 2015. 中国物候对气候变化的响应：一项元分析。《全球变化生物学》21(1): 265–274。

Geng, X., et al., 2020. Extended growing season reduced river runoff in Luanhe River basin. *J Hydrol* 582.

[中文] 耿秀丽 等, 2020. 生长季延长降低了滦河流域河川径流。《水文学报 (J. Hydrol) 》582。

Gentine, P., et al., 2019. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles—a review. *Environ. Res. Lett.* 14 (8).

[中文] Gentine, P. 等, 2019. 陆地碳循环与水循环的耦合：综述。《环境研究快报》14(8)。

Giardina, F., Gentine, P., Konings, A.G., Seneviratne, S.I., Stocker, B.D., 2023. Diagnosing evapotranspiration responses to water deficit across biomes using deep learning. *New. Phytol.* 240 (3), 968–983.

[中文] Giardina, F. 等, 2023. 用深度学习诊断跨生物群落的蒸散对水分亏缺的响应。《新植物学家》240(3): 968–983。

Grossiord, C., et al., 2020. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New. Phytol.* 226 (6), 1550–1566.

[中文] Grossiord, C. 等, 2020. 植物对大气饱和差 (VPD) 上升的响应。《新植物学家》226(6): 1550–1566。

Harris, N.L., et al., 2021. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* 11 (3), 234–240.

[中文] Harris, N.L. 等, 2021. 21 世纪森林碳通量全球地图。《自然—气候变化》11(3): 234–240。

Helfter, C., et al., 2022. Phenology is the dominant control of methane emissions in a tropical non-forested wetland. *Nat. Commun.* 13, 133.

[中文] Helfter, C. 等, 2022. 物候是热带非森林湿地甲烷排放的主导控制因子。《自然通讯》13:133。

Humphrey, V., et al., 2021. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability. *Nature* 592 (7852), 65–69.

[中文] Humphrey, V. 等, 2021. 土壤水分—大气反馈主导了陆地碳汇的年际变率。《自然》592(7852): 65–69。

Jiao, W., et al., 2021. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades. *Nat. Commun.* 12 (3777). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9>.

[中文] Jiao, W. 等, 2021. 近三十年来对植被生长的水分限制增强的观测证据。《自然通讯》12:3777。

Jung, M., et al., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467 (7318), 951–954.

[中文] Jung, M. 等, 2010. 由于水分供给受限, 全球陆地蒸散趋势近期出现下降。《自然》467(7318): 951–954。

Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin, Oxford, England.

[中文] Kendall, M.G. 1975. 秩相关方法。Griffin 出版社, 英国牛津。

Khuri, A., 2013. *Introduction to Linear regression analysis*, 5th ed. by D.C. Montgomery, E.A. Peck, G.G. Vining. *International Statistical Review*, 81.

[中文] Khuri, A. 2013. 线性回归分析导论 (第5版, Montgomery 等著) 之书评。《国际统计评论》81。

Kong, D., et al., 2022. phenofit: an R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing. *Methods Ecol. Evol.* <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13870>.

[中文] Kong, D. 等, 2022. phenofit: 从遥感时间序列提取植被物候的 R 包。《生态与进化方法》。

Kooistra, L., et al., 2024. Reviews and syntheses: remotely sensed optical time series for monitoring vegetation productivity. *Biogeosciences*. 21 (2), 473–511.

[中文] Kooistra, L. 等, 2024. 评述: 用于监测植被生产力的遥感光学时间序列。《生物地球科学》21(2): 473–511。

Kun, Y., et al., 2019. China meteorological forcing dataset (1979–2018). A Big Earth Data Platform for Three Poles.

[中文] Kun, Y. 等, 2019. 中国气象强迫数据集 (1979–2018) 。《三极大数据平台》。

Leakey, A.D., et al., 2009. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* 60 (10), 2859–2876.

[中文] Leakey, A.D. 等, 2009. CO₂ 升高对植物碳、氮与水分关系的影响: FACE 实验的六点经验。《实验植物学杂志》60(10): 2859–2876。

Li, L., et al., 2021. Representation of plant hydraulics in the Noah-MP land surface model: model development and multiscale evaluation. *J. Adv. Model. Earth. Syst.* 13, e2020MS002214.

[中文] Li, L. 等, 2021. Noah-MP 陆面模式中的植物水力学表示: 模型发展与多尺度评估。《地球系统先进建模杂志》13: e2020MS002214。

Li, W., et al., 2022. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nat. Commun.* 13 (1), 3959.

[中文] Li, W. 等, 2022. 植被对土壤水分的敏感性在全球范围内上升。《自然通讯》13(1): 3959。

Li, X., et al., 2023. Diverging Northern Hemisphere trends in meteorological versus ecological indicators of spring onset in CMIP6. *Geophys. Res. Lett.* 50 (8).

[中文] Li, X. 等, 2023. CMIP6 中北半球“气象学 vs 生态学”春季起始指标的分化趋势。《地球物理研究快报》50(8)。

Lian, X., Fang, J., Jeong, S., Ryu, Y., Gentine, P., 2022. Reconstruction of a long-term global spatially contiguous solar-induced fluorescence (LCSIF) data over 1982–2021.

[中文] Lian, X. 等, 2022. 1982–2021 年全球空间连续 SIF (LCSIF) 长期数据的重建。

Lian, X., et al., 2024. Diminishing carryover benefits of earlier spring vegetation growth. *Nat. Ecol. Evol.* 8 (2), 218–228.

[中文] Lian, X. 等, 2024. 更早春季生长的携带效益在减弱。《自然—生态与进化》8(2): 218–228。

Lian, X., et al., 2020. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Sci. Adv.* 6 (1), eaax0255.

[中文] Lian, X. 等, 2020. 北方植被春季变绿提前加剧了夏季土壤干燥。《科学进展》6(1): eaax0255。

Liang, X., et al., 2023. Stomatal responses of terrestrial plants to global change. *Nat. Commun.* 14 (1), 2188.

[中文] Liang, X. 等, 2023. 陆生植物对全球变化的气孔响应。《自然通讯》14(1): 2188。

Liu, Y., et al., 2017. Increasing atmospheric humidity and CO₂ concentration alleviate forest mortality risk. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114 (37), 9918–9923.

[中文] Liu, Y. 等, 2017. 大气湿度与 CO₂ 浓度升高可缓解森林死亡风险。《美国国家科学院院刊》114(37): 9918–9923。

Mann, H.B., *Econometrica*, 1945. Nonparametric tests against trend. 13: 245–259.

[中文] Mann, H.B. 1945. 趋势的非参数检验。《计量经济学》13: 245–259。

Manzoni, S., et al., 2011. Optimizing stomatal conductance for maximum carbon gain under water stress: a meta-analysis across plant functional types and climates. *Funct. Ecol.* 25 (3), 456–467.

[中文] Manzoni, S. 等, 2011. 在水分胁迫下为最大碳收益优化气孔导度：跨 PFT 与气候的元分析。《功能生态学》25(3): 456–467。

Marques, L., et al., 2023. Acclimation of phenology relieves leaf longevity constraints in deciduous forests. *Nat. Ecol. Evol.* 7 (2), 198–204.

[中文] Marques, L. 等, 2023. 物候驯化缓解了落叶林中叶片寿命的限制。《自然—生态与进化》7(2): 198–204。

Martens, B., et al., 2017. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geosci. Model. Dev.* 10 (5), 1903–1925.

[中文] Martens, B. 等, 2017. GLEAM v3: 基于卫星的陆地蒸发与根区土壤水分产品。《地球科学模型发展》10(5): 1903–1925。

Matheny, A.M., Mirfenderesgi, G., Bohrer, G., 2017. Trait-based representation of hydrological functional properties of plants in weather and ecosystem models. *Plant Divers.* 39 (1), 1–12.

[中文] Matheny, A.M. 等, 2017. 基于性状的植物水文功能特性在天气与生态系统模型中的表示。《植物多样性》39(1): 1–12。

McDowell, N., et al., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New. Phytol.* 178 (4), 719–739.

[中文] McDowell, N. 等, 2008. 植物在干旱中的生存与死亡机制：为何有的生存、有的死亡？《新植物学家》178(4): 719–739。

Meier, R., et al., 2021. Empirical estimate of forestation-induced precipitation changes in Europe. *Nat. Geosci.* 14 (7), 473–478.

[中文] Meier, R. 等, 2021. 欧洲造林引起的降水变化的经验估计。《自然—地球科学》14(7): 473–478。

Meng, L., et al., 2021. Evaluation and modification of ELM seasonal deciduous phenology against observations in a southern boreal peatland forest. *Agric. For. Meteorol.* 308–309.

[中文] Meng, L. 等, 2021. 南方北方泥炭地森林中 ELM 季节性落叶物候的观测评估与修正。《农业与森林气象》308–309。

Mo, Y., Chen, S., Wu, Z., Tang, J., Fu, Y., 2024. The advancement in spring vegetation phenology in the Northern Hemisphere will reverse after 2060 under future moderate warming scenarios. *Earths. Fut.* 12 (3).

[中文] Mo, Y. 等, 2024. 在中等增温情景下, 北半球春季物候推进将在 2060 年后逆转。《地球的未来》12(3)。

Mrad, A., et al., 2019. A dynamic optimality principle for water use strategies explains isohydric to anisohydric plant responses to drought. *Front. For. Glob. Change* 2.

[中文] Mrad, A. 等, 2019. 水分利用策略的动态最优性原理解释了从等水势到非等水势的干旱响应差异。《森林与全球变化前沿》2。

Niu, Z., et al., 2020. A spatial-temporal continuous dataset of the transpiration to evapotranspiration ratio in China from 1981 to 2015. *Sci. Data* 7 (1), 369.

[中文] 牛振西 等, 2020. 中国 1981–2015 年蒸腾/蒸散比的时空连续数据集。《科学数据》7(1): 369。

Novick, K.A., et al., 2016. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* 6 (11), 1023–1027.

[中文] Novick, K.A. 等, 2016. 大气需水对生态系统水—碳通量的重要性日益上升。《自然—气候变化》6(11): 1023–1027。

Peñuelas, J., Rutishauser, T., Filella, I., 2009. Phenology feedbacks on climate change. *Science* 324 (5929), 887–888.

[中文] Peñuelas, J., Rutishauser, T., Filella, I. 2009. 物候对气候变化的反馈。《科学》324(5929): 887–888。

Piao, S., et al., 2019. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Glob. Chang. Biol.* 25 (6), 1922–1940.

[中文] Piao, S. 等, 2019. 植物物候与全球气候变化: 进展与挑战。《全球变化生物学》25(6): 1922–1940。

Ren, Y., et al., 2024. Earlier spring greening in Northern Hemisphere terrestrial biomes enhanced net ecosystem productivity in summer. *Commun. Earth. Environ.* 5 (1).

[中文] 任宇 等, 2024. 北半球陆地生物群区春季更早变绿提高了夏季生态系统净生产力。《地球与环境通讯》5(1)。

Shi, X., She, D., Xia, J., Liu, R., Wang, T., 2024. The intercomparison of six $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ spatial resolution evapotranspiration products across mainland China. *J. Hydrol.* 633.

[中文] 史锡 等, 2024. 中国大陆六种 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 蒸散产品的对比评估。《水文学报 (J. Hydrol) 》633。

Tan, X., Jia, Y., Yang, D., Niu, C., Hao, C., 2023. Turning points in the impact of earlier green-up on evapotranspiration and gross primary productivity in a semi-arid grassland watershed. *J. Hydrol.* 616, 128755.

[中文] 谭翔 等, 2023. 半干旱草地流域中“春季提前变绿”对 ET 与 GPP 影响的转折点。《水文学报 (J. Hydrol)》616: 128755。

Tu, Z., Yang, Y., 2022. On the estimation of potential evaporation under wet and dry conditions. *Water Resour. Res.* 58 (4).

[中文] 涂梓、杨玉 2022. 湿润与干燥条件下的潜在蒸发估算。《水资源研究》58(4)。

Urli, M., et al., 2013. Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiol.* 33 (7), 672–683.

[中文] Urli, M. 等, 2013. 被子植物树木发生灾难性水力失效的木质部栓塞阈值。《树木生理学》33(7): 672–683。

Verrelst, J., et al., 2016. Evaluating the predictive power of sun-induced chlorophyll fluorescence to estimate net photosynthesis of vegetation canopies: a SCOPE modeling study. *Remote Sens. Environ.* 176, 139–151.

[中文] Verrelst, J. 等, 2016. 评估 SIF 估算冠层净光合的预测能力: 基于 SCOPE 的模拟研究。《遥感环境》176: 139–151。

Wang, L., She, D., Xia, J., Meng, L., Li, L., 2022. Revegetation affects the response of land surface phenology to climate in Loess Plateau, China. *Sci. Total Environ.*, 160383.

[中文] Wang, L. 等, 2022. 黄土高原再植被化影响地表物候对气候的响应。《环境科学全貌》: 160383。

Wang, S., et al., 2019. Urban-rural gradients reveal joint control of elevated CO₂ and temperature on extended photosynthetic seasons. *Nat. Ecol. Evol.* 3 (7), 1076–1085.

[中文] Wang, S. 等, 2019. 城乡梯度揭示: 升高的 CO₂ 与气温共同控制“光合季延长”。《自然—生态与进化》3(7): 1076–1085。

Yang, J., Liu, Z., Yu, Q., Lu, X., 2024. Estimation of global transpiration from remotely sensed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sens. Environ.* 303.

[中文] 杨骏 等, 2024. 基于 SIF 的全球植被蒸腾估算。《遥感环境》303。

Yang, X., Yong, B., Ren, L., Zhang, Y., Long, D., 2017. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via ChinaFLUX ET measurements. *Int. J. Remote Sens.* 38 (20), 5688–5709.

[中文] 杨旭 等, 2017. 借助 ChinaFLUX 对 GLEAM 蒸散产品在中国的多尺度验证。《国际遥感杂志》38(20): 5688–5709。

Yang, Y., Roderick, M.L., 2019. Radiation, surface temperature and evaporation over wet surfaces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 145 (720), 1118–1129.

[中文] Yang, Y., Roderick, M.L. 2019. 湿润下垫面上的辐射、地表温度与蒸发。《英国皇家气象学会季刊》145(720): 1118–1129。

Yang, Y., et al., 2023. Evapotranspiration on a greening Earth. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4 (9), 626–641.

[中文] Yang, Y. 等, 2023. 变绿地球上的蒸散发。《自然—地球环境综述》4(9): 626–641。

Yao, N., Li, Y., Lei, T., Peng, L., 2018. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961–2013. *Sci. Total Environ.* 616–617, 73–89.

[中文] 姚娜、李艳、雷霆、彭磊, 2018. 1961–2013 年中国大陆干旱的演变、强度与趋势。《环境科学全貌》616–617: 73–89。

Yu, X., et al., 2023. Comprehensive evaluation of terrestrial evapotranspiration from different models under extreme condition over conterminous United States. *Agric. Water Manage.* 289.

[中文] 于翔 等, 2023. 极端条件下美国本土区域多模型陆地蒸散的综合评估。《农业水管理》289。

Zeng, L., Wardlow, B.D., Xiang, D., Hu, S., Li, D., 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sens. Environ.* 237, 111511.

[中文] 曾磊 等, 2020. 基于多光谱卫星时间序列提取植被物候指标的研究综述。《遥感环境》237: 111511。

Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resour. Res.* 37 (3), 701–708.

[中文] Zhang, L.、Dawes, W.R.、Walker, G.R. 2001. 流域尺度年均蒸散对植被变化的响应。《水资源研究》37(3): 701–708。

Zhang, Q., et al., 2024. Solar-induced chlorophyll fluorescence sheds light on global evapotranspiration. *Remote Sens. Environ.* 305.

[中文] 张琦 等, 2024. 太阳诱导叶绿素荧光为全球蒸散研究带来新见解。《遥感环境》305。

Zuo, L., et al., 2025. Multi-scale analysis of six evapotranspiration products across China: accuracy, uncertainty and spatiotemporal pattern. *J. Hydrol.* 650.

[中文] 左磊 等, 2025. 中国范围六种蒸散产品的多尺度分析: 精度、不确定性与时空格局。《水文学报 (J. Hydrol) 》650。