

东北地区夏季骤旱下植被响应与恢复特征及其影响因素

曾炜茗^{1, 2} 陈海山^{1, 2} 马雨桐^{1, 2} 孔祥旭^{1, 2}

1 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 21004

摘要 全球变暖背景下, 水循环加速, 骤旱频发, 进而对陆地生态系统产生重要的影响; 但是, 目前关于中国东北地区植被对骤旱的响应及其恢复方面的研究还相对有限。本文基于 ERA5-Land 土壤湿度数据筛选骤旱事件, 对 2000-2022 年东北地区夏季骤旱事件进行了识别, 分析了其发展与恢复阶段的时空分布特征。在此基础上, 结合 MODIS 叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 分析了不同植被类型对骤旱响应与恢复阶段的差异, 进一步采用随机森林与偏相关分析方法, 探讨了其主导因素的空间格局。结果表明, 东北地区不同植被类型对骤旱的响应与恢复存在明显差异。具体而言, 森林对骤旱的响应时间最长 (28 天), 恢复时间最短 (12 天)。相较之下, 草地的响应时间最短 (10 天), 恢复时间最长 (30 天)。此外, 森林的下降速率和恢复速率均较快, 分别为 0.99/候和 1.02/候, 而草地则表现为较慢的下降和恢复速率, 为 0.28/候和 0.41/候。主导因素分析结果表明, 土壤湿度和饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD) 是影响植被响应时间的主要因素, 骤旱发展速率和气温对植被的下降速率起主要作用, 植被恢复时间主要受土壤湿度和降水影响, 而恢复速率主要受土壤湿度和 VPD 影响。气温和 VPD 分别决定了 50% 以上森林的下降速率和恢复速率, 且均高于草地和农田, 土壤湿度主导了超过 73% 的森林、草地、农田的响应时间和恢复时间。研究结果可在一定程度上为骤旱对不同生态系统的可能影响提供一定的参考, 同时加深对骤旱发生后生态系统的响应与恢复的理解。

关键词 东北地区 骤旱 植被类型 响应与恢复 主导因素

文章编号 Q25007

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25007

收稿日期 2025-01-10; **收修定稿日期** 2025-04-01

作者简介 曾炜茗, 女, 1999 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化与区域响应研究。E-mail: 826098105@qq.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42021004

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42021004)

Characteristics of Vegetation Response and Recovery and its Influencing Factors under Summer Flash Drought in Northeast China

ZENG Weiming^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}, MA Yutong^{1,2}, and KONG Xiangxu^{1,2}

1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Global warming has led to the intensification of the water cycle and the frequent occurrence of flash drought, which in turn has an important impact on the terrestrial ecosystem. However, the research on the response and recovery of vegetation to flash drought in Northeast China is relatively limited. This paper uses soil moisture which from ERA5-Land reanalysis data to select flash drought events and identify the summer flash drought in Northeast China from 2000 to 2022, and the spatial distribution characteristics during onset and recovery stages are analyzed. On this basis, the characteristics of different vegetation types response and recovery to flash drought are analyzed by combining with the MODIS Leaf Area Index (LAI), and the spatial pattern of dominant factors is further discussed by using random forest model and partial correlation analysis. The results show that there are significant differences in response and recovery of different vegetation types to flash drought in Northeast China. Specifically, forest has the longest response time (28 days) but the shortest recovery time (12 days), while grasslands has the shortest response time (10 days) but the longest recovery time (30 days). In addition, the decrease and recovery rate of forests are both faster (0.99/pentads and 1.02/pentads), while that of grasslands are slower (0.28/pentads and 0.41/pentads). The results of dominant factors suggest that soil moisture and Vapor Pressure Deficit (VPD) are the main factors affecting the response time of vegetation, the onset rate of flash drought and temperature play a major role in the decrease rate, the recovery time of vegetation is mainly impacted by soil moisture and precipitation, and the recovery rate is primarily influenced by soil moisture and VPD. Moreover, temperature and VPD determined the decrease and recovery rate of more than 50% of forests, respectively, and are higher than that of grasslands and croplands, while soil moisture dominates the response and recovery time of more than 73% of forests, grasslands and croplands. This paper results can provide some reference for the possible effects of flash drought on different ecosystems, and deepen the understanding of ecosystem response and recovery after flash drought.

Keywords Northeast China, Flash drought, Vegetation types, Response and recovery, Dominant factors

1 引言

干旱是最常见且最具破坏性的自然灾害之一，严重威胁着农业、生态环境和社会经济发展（Edwards et al., 2019; Wang et al., 2021; Guo et al., 2023）。随着全球气候变暖，以干旱为代表的极端气象灾害加剧，大量的研究探讨了干旱发生特征及其带来的影响（Blauhut et al., 2016; 张强等, 2017; 胡子瑛等, 2018）。然而，近年来有研究发现干旱常在次季节尺度上发生，一种短时间内迅速发生且加剧的干旱现象，即骤旱（Flash Drought, FD）开始受到了广泛关注（Otkin et al., 2016; 袁星等, 2020; O and Park, 2023）。研究发现，一系列影响巨大的骤旱事件在全球范围内发生，如美国 2012 年春、夏之际中西部的特大干旱（Otkin et al., 2016）、2013 年我国长江中下游骤旱（Yuan et al., 2015）、2017/2018 澳大利亚东部骤旱（Nguyen et al., 2019）以及 2022 年我国长江流域特大骤旱（Liang et al., 2023），均造成了巨大的经济损失，对农业和生态环境带来了毁灭性的影响。过去几十年间骤旱的比例及爆发速度均呈上升趋势，随着骤旱比例的显著增加，未来骤旱可能愈发频繁，并可能成为全球变暖背景下干旱的新常态，在更大程度上对环境和生态系统造成严重危害（Christian et al., 2021; Christian et al., 2023; Yuan et al., 2023）。因此，了解骤旱特征及揭示骤旱对生态系统的影响，对减少骤旱带来的不利影响和制定生态保护策略至关重要，还有助于进一步改善生态环境和促进可持续发展（Zeng et al., 2023）。

植被作为陆地生态系统的重要组成部分，受极端气候的影响尤为明显（Heino et al., 2023; 吴欣宇和朱秀芳, 2023; 张晶等, 2023）。近年来，大量的研究探讨了植被对气候变化的响应。李尚飞等（2023）发现干旱强度对中国北方植被生长过程起主要影响作用；刘海等（2023）研究指出中国大部分区域干旱与植被退化呈正相关，退化区集中在东南部、内蒙古等；Ma et al.（2024）发现东北亚半干旱区草地在干旱年代际转折时期（2000-2020 年）对干旱的响应加剧；李卓忆等（2024）研究发现中国北方干旱半干旱区的植被变化受人类活动和气候变化的共同影响，不同地区的主导因子不同。然而，近年来我国骤旱事件不断增加，且夏季骤旱频次最高（Wang et al., 2016; 覃佳盛等, 2024）。此外，受气温、土壤湿度、降水等多种因素的影响，Wang et al.（2016）研究发现我国约有 79%-86% 地区的骤旱对陆地生态系统产生负面影响。此外，纪瑞鹏等（2023）总结分析了骤旱影响农作物生长发育的不同机制及其对农作物产量的影响；Zhang et al.（2020）研究指出中国全区总初级生产力（Gross Primary Productivity, GPP）和叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）对骤旱的平均响应时间约为 19 天；Hu et al.（2024）发现长江流域混交林的响应时间在所有植被类型中最长，其次是稀树草原和农田。

东北地区作为中国重要的商品粮食主产区和生态功能区，植被覆盖类型多样且对气候变化敏感，

已成为干旱影响研究的典型区域（刘家福等, 2018; Gou et al., 2022; 薛泽等, 2024）。有研究发现东北地区是骤旱高发区，发生频次高且历时长（张翔等, 2018; Christian et al., 2021），Sun et al. (2024) 还指出东北地区夏季骤旱的发生频次较多。然而，目前关于骤旱对植被影响的研究多聚焦于其他区域（Jiang et al., 2024; Zhu et al., 2024; 李奇锦等, 2024），有关东北地区的研究较少。因此，本文将东北地区作为研究区域，除考虑植被对骤旱的响应外，还考虑了植被的恢复阶段，从相对全面的角度探究骤旱对植被的影响。此外，LAI 是作为研究植物生长和发育的重要参数，相比于其他植被指数，它的生态意义更为明确，能够更准确的反映植被动态变化，并且 LAI 在反映土壤湿度突变对植被的胁迫方面表现突出（胡玲等, 2021; O and Park, 2023）。因此，本文首先揭示东北地区夏季骤旱的发生次数、持续时间等特征，以期为骤旱的监测、预警和缓解提供信息支撑。同时，利用 LAI 表征植被的变化，研究 2000-2022 年中国东北地区夏季骤旱下不同植被的响应和恢复特征，以及影响植被响应和恢复的主要因素，从而更好的理解骤旱对植被的影响，并为制定生态保护策略提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 研究区域概况

东北地区被称为“中国粮仓”，其中中国四分之一的粮食总产量，三分之一的商品粮产自东北的黑土地，因此该地区已成为中国的粮食主产区（Wan et al., 2022; Xuan et al., 2023）。东北地区的总面积约为 152 万 km²，地理范围位于 38°N-55°N、113°E-135°E，其地势分异明显，呈三面环山，内部平原的结构（Sun et al., 2024）。东北地区的气候属温带大陆性季风气候，由东向西跨越湿润、半湿润与半干旱区（Zhou et al., 2020）。由于自然环境良好且空间分异显著，东北地区的植被覆盖类型丰富，其中森林主要分布于大兴安岭东北部、小兴安岭、长白山地区，草地集中分布于内蒙古地区，而农田分布于东北平原（图 1a）。

2.2 数据资料及处理

研究采用的植被数据来源于美国航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）提供的 MOD15A2H 产品，数据集包含叶面积指数（LAI）、光合有效辐射吸收比率（FPAR）以及质量等级和每个变量的标准偏差，本研究仅选用 LAI 数据，其空间分辨率为 500 m，时间分辨率为 8 天，且已根据数据集提供的质量等级对数据进行筛选和质量控制。土地覆盖类型数据来源于 NASA 提供的 MCD12Q1 产品中的植被功能类型，该产品使用 MODIS Terra 和 Aqua 反射数据进行监督分类。此外，考虑到研究内容需直观体现不同植被类型对骤旱的响应差异，本研究将植被功能类型分类方案中类定义相近的植被类型进行合并，即将常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林和落叶阔叶林合并为森林类，将谷类农田和阔叶农田合并为农田类，得到森林、草地、农田三种植被类型。

研究采用的气象数据包括土壤湿度、气温、降水、净辐射、潜热通量及相对湿度，其中土壤湿度、潜热通量、地表净辐射数据来源于欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的再分析资料 ERA5-Land（Hersbach et al., 2020），选用空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的日值数据，已知 ERA5-Land 数据集在中国的适用性已从多种角度得到验证（孟宪贵等, 2018; Zeng et al., 2021）。此外，由于潜热通量包括地面蒸发及植被蒸腾、蒸发的能量，在一定程度上能反映蒸散发的变化，因此后续研究用潜热通量体现蒸散发对植被的影响。气温、降水、相对湿度数据来源于 CN05.1 格点化观测资料，此数据集是使用国家气象信息中心 2400 余个国家级台站采用薄盘样条函数法和角距权重方法分别插值后叠加得到空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的日值数据（吴佳和高学杰, 2013）。ERA5-Land 中的土壤湿度数据共有 4 层（0-7 cm、7-28 cm、28-100 cm、100-289 cm），而由于前三层（即 0-100 cm）对降水和温度等其他气候要素变化高度敏感，并且也是植被吸收水分的直接来源，因此选择前三层土壤湿度用于后续研究（Osman et al., 2021; Zeng et al., 2023）。此外，饱和水汽压差（Vapor Pressure Deficit, VPD）作为植物生理学的重要指标，是植被变化的重要影响因素（Jain et al., 2022），本研究利用 CN05.1 提供的气温和相对湿度计算 VPD，计算方法如下：

$$VPD = 0.61078 \times e^{\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}} \times (1 - RH) \quad (1)$$

其中 T_a 为气温， RH 为相对湿度。

研究中的所有数据均统一成空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的候（5 天）平均数据，研究时间为 2000-2022 年夏季（6-8 月），即每年的第 31 候至第 49 候，共 19 候。

2.3 研究方法

2.3.1 骤旱识别方法

前人研究表明，土壤湿度百分位数为 40% 时可作为一次干旱过程的上限，当土壤湿度低于该百分位数时，土壤开始变干；而当土壤湿度百分位数低于 20% 时，土壤进入干旱状态，此时植被易受水分胁迫，生长易受影响（Otkin et al., 2018; Osman et al., 2021）。基于土壤湿度百分位数的快速下降及其持续时间，Yuan et al.（2019）提出能够明确表征骤旱的方法，充分体现了骤旱的发展和恢复过程，并被广泛用于骤旱相关研究（Mukherjee et al., 2022; Qing et al., 2022）。因此，本研究首先将前三层土壤湿度聚合得到候平均土壤湿度，再根据 Gringorten 位置划分公式（Gringorten, 1963）将候平均土壤湿度转换为百分位数，接着利用土壤湿度百分位数对骤旱进行识别。骤旱事件发生具体需要满足以下三个条件：（1）当候平均土壤湿度百分位数从 40% 以上下降至 20% 以下，且平均下降速率大于 5%/候时，表示为骤旱发展阶段；（2）当土壤湿度百分位数开始回升且恢复至 20% 以上时，

标志骤旱结束,此阶段为骤旱恢复阶段;(3)土壤湿度百分位数在除开始候的任何候都不应高于 40%,且一次完整骤旱应至少持续 4 候(20 天)。

骤旱示意图如图 1b 所示,其中 OD_{FD} 为骤旱发展阶段持续时间, ΔSM_{OD} 为发展阶段候平均土壤湿度百分位数变化,则 OR_{FD} (发展速率,单位: %/候) 定义为 ΔSM_{OD} 与 OD_{FD} 之比。同理,对骤旱恢复阶段而言, RD_{FD} 为恢复阶段持续时间, ΔSM_{RD} 为恢复阶段候平均土壤湿度百分位数变化,因此 RR_{FD} (恢复速率,单位: %/候) 为 ΔSM_{RD} 与 RD_{FD} 之比。此外,骤旱发生频次指研究时段内骤旱发生的总次数。

2.3.2 植被响应与恢复阶段的评价指标

研究根据 LAI 异常所满足的不同条件,来表示植被对骤旱响应与恢复的不同特征,以此探究骤旱对植被的生态影响 (Yang et al., 2023; O and Park, 2024)。LAI 异常定义为:

$$LAI\ anomaly_{i,j} = \frac{LAI_{i,j} - \mu_j(LAI)}{\sigma_j(LAI)} \quad (2)$$

其中, $LAI_{i,j}$ 表示第 i 年第 j 候的 LAI 值, $\mu_j(LAI)$ 和 $\sigma_j(LAI)$ 表示研究期间内 LAI 在第 j 候的均值和标准差。

本研究将骤旱对植被的影响分为植被的响应阶段与恢复阶段,分别采用植被的响应时间和变化速率来量化骤旱的影响。当植被处于响应阶段,响应时间定义为骤旱后 LAI 首次出现负异常的时间,响应时间越短,表示对骤旱越敏感 (Liu et al., 2019; Yang et al., 2023)。植被下降速率 (单位: /候) 定义为

$$decrease\ rate = \frac{L_1 - L_2}{t_1} \quad (3)$$

其中, L_1 表示骤旱后首次出现的 LAI 负异常值, L_2 表示 L_1 之后出现的 LAI 最大负异常值, t_1 为 L_1 与 L_2 之间的时间长度。此外,当植被处于恢复阶段时,恢复时间指骤旱发生后 LAI 从最大负异常值恢复到超过 0 异常值的时间长度,恢复时间越长,表示生态系统从骤旱中恢复的能力越差 (Yang et al., 2023)。植被恢复速率 (单位: /候) 定义为

$$recovery\ rate = \frac{L_3 - L_2}{t_2} \quad (4)$$

其中, L_3 表示 L_2 之后出现的第一个 LAI 正异常值, t_2 为 L_3 与 L_2 之间的时间长度。

2.3.3 随机森林模型

基于以往研究 (Yao et al., 2022; Sungmin et al., 2024), 为了解影响植被响应和恢复特征的可能因素, 本研究选用两类解释变量作为影响因素: (1) 骤旱特征, 包括骤旱发展和恢复阶段的持续时间和速率; (2) 气象要素异常, 包括植被响应和恢复阶段的土壤湿度、气温、降水、VPD、蒸散发、净辐射。对于气象要素异常, 我们使用与 LAI 异常相同的方法进行计算, 且将植被响应和恢复阶段的气象要素异常定义为对应阶段的异常累积和, 以此来反映气象要素变化对植被响应与恢复的可能影响。

随机森林 (Random Forest, RF) 作为一种综合决策树和随机子空间理论的机器学习方法, 其泛化性强, 性能稳定 (Breiman, 2001)。因此, 本研究采用随机森林回归模型, 通过集成学习方法评估各自变量对因变量的影响力度, 揭示各变量对植被响应和恢复阶段的重要性。随机森林回归使用 Bagging 算法进行训练, 通过构建回归树建立稳健模型, 依据 Python 随机森林中的 feature_importances 属性对特征的相对重要性进行度量, 重要性越高, 代表该因素对模型预测性能的贡献度越大 (Elith et al., 2008; Zhu et al., 2015)。在本研究中, 使用 k-fold 交叉验证方法 (k=10) 来训练和评估随机森林回归模型, 以此在一定程度上减轻过拟合, 提高预测精度。

2.3.4 偏相关分析

研究对随机森林回归模型识别的主要影响因素进行偏相关分析, 确定植被响应和恢复特征的主导因素的空间格局。偏相关分析是在控制其他变量的影响下研究两个变量之间相关性的统计方法, 消除了共线性影响, 从而更准确地评估两个特定变量之间的直接关联程度。本文中对于每个主要因素, 我们计算了其不同响应或恢复特征之间的偏相关系数, 同时消除移动窗口 7×7 像元内其他因素的影响。此外, 偏相关系数为正或负表示该主要因素与植被响应或恢复特征呈正相关或负相关, 意味着该特征与该因素的变化方向相同或相反 (Li et al., 2022; Yao et al., 2023)。偏相关系数的绝对值越大, 表示相关性越强 (Li et al., 2022), 因此我们将偏相关系数绝对值最大的因素定义为植被响应或恢复阶段特征的主导因素, 从而获得主导因素的空间格局。

3 结果分析

3.1 骤旱发展与恢复阶段的特征

图 1c 显示了 2000-2022 年东北地区夏季骤旱的发生频次, 发现骤旱频发的热点区域集中在研究区域南部, 在这些地区, 骤旱发生次数达 8 次甚至更多。为更加具体地体现骤旱特征, 依据骤旱定义, 将骤旱分为发展与恢复阶段, 从而得到 2000-2022 年东北地区夏季骤旱发展阶段持续时间、发展速率、恢复阶段持续时间和恢复速率的空间分布 (图 2a-2d) 及不同植被类型对应的骤旱特征 (图 2e-2h)。对比图 2a 和图 2c 可以发现, 骤旱发展阶段持续时间比恢复阶段长。

在骤旱发展阶段，全区大部分地区发展阶段持续时间在 18 天以上，其中黑龙江中部偏北地区持续时间更长（图 2a）。对发展速率而言，研究区域东南部骤旱发展速率较其他地区快，但大部分地区的骤旱发展速率为 10%/候左右（图 2b）。此外，森林、草地、农田覆盖区域的骤旱发展阶段持续时间无明显差异，均在 20 天左右（图 2e），而森林覆盖区域的骤旱发展速率略快于草地和农田，为 10.18%/候（图 2f）。

在骤旱恢复阶段，多数地区的骤旱恢复阶段持续时间较短，尤其研究区域中部及西部，多持续 10 天左右（图 2c）。对恢复速率而言，研究区域中部的骤旱恢复较慢（约 9%/候），而西南部的骤旱恢复较快，达 21%/候以上（图 2d）。此外，森林覆盖区域的骤旱恢复阶段持续时间平均为 14 天，草地和农田分别为 9 天和 10 天，意味着森林区域的土壤湿度可能需要更长时间恢复到正常水平（图 2g），而草地覆盖区域骤旱的恢复较快，为 16.10%/候（图 2h）。

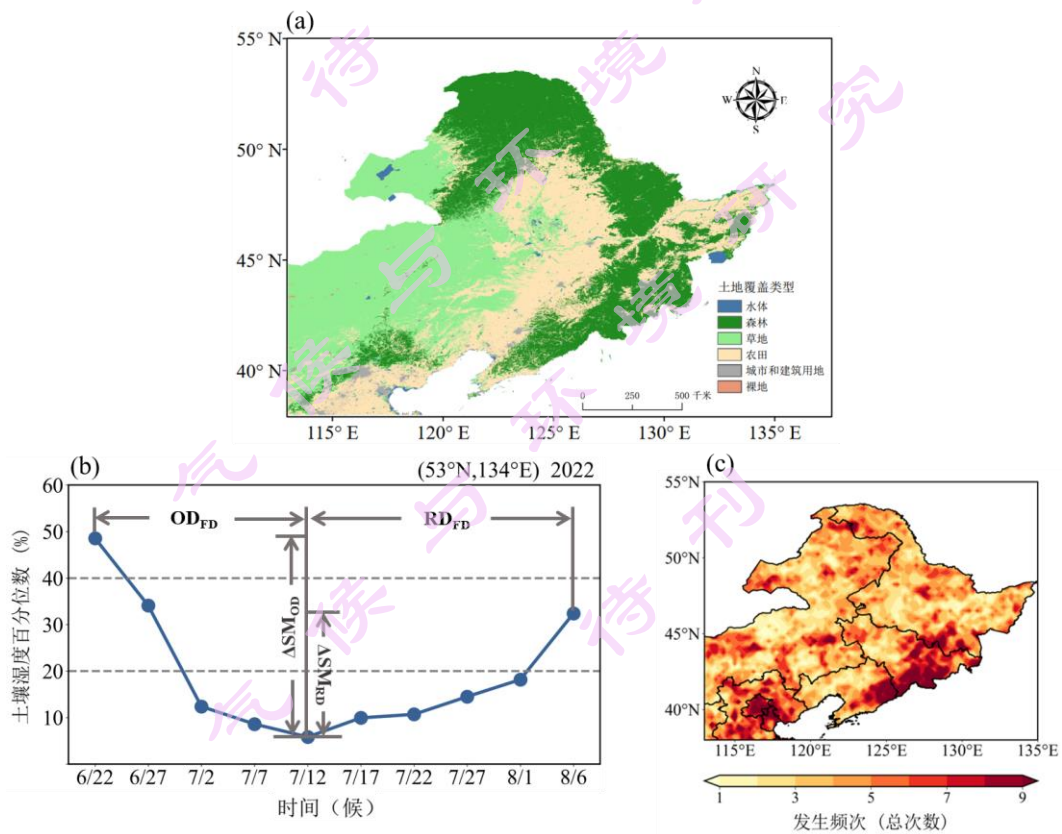


图 1 (a) 中国东北地区土地覆盖类型分布；(b) 骤旱定义示意图。蓝色实线表示 2022 年一次骤旱的一个格点 (134°E, 53°N) 的候平均土壤湿度百分位数，其中 OD_{FD} 为发展阶段持续时间， ΔSM_{OD} 为发展阶段候平均土壤湿度百分位数变化，RD_{FD} 为恢复阶段持续时间， ΔSM_{RD} 为恢复阶段候平均土壤湿度百分位数变化；(c) 2000-2022 年夏季中国东北地区骤旱发生频次（单位：总次数）的空间分布。

Fig.1 (a) Land use and cover over Northeast China, (b) illustration of the definition of flash drought. The blue solid line represents pentads mean soil moisture (SM) percentile for a grid point (134°E, 53°N) of a flash drought in 2022, where OD_{FD} is the duration of the onset stage, ΔSM_{OD} is SM percentile change of

the onset stage, and RD_{FD} is the duration of the recovery stage, ΔSM_{RD} is SM percentile change of the recovery stage, (c) spatial pattern of summer flash drought frequency (unit: times in total) over Northeast China from 2000 to 2022.

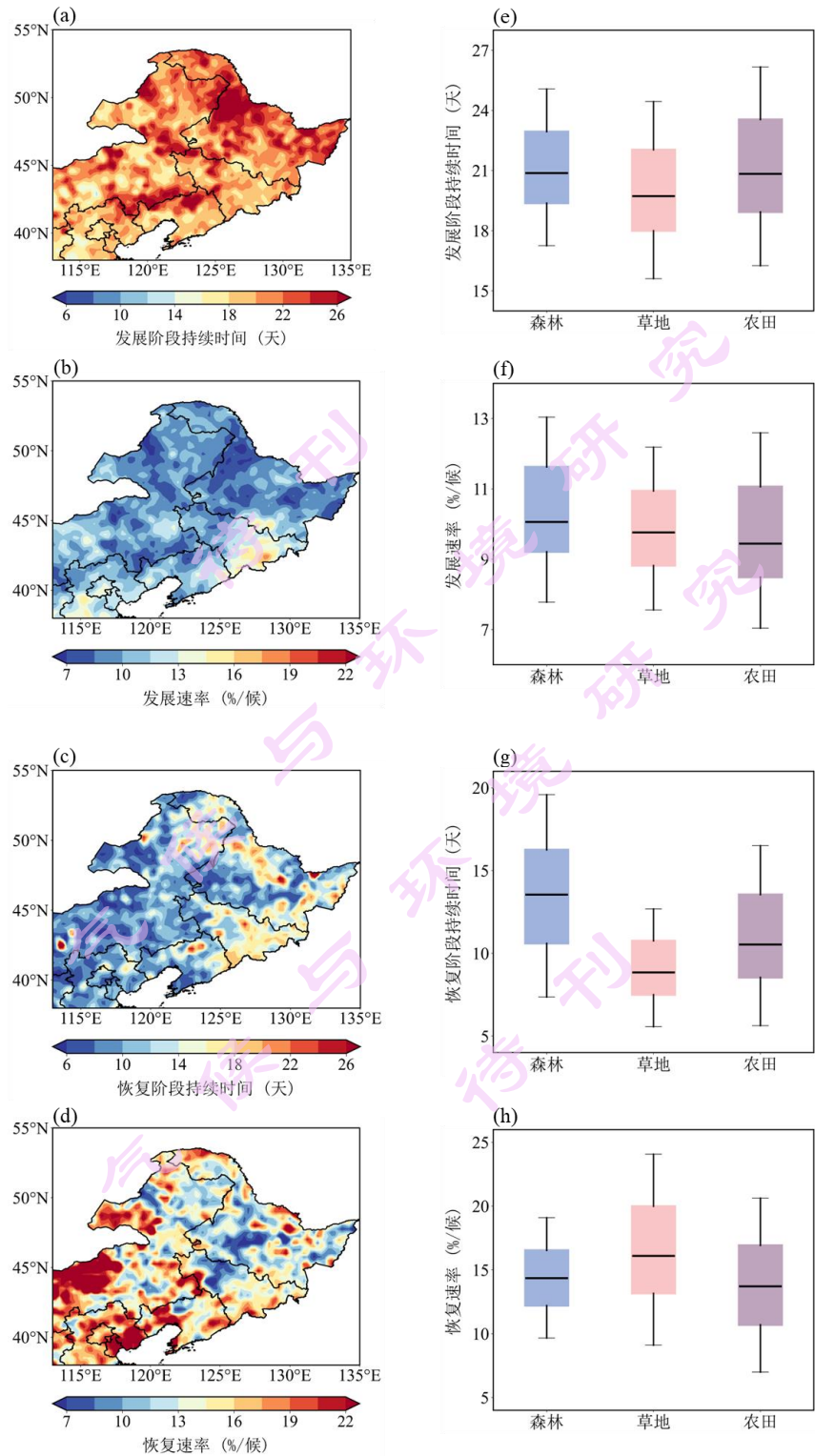


图 2 2000-2022 年夏季中国东北地区骤旱 (a) 发展阶段持续时间 (单位: 天)、(b) 发展速率 (单位: %/候)、(c) 恢复阶段持续时间 (单位: 天)、(d) 恢复速率 (单位: %/候) 的空间分布及 (e-h) 森林、草地、农田对应骤旱特征的箱线图; (a, b, e, f) 为骤旱发展阶段特征, (c, d, g, h) 为骤旱恢复阶段特征。

Fig.2 Spatial patterns of summer flash drought characteristics (i.e., (a) drought duration of the onset stage (unit: days), (b) drought onset rate (unit: %/pentads), (c) drought duration of the recovery stage (unit: days), and (d) drought onset rate (unit: %/pentads) in Northeast China from 2000 to 2022, and (e-h) the boxplots corresponding to flash drought characteristics of forest, grassland and cropland. (a, b, e, f) for flash drought onset stage characteristics, where (c, d, g, h) for recovery stage.

3.2 植被响应与恢复阶段的特征

为了探究骤旱对植被的影响，将植被分为响应阶段与恢复阶段，通过使 LAI 异常满足不同条件，从而得到植被响应阶段特征（即响应时间与下降速率，如图 3 所示）与恢复阶段特征（即恢复时间及恢复速率，如图 4 所示）。

在植被响应阶段，可以发现，响应时间与下降速率的空间模态与各植被类型区域分布较为相似（图 3a-3b 与图 1a）。图 3a 显示为植被对骤旱的响应时间，大值区主要集中在大兴安岭北部、小兴安岭、长白山及三江平原大部分地区，多为 26 天以上，而研究区域中部及西部地区的响应时间较短，几乎不超过 14 天。图 3b 表示的下降速率与响应时间的空间分布几乎相同，其中研究区域中部和西部地区的下降速率较缓。由于响应阶段特征的空间模态与植被类型分布类似，因此进一步对不同植被类型进行分析，发现在森林、草地、农田中（图 3c-3d），森林对骤旱的响应时间最长（平均 28 天），下降速率最快（平均 0.99/候），而草地的响应时间最短，平均在骤旱发生 10 天内 LAI 开始减少，且下降速率也最慢，平均为 0.28/候。研究结果表明，草地比森林更易受到骤旱的影响，而森林对土壤水分短缺具有更强的耐受性，这可能由于森林根系较深，因此能够继续利用深层土壤水以维持自身生长（Broedel et al., 2017; Lu et al., 2024），且森林叶片普遍较大又具有较发达的储水组织，能通过及时调节气孔开闭以减缓水分流失，从而延长对骤旱的响应时间（Niinemets, 2001; Brodribb et al., 2003）。此外，由于冠层结构的不同，不同类型的植被响应时间也会通过地表水分散发而受到影响（Baldocchi et al., 2008; Lu et al., 2025）。然而，农田由于可能受到人为因素的干扰，其对骤旱的响应时间和下降速率居中，分别为 17 天及 0.52/候。

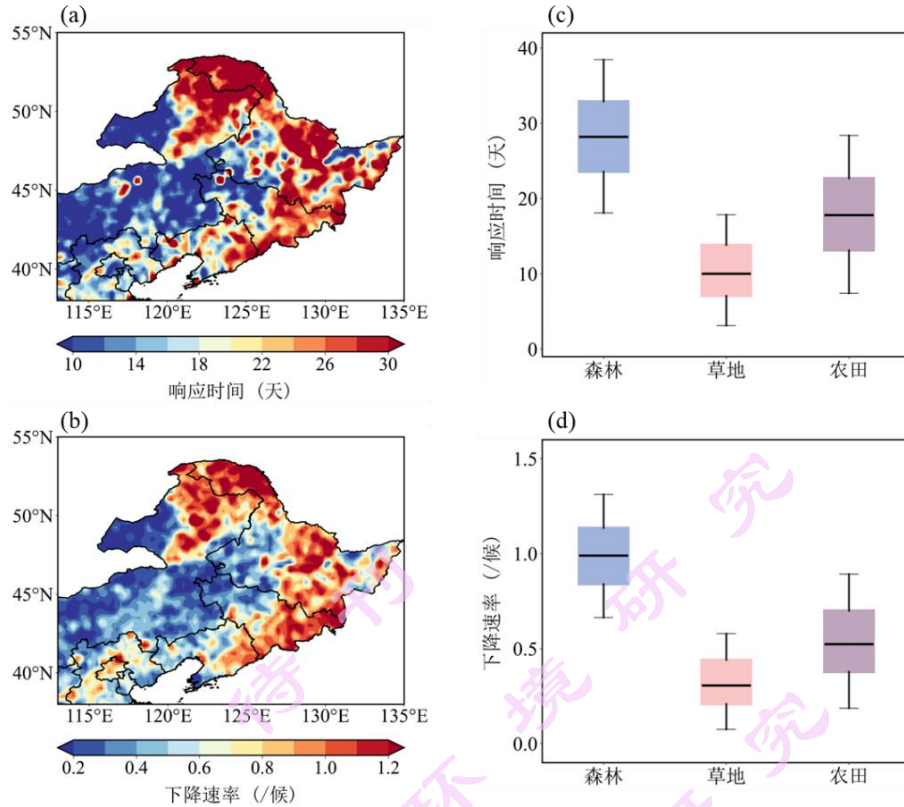


图 3 2000-2022 年夏季中国东北地区植被对骤旱的 (a) 响应时间 (单位: 天)、(b) 下降速率 (单位: /候) 的空间分布及 (c, d) 森林、草地、农田响应阶段对应特征的箱线图。

Fig.3 Spatial patterns of (a) response time (unit: days) and (b) decline rate (unit: /pentads) of vegetation to summer flash drought in Northeast China from 2000 to 2022, and (c, d) the boxplots corresponding to response stage characteristics of forest, grassland and cropland.

在植被恢复阶段, 恢复时间与恢复速率在空间上同样呈现与植被类型分布相似的模式 (图 4a-4b)。图 4a 表示植被的恢复时间, 其空间格局与图 3a 相似, 但大值区与小值区的分布与图 3a 相反, 即研究区域中部及西部地区植被的恢复时间较长 (达 26 天以上), 而大兴安岭北部、小兴安岭、长白山、三江平原及研究区域西南部的植被恢复时间较短 (12 天左右)。然而, 植被恢复速率的大值区与小值区分布 (图 4b) 与图 4a 相反, 表明恢复时间长的区域植被的恢复速率小。不同植被类型在恢复阶段存在显著差异, 其中森林平均在 12 天内能恢复正常水平, 而草地需要 30 天左右甚至更长的时间恢复, 农田的恢复时间约为 19 天 (图 4c)。与下降速率相似, 森林的恢复速率明显高于草地和农田, 平均为 1.02/候, 而草地的恢复速率最慢, 平均为 0.41/候, 这意味着遭遇骤旱后草地的恢复能力弱于森林, 这可能与草地生态系统脆弱、根系较浅且对土壤水分依赖性强有关 (Dang et al., 2020)。

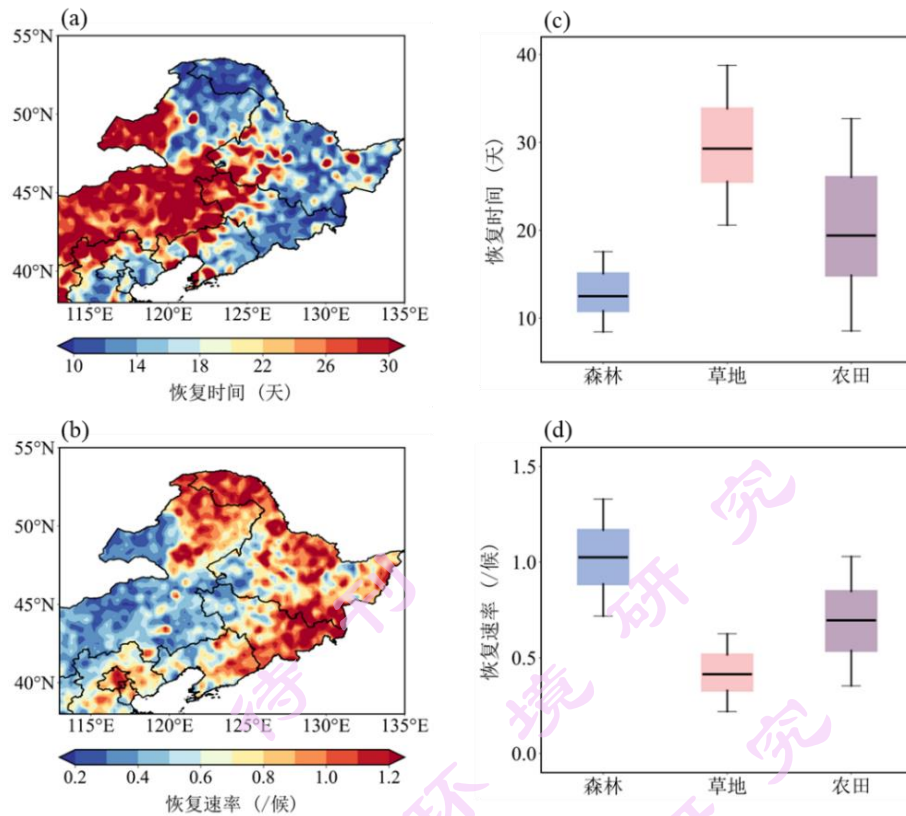


图 4 植被的 (a) 恢复时间 (单位: 天)、(b) 恢复速率 (单位: /候) 的空间分布及 (c, d) 森林、草地、农田恢复阶段对应特征的箱线图。

Fig 4 Spatial patterns of (a) recovery time (unit: days) and (b) recovery rate (unit: /pentads) of vegetation to summer flash drought in Northeast China from 2000 to 2022, and (c, d) the boxplots corresponding to recovery stage characteristics of forest, grassland and cropland.

3.3 影响植被响应与恢复的可能因素

为了探究影响植被响应与恢复的可能因素, 分别选择响应期与恢复期的气象要素 (土壤湿度、气温、降水、VPD、蒸散发、净辐射) 和骤旱特征 (发展阶段持续时间、发展速率、恢复阶段持续时间、恢复速率) 两类变量, 构建针对不同特征的随机森林回归模型, 评估各变量在模型中的相对重要性并进行排序。

在植被响应阶段, 图 5 给出了各解释因子对响应时间和下降速率的相对重要性。如图 5a 所示, 可以看出响应期土壤湿度和 VPD 对植被响应时间的影响较为显著, 其重要性分别为 46.2% 和 22.4%, 其中土壤湿度最为重要。降水和净辐射等其他气象要素的变化对响应时间的影响较小, 不超过 10%, 且骤旱发展阶段特征对植被响应时间几乎不产生影响。对于下降速率而言, 骤旱发展速率是最重要的影响因素, 相对重要性为 36.2%, 气温是次重要的影响因素, 其相对重要性为 24.8%, 其次是净辐射和蒸散发, 而骤旱发展阶段持续时间对植被下降速率影响微小 (图 5b)。

在植被恢复阶段, 图 6 给出了各解释因子对恢复时间和恢复速率的相对重要性, 发现恢复期土

壤湿度在植被恢复时间和恢复速率方面均表现出最高的重要性，而骤旱恢复阶段特征几乎不对植被造成影响。具体而言，土壤湿度和降水在决定植被的恢复时间上占主导地位，其相对重要性分别为 45.5% 和 21.4%，而其余解释因子的重要性均不超过 11%（图 6a）。此外，对植被恢复速率来说，土壤湿度和 VPD 是关键影响因素，其次为蒸散发、降水、气温、净辐射，这些因素的相对重要性均不超过 11%（图 6b）。然而，从相对重要性分析结果可以发现（图 5a，图 6a-6b），土壤湿度是影响植被响应时间、恢复时间和恢复速率的最重要因素，而土壤湿度会受到降水影响，但降水除了是影响植被恢复时间的次重要因素外，对响应时间和恢复速率的影响均相对较小，这可能是由于持续的非降水因素（如气温、蒸发等）会对土壤湿度造成影响，从而形成累积效应（Teuling et al., 2013; Wang et al., 2021; Guo et al., 2024），因此土壤湿度在植被响应时间、恢复时间以及恢复速率中占据主导地位。

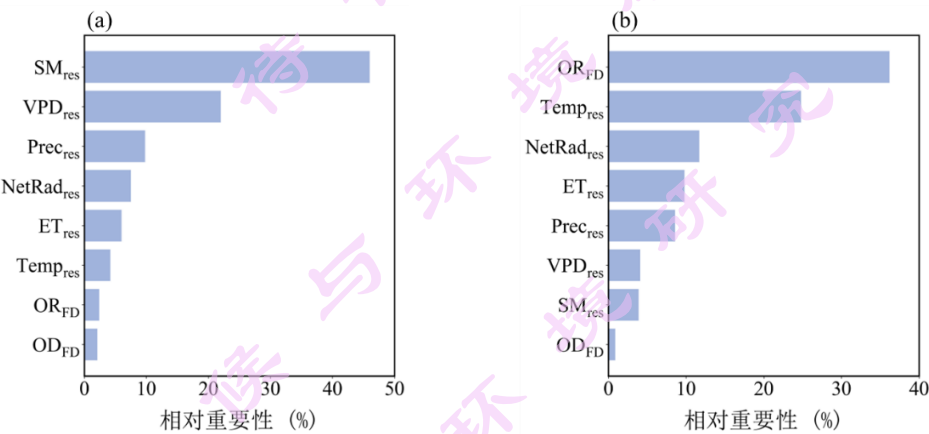


图 5 各解释因子对植被 (a) 响应时间和 (b) 下降速率的相对重要性。SM_{res}、Temp_{res}、VPD_{res}、Prec_{res}、NetRad_{res}、ET_{res}、OR_{FD}、OD_{FD} 分别表示土壤湿度、气温、饱和水汽压差、降水、净辐射、蒸散发、骤旱发展速率、骤旱发展阶段持续时间，后缀 res 表示植被响应期。

Fig.5 The relative importance (unit: %) of explanatory factors on (a) response time and (b) decline rate of vegetation to flash drought. SM_{res}, Temp_{res}, VPD_{res}, Prec_{res}, NetRad_{res}, ET_{res}, OR_{FD}, OD_{FD} denoted soil moisture, temperature, vapor pressure deficit, precipitation, net radiation, evapotranspiration, flash drought onset rate and duration of onset stage, respectively. The suffix res denoted the response period of vegetation.

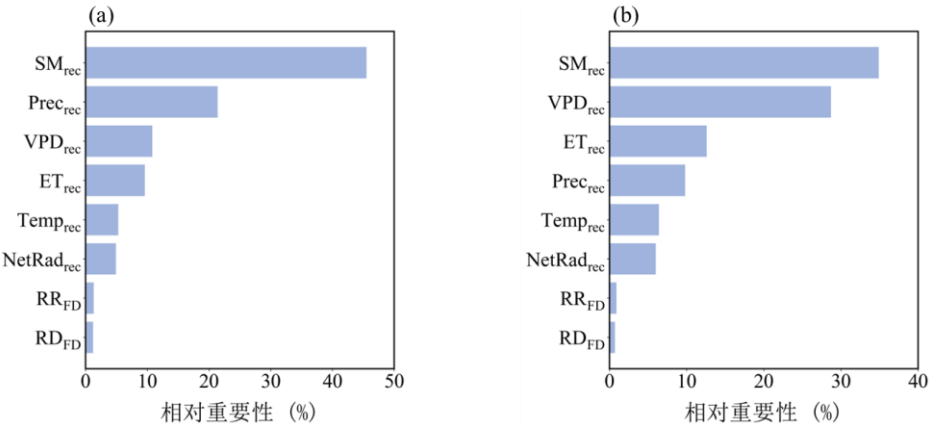


图 6 各解释因子对植被 (a) 恢复时间和 (b) 恢复速率的相对重要性。SM_{rec}、Temp_{rec}、VPD_{rec}、Prec_{rec}、NetRad_{rec}、ET_{rec}、RR_{FD}、RD_{FD} 分别表示土壤湿度、气温、饱和水汽压差、降水、净辐射、蒸散发、骤旱恢复速率、骤旱恢复阶段持续时间，后缀 rec 表示植被恢复期。

Fig.6 The relative importance (unit: %) of explanatory factors on (a) recovery time and (b) recovery rate of vegetation to flash drought. SM_{res}, Temp_{res}, VPD_{res}, Prec_{res}, NetRad_{res}, ET_{res}, RR_{FD}, RD_{FD} denoted soil moisture, temperature, vapor pressure deficit, precipitation, net radiation, evapotranspiration, flash drought recovery rate and duration of recovery stage, respectively. The suffix rec denoted the recovery period of vegetation.

3.4 植被响应与恢复的主导因素空间格局

基于随机森林模型的植被响应与恢复特征的解释因子相对重要性，考虑将相对重要性大于 20% 的要素决定为主导因素。因此，根据图 5 和图 6 的结果，可以得到植被响应时间的主导因素为土壤湿度和 VPD，而影响下降速率的主要因素为骤旱发生速率和气温，植被恢复时间的主导因素为土壤湿度和降水，恢复速率的主要影响因素为土壤湿度和 VPD。由于土壤湿度、VPD 都与降水有线性关系，因此为更深入探究这些主导因素对植被起到的作用，将不同的主导因素分别与对应的植被响应与恢复阶段特征进行偏相关分析，得到主导因素的空间格局及其在不同植被类型中所占的比例。

在植被响应阶段，图 7a 显示了响应时间主导因素的空间分布情况，可以发现 88.6% 区域的植被响应时间随土壤湿度增加而延长，另外 11.4% 的区域与 VPD 呈显著负相关，且主要分布在黑龙江中部、内蒙古北部以及研究区域西南部，表明随 VPD 增加，这些地区的植被响应骤旱的时间越短。在森林和草地中，以土壤湿度为主导因素的区域均占 87% 左右，且土壤湿度与响应时间呈正相关，意味着当土壤水分短缺时，易使植被生长受到抑制，并在较短时间内响应骤旱，而农田响应时间几乎受土壤湿度控制。此外，13% 的森林和草地由 VPD 主导，过高的 VPD 可能导致植被气孔导度降低 (Schönbeck et al., 2022)，使得植被在更短时间内对骤旱做出响应 (图 7c)。从植被的下降速率来看 (图 7b)，其空间分布无明显模态，约一半地区受骤旱发展速率主导，一半地区受气温主导。其中 58.7% 的区域的植被下降速率随骤旱发展速率增加而加快，另外 41.3% 的地区与气温呈负相关。对不同植被类型分析发现，骤旱发展速率主导草地和农田下降速率的比例略高于气温，而对于森林来说，有超过 50% 的森林下降速率随气温下降而加快 (图 7d)。

在植被恢复阶段，从植被恢复时间主导因素的空间格局可以看出 (图 8a)，有 83.3% 的区域恢复时间随土壤湿度减少而延长，其余 16.7% 的地区与降水呈负相关，主要分布在研究区域北部、东部及西南部部分地区，表明这些地区植被的恢复时间随降水减少而延长，而降水增多可以补充表层土壤水分以缓解植被水分胁迫，从而缩短恢复时间 (Wang et al., 2018; Peng et al., 2021; Harris et al., 2022)。对不同植被类型而言，土壤湿度对恢复时间的影响均更为重要，其中分别有 73.8% 的森林、88.6% 的草地和 86.7% 的农田恢复时间与土壤湿度呈负相关，意味着土壤湿度越低，植被从骤旱中恢

复的时间越长（图 8c）。此外，恢复速率的主导因素空间格局表明，有 61.6% 区域的植被恢复速率随土壤湿度增加而加快，而其余 38.4% 的地区与 VPD 呈负相关，且集中分布于研究区域东南部及内蒙古北部（图 8b）。进一步对不同植被类型进行分析（图 8d），发现森林恢复速率受 VPD 和土壤湿度主导的比例分别占 65.4% 与 34.6%，表明大部分森林的恢复速率受 VPD 影响，VPD 不断升高可能导致森林储水能力下降，从而使其较慢恢复到正常状态。与森林不同，土壤湿度对草地和农田恢复速率的影响更为显著，其比例显著高于 VPD，尤其草地，表明土壤水分短缺使得多数草地较慢从骤旱中恢复。

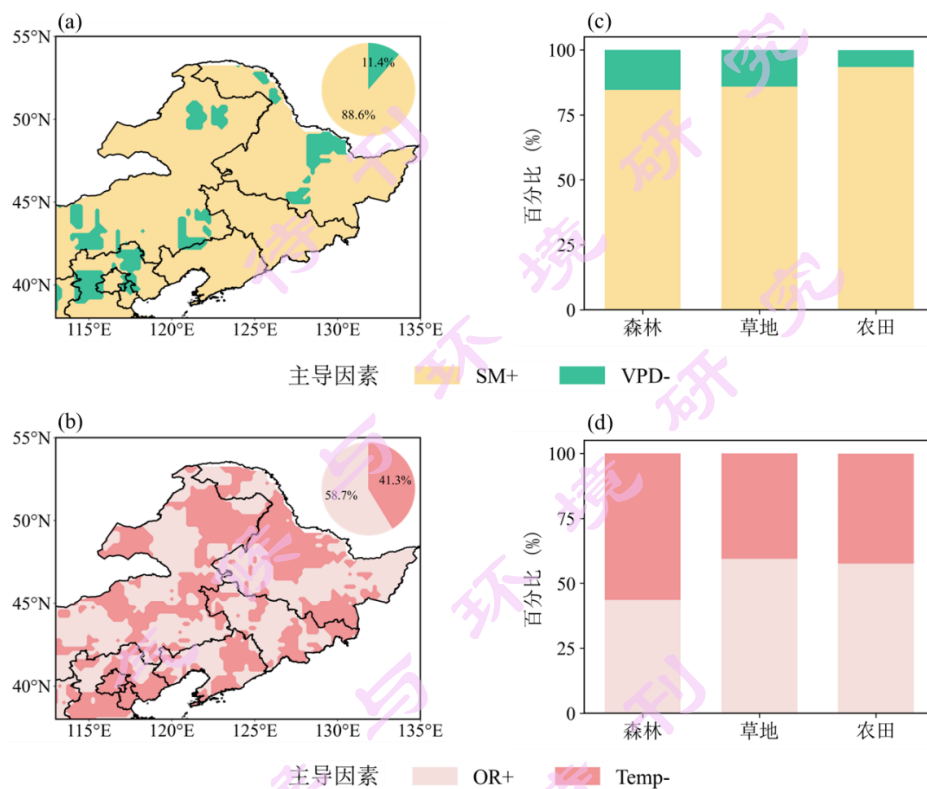


图 7 植被 (a) 响应时间和 (b) 下降速率主导因素的空间分布及 (c, d) 森林、草地、农田中各主导因素所占百分比，其中 SM、VPD、OR 和 Temp 分别是土壤湿度、饱和水汽压差、骤旱发展速率和气温，“+”或“-”表示响应时间/下降速率与该主导因素呈正或负偏相关关系，即响应时间/下降速率与该因素的变化方向相同或相反。饼图表示不同主导因素所占研究区域的百分比。

Fig.7 Spatial patterns of dominant factors of vegetation (a) response time and (b) decline rate, and the percentages of different dominate factors of forest, grassland and cropland (c, d). SM, VPD, OR and Temp presented soil moisture, vapor pressure deficit, flash drought onset rate and temperature, respectively. “+” or “-” denoted a positive or negative partial correlation relationship between the response time/decline rate and the dominant factor, indicating that the response time/decline rate changed in the same or opposite direction as the changes in the dominant factor. The pie chart indicated the percentages of different dominant factors in the study area.

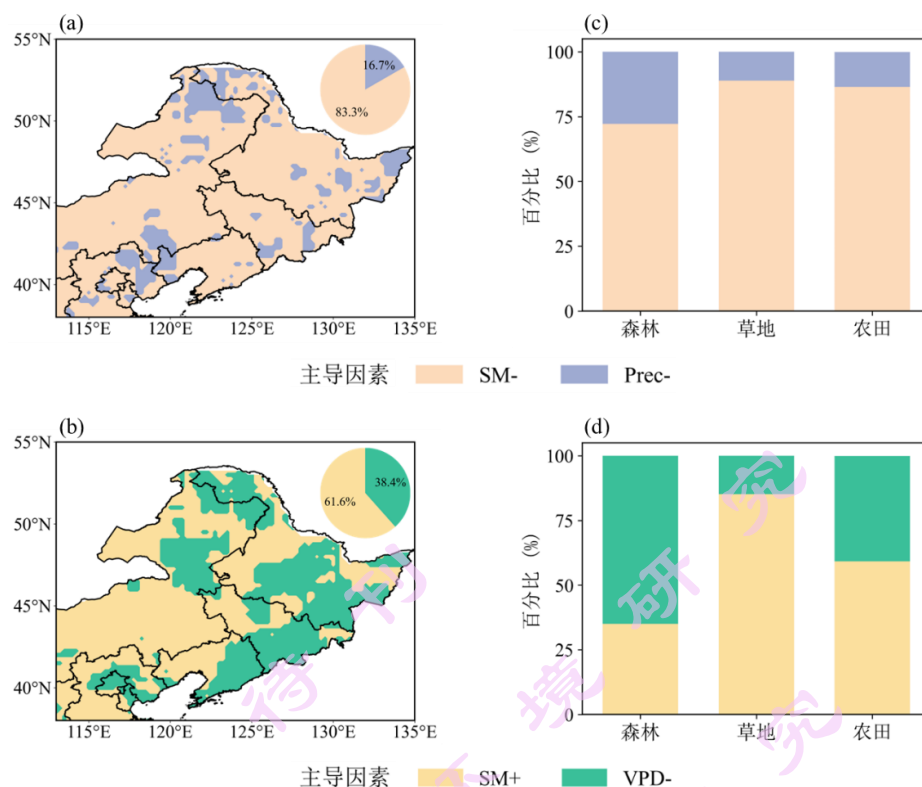


图 8 植被 (a) 恢复时间和 (b) 恢复速率主导因素的空间分布及 (c, d) 森林、草地、农田中各主导因素所占百分比, 其中 SM、Prec、VPD 分别是土壤湿度、降水、饱和水汽压差, “+”或“-”表示恢复时间/恢复速率与该主导因素呈正或负偏相关关系, 即恢复时间/恢复速率与该因素的变化方向相同或相反。饼图表示不同主导因素所占研究区域的百分比。

Fig.8 Spatial patterns of dominant factors of vegetation (a) recovery time and (b) recovery rate, and the percentages of different dominate factors of forest, grassland and cropland (c, d). SM, Prec and VPD presented soil moisture, precipitation and vapor pressure deficit, respectively. “+” or “-” denoted a positive or negative partial correlation relationship between the recovery time/recovery rate and the dominant factor, indicating that the recovery time/recovery rate changed in the same or opposite direction as the changes in the dominant factor. The pie chart indicated the percentages of different dominant factors in the study area.

4 结论与讨论

基于 ERA5-Land、CN05.1 和 MODIS 资料, 本文对 2000-2022 年东北地区夏季骤旱发展与恢复阶段基本特征, 以及不同植被类型对骤旱的响应及其恢复差异进行分析, 并在此基础上, 结合随机森林模型和偏相关分析探讨了可能影响因素对植被响应与恢复特征的相对重要性及其主导因素空间格局。主要结论如下:

(1) 东北地区夏季骤旱发展阶段持续时间比恢复阶段长, 恢复速率比发展速率快。在三种植被类型中, 骤旱发展阶段持续时间无明显差异, 均在 20 天左右, 而森林覆盖区域的发展速率略高于草地和农田, 平均为 10.18%/候。对恢复阶段而言, 森林覆盖区域的骤旱恢复阶段持续时间最长, 草地最短, 且草地覆盖区域的骤旱恢复速率最快。

(2) 不同植被类型对骤旱的响应与恢复存在显著差异,但同类型植被在响应与恢复阶段呈现相似空间分布。其中,森林对骤旱的响应时间最长,平均为 28 天,且下降速率最快。相较之下,根系较浅的草地对骤旱更为敏感,平均在 10 天左右对骤旱作出响应。对植被恢复阶段而言,森林的恢复能力最强,其恢复时间最短,平均为 12 天,且森林的恢复速率明显快于草地和农田,而草地的恢复能力较弱,平均需要 30 天才能恢复到正常状态。

(3) 植被响应与恢复的主导因素空间格局存在明显差异。在响应阶段,响应时间主要受土壤湿度和 VPD 影响,分别占研究区域的 88.6%和 11.4%,其中森林和草地中受土壤湿度控制的响应时间约占研究区域的 87%。另外,下降速率主要受骤旱发展速率及气温影响,骤旱发展速率和气温主导下降速率的比例分别占 58.7%和 41.3%,气温主导森林下降速率的比例略高于草地和农田。而在恢复阶段,土壤湿度和降水是植被恢复时间的主导因素,分别主导 83.3%和 16.7%的研究区域,其中降水主导森林恢复时间的比例多于草地和农田。此外,土壤湿度和 VPD 在决定植被恢复速率中起关键作用,分别占全区的 61.6%和 38.4%,VPD 主导森林恢复速率的比例显著高于草地和农田,而大部分草地的恢复速率受土壤湿度支配。

本研究探讨了中国东北地区不同植被对夏季骤旱的响应与恢复特征及其影响因素,但目前的研究仍存在一些不足。首先,植被变化除了受气象要素影响,还与土壤性质、植被生根深度以及人类活动等有关,而研究仅考虑了有关气象要素,对于植被的响应与恢复是否还受土壤性质、人类活动、植被结构及其生理特征等影响,还需进行多方面的考量。此外,农田对骤旱的响应中存在较多不确定影响因素,如人为灌溉等,本文尚未进行细致考虑。最后,值得注意的是,不同森林类型对骤旱的响应也存在不确定性,如针叶林和阔叶林,而基于这种更细致的植被分类探讨不同植被对骤旱的响应与恢复特征在本文中并未体现。因此,在未来的研究工作中,还需更进一步地讨论骤旱下不同植被类型的响应与恢复特征及其可能影响因素,以减小研究结果的不确定性。

参考文献 (References)

- Baldocchi D, Kelliher F, Black A, et al. 2008. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange[J]. *Global Change Biology*, 6: 69-83. doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.06014.x
- Blauhut V, Stahl K, Stagge J H, et al. 2016. Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(7): 2779-2800. doi: 10.5194/hess-20-2779-2016
- Breiman L. 2001. Random forests[J]. *Machine Learning*, 45(1): 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324
- Brodribb T J, Holbrook N M. 2003. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits[J]. *Plant physiology*, 132(4): 2166-2173. doi: 10.1104/pp.103.023879
- Broedel E, Tomasella J, Cândido L A, et al. 2017. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in

- central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought[J]. *Hydrological Processes*, 31(9): 1749-1759. doi: 10.1002/hyp.11143
- Christian J I, Basara J B, Hunt E D, et al. 2021. Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence[J]. *Nature Communications*, 12(1): 6330. doi: 10.1038/s41467-021-26692-z
- Christian J I, Martin E R, Basara J B, et al. 2023. Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate[J]. *Communications Earth & Environment*, 4(1): 165. doi: 10.1038/s43247-023-00826-1
- Dang Z, Huang Z, Tian F, et al. 2020. Five-year soil moisture response of typical cultivated grasslands in a semiarid area: Implications for vegetation restoration[J]. *Land Degradation & Development*, 31(9): 1078-1085. doi: 10.1002/ldr.3537
- Edwards B, Gray M, Hunter B. 2019. The social and economic impacts of drought[J]. *Australian Journal of Social Issues*, 54(1): 22-31. doi: 10.1002/ajs4.52
- Elith J, Leathwick J R, Hastie T. 2008. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 77(4): 802-813. doi: 10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x
- Gou Q, Zhu Y, Lü H, et al. 2022. Application of an improved spatio-temporal identification method of flash droughts[J]. *Journal of Hydrology*, 604: 127224. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127224
- Gringorten I I. 1963. A plotting rule for extreme probability paper[J]. *Journal of Geophysical Research*, 68(3): 813-814. doi: 10.1029/JZ068i003p00813
- Guo H, Tian Y, Li J, et al. 2024. Unveiling the spatiotemporal impacts of the 2021 Central Asian drought on vegetation: A comprehensive quantitative analysis[J]. *Ecological Indicators*, 165: 112238. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112238
- Guo W, Huang S, Huang Q, et al. 2023. Drought trigger thresholds for different levels of vegetation loss in China and their dynamics[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331: 109349. doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109349
- Harris B L, Taylor C M, Weedon G P, et al. 2022. Satellite-observed vegetation responses to intraseasonal precipitation variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(15): e2022GL099635. doi: 10.1029/2022GL099635
- Heino M, Kinnunen P, Anderson W, et al. 2023. Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 3583. doi: 10.1038/s41598-023-29378-2
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146. doi: 10.1002/qj.3803
- Hu C, She D, Wang G, et al. 2024. Soil moisture and precipitation dominate the response and recovery times of ecosystems from different types of flash drought in the Yangtze River Basin[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358: 110236. doi: 10.1016/j.agrformet.2024.110236
- 胡玲, 孙聪, 范闻捷, 等. 2021. 近 20 年防风固沙重点生态功能区植被动态分析[J]. *生态学报*, 41(21): 8341-8351. Hu Ling, Sun Cong, Fan Wenjian, et al. 2021. Spatio-temporal dynamics of vegetation in key ecological function zone of wind-break and sand-fixation over the last 20 years[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 41(21): 8341-8351. doi: 10.5846/stxb202101270288
- 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 2018. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 38(6):

- 1908-1919. Hu Ziyang, Zhou Junju, Zhang Lili, et al. 2018. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 38(6): 1908-1919. doi: 10.5846/stxb201702260315
- Jain P, Castellanos-Acuna D, Coogan S C P, et al. 2022. Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature[J]. *Nature Climate Change*, 12(1): 63-70. doi: 10.1038/s41558-021-01224-1
- 纪瑞鹏, 于文颖, 冯锐, 等. 2023. 骤发干旱对农作物生长过程的影响机制与评估研究进展[J]. *生态学杂志*, 42(11): 2737-2746. Ji Ruipeng, Yu Wenying, Feng Rui, et al. 2023. Research advances in the effect mechanism and evaluation of flash drought on crop growth process[J]. *Chinese Journal of Ecology* (in Chinese), 42(11): 2737-2746. doi: 10.13292/j.1000-4890.202311.008
- Jiang Y, Shi H, Wen Z, et al. 2024. Monitoring of flash drought on the Loess Plateau and its impact on vegetation ecosystems[J]. *Forests*, 15(8): 1455.. doi: 10.3390/f15081455
- Li C, Bai X, Tan Q, et al. 2022. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes[J]. *Global Change Biology*, 28(14): 4377-4394. doi: 10.1111/gcb.16186
- 李奇锦, 姜亮亮, 刘文利, 等. 2024. 成渝地区农田生产力对骤旱的抵抗性与恢复性研究[J]. *生态学报*, 45(1): 1-16. Li Qijin, Jiang Liangliang, Liu Wenli, et al. 2024. The resistance and restoration of farmland productivity to flash drought in the Chengdu-Chongqing area[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 45(1): 1-16. doi: 10.20103/j.stxb.stxb202402220376
- 李尚飞, 戈文艳, 王飞. 2023. 1982-2019 年中国北方干旱事件特征及其对植被的影响[J]. *水土保持研究*, 30(3): 251-259. Li Shangfei, Ge Wenyang, Wang Fei. 2023. Characteristics of drought events and their impacts on vegetation in Northern China from 1982 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 30(3): 251-259. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.017
- 李卓忆, 杨庆, 马柱国, 等. 2024. 中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应[J]. *大气科学*, 48(3): 859-874. Li Zhuoyi, Yang Qing, Ma Zhuguo, et al. 2024. Responses of vegetation to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of Northern China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 48(3): 859-874. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22048
- Liang M, Yuan X, Zhou S, et al. 2023. Spatiotemporal evolution and nowcasting of the 2022 Yangtze River mega-flash drought[J]. *Water*, 15(15): 2744. doi: 10.3390/w15152744
- 刘海, 姜亮亮, 刘冰, 等. 2023. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J]. *生态学报*, 43(19): 7936-7949. Liu Hai, Jiang Liangliang, Liu Bing, et al. 2023. Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 43(19): 7936-7949. doi: 10.20103/j.stxb.202206061601
- 刘家福, 马帅, 李帅, 等. 2018. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 38(21): 7647-7657. Liu Jiafu, Ma Shuai, Li Shuai, et al. 2018. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 38(21): 7647-7657. doi: 10.5846/stxb201712112226
- Liu L, Gudmundsson L, Hauser M, et al. 2019. Revisiting assessments of ecosystem drought recovery[J]. *Environmental Research Letters*, 14(11): 114028. doi: 10.1088/1748-9326/ab4c61
- Lu L, Yu L, Li X, et al. 2025. Assessing vegetation canopy growth variations in Northeast China[J]. *Plants*, 14(1):143. doi: 10.3390/plants14010143

- Lu M, Sun H, Cheng L, et al. 2024. Heterogeneity in vegetation recovery rates post-flash droughts across different ecosystems[J]. *Environmental Research Letters*, 19(7): 074028. doi: 10.1088/1748-9326/ad5570
- Ma Y, Chen H, Song Y, et al. 2024. Persistent greening against drying in northeast Asian semiarid grasslands: Asymmetrical responses of direct and legacy effects to intensified drought[J]. *Advances in Climate Change Research*, 15(1): 9-20. doi:10.1016/j.accre.2024.01.013
- 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. 2018. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. *海洋气象学报*, 38(1): 91-99. Meng Xiangui, Guo Junjian, Han Yongqing. 2018. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data[J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 38(1): 91-99. doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.011.
- Mukherjee S, Mishra A K. 2022. A multivariate flash drought indicator for identifying global hotspots and associated climate controls[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(2): e2021GL096804. doi: 10.1029/2021GL096804
- Nguyen H, Wheeler M C, Otkin J A, et al. 2019. Using the evaporative stress index to monitor flash drought in Australia[J]. *Environmental Research Letters*, 14(6): 064016. doi: 10.1088/1748-9326/ab2103
- Niinemets Ü. 2001. Global-scale climatic controls of leaf dry mass per area, density, and thickness in trees and shrubs[J]. *Ecology*, 82: 453-469. doi: 10.1890/0012-9658(2001)082[0453:GSCCOL]2.0.CO;2
- Osman M, Zaitchik B F, Badr H S, et al. 2021. Flash drought onset over the contiguous United States: sensitivity of inventories and trends to quantitative definitions[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(2): 565-581. doi: 10.5194/hess-25-565-2021
- Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. 2016. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218-219: 230-242. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.12.065
- Otkin J A, Svoboda M, Hunt E D, et al. 2018. Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5): 911-919. doi: 10.1175/BAMS-D-17-0149.1
- Peng Q, Wang R, Jiang Y, et al. 2021. The change of hydrological variables and its effects on vegetation in Central Asia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1): 741-753. doi: 10.1007/s00704-021-03730-w
- 覃佳盛, 杨婷, 吕洋. 2024. 1980—2022年我国骤旱特征及趋势分析[J]. *中山大学学报(自然科学版中英文)*, 63(5): 48-62. Qin Jiasheng, Yang Ting, Lv Yang. 2024. Flash drought pattern and trend in China during 1980-2022[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 63(5): 48-62. doi: 10.13471/j.cnki.acta.snus.ZR20240062
- Qing Y, Wang S, Ancell B C, et al. 2022. Accelerating flash droughts induced by the joint influence of soil moisture depletion and atmospheric aridity[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1139. doi: 10.1038/s41467-022-28752-4
- Schönbeck L C, Schuler P, Lehmann M M, et al. 2022. Increasing temperature and vapour pressure deficit lead to hydraulic damages in the absence of soil drought[J]. *Plant, Cell & Environment*, 45(11): 3275-3289. doi: 10.1111/pce.14425
- Sungmin O, Park S K. 2023. Flash drought drives rapid vegetation stress in arid regions in Europe[J]. *Environmental Research Letters*, 18(1): 014028. doi: 10.1088/1748-9326/acae3a
- Sungmin O, Park S K. 2024. Global ecosystem responses to flash droughts are modulated by background climate

- and vegetation conditions[J]. *Communications Earth & Environment*, 5(1): 88. doi: 10.1038/s43247-024-01247-4
- Sun J, Zhang Q, Liu X, et al. 2024. Flash droughts in a hotspot region: Spatiotemporal patterns, possible climatic drivings and ecological impacts[J]. *Weather and Climate Extremes*, 45: 100700. doi: 10.1016/j.wace.2024.100700
- Teuling A J, Van Loon A F, Seneviratne S I, et al. 2013. Evapotranspiration amplifies European summer drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2071-2075. doi: 10.1002/grl.50495
- Wan W, Liu Z, Li B, et al. 2022. Evaluating soil erosion by introducing crop residue cover and anthropogenic disturbance intensity into cropland C-factor calculation: Novel estimations from a cropland-dominant region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 219: 105343. doi: 10.1016/j.still.2022.105343
- Wang L, Yuan X, Xie Z, et al. 2016. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. *Scientific Reports*, 6(1): 30571. doi: 10.1038/srep30571
- Wang T, Tu X, Singh V P, et al. 2021. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6[J]. *Journal of Hydrology*, 596: 126091. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126091
- Wang Y, Yang J, Chen Y, et al. 2018. The spatiotemporal response of soil moisture to precipitation and temperature changes in an arid region, China[J]. *Remote Sensing*, 10(3): 468. doi: 10.3390/rs10030468
- Wang Y, Zhang Y, Yu X, et al. 2021. Grassland soil moisture fluctuation and its relationship with evapotranspiration[J]. *Ecological Indicators*, 131: 108196. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108196
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*, 56(4): 1102-1111. Wu Jia, Gao XueJie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56(4): 1102-1111. doi: 10.6038/cjg20130406
- 吴欣宇, 朱秀芳. 2023. 中国不同植被区对极端气候的响应差异[J]. *生态学报*, 43(24): 10202-10215. Wu Xinyu, Zhu Xiufang. 2023. Differential analysis of vegetation response to extreme climate in different vegetation regions of China[J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 43(24): 10202-10215. doi: 10.20103/j.stxb.202306081217
- Xuan F, Dong Y, Li J, et al. 2023. Mapping crop type in Northeast China during 2013–2021 using automatic sampling and tile-based image classification[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117: 103178. doi: 10.1016/j.jag.2022.103178
- 薛泽, 李雪冬, 费龙, 等. 2024. 干旱对中国东北黑土区不同植被总初级生产力的时滞与累积效应[J]. *地理科学*, 44(11): 2060-2071. Xue Ze, Li Xuedong, Fei Long, et al. 2024. Time lag and cumulative effects of drought on the gross primary productivity of different vegetation types in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 44(11): 2060-2071. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20240458
- Yang L, Wang W, Wei J. 2023. Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339: 109545. doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109545
- Yao T, Liu S, Hu S, et al. 2022. Response of vegetation ecosystems to flash drought with solar-induced chlorophyll fluorescence over the Hai River Basin, China during 2001–2019[J]. *Journal of Environmental Management*, 313: 114947. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114947

- Yao Y, Liu Y, Zhou S, et al. 2023. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought[J]. *Global Change Biology*, 29(13): 3562-3574. doi: 10.1111/gcb.16620
- 袁星, 马凤, 李华, 等. 2020. 全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J]. *大气科学学报*, 43(1): 225-237. Yuan Xing, Ma Feng, Li Hua, et al. 2020. A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J]. *Trans Atmos Sci (in Chinese)*, 43(1): 225-237. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191105005
- Yuan X, Ma Z, Pan M, et al. 2015. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(11): 4394-4401. doi: 10.1002/2015GL064125
- Yuan X, Wang L, Wu P, et al. 2019. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China[J]. *Nature Communications*, 10(1): 4661. doi: 10.1038/s41467-019-12692-7
- Yuan X, Wang Y, Ji P, et al. 2023. A global transition to flash droughts under climate change[J]. *Science*, 380(6641): 187-191. doi: 10.1126/science.abn6301
- Zeng J, Yuan X, Ji P, et al. 2021. Effects of meteorological forcings and land surface model on soil moisture simulation over China[J]. *Journal of Hydrology*, 603: 126978. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126978
- Zeng Z, Wu W, Peñuelas J, et al. 2023. Increased risk of flash droughts with raised concurrent hot and dry extremes under global warming[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1): 134. doi: 10.1038/s41612-023-00468-2
- 张晶, 郝芳华, 吴兆飞, 等. 2023. 植被物候对极端气候响应及机制[J]. *地理学报*, 78(9): 2241-2255. Zhang Jing, Hao Fanghua, Wu Zhaofei, et al. 2023. Response of vegetation phenology to extreme climate and its mechanism[J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 78(9): 2241-2255. doi: 10.11821/dlxb202309008
- Zhang M, Yuan X, Otkin J A. 2020. Remote sensing of the impact of flash drought events on terrestrial carbon dynamics over China[J]. *Carbon Balance and Management*, 15(1): 20. doi: 10.1186/s13021-020-00156-1
- 张强, 姚玉璧, 王莺, 等. 2017. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J]. *生态学报*, 37(21): 7206-7218. Zhang Qiang, Yao Yubi, Wang Ying, et al. 2017. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 37(21): 7206-7218. doi: 10.5846/stxb201608111644
- 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 2018. 1983—2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J]. *地球科学进展*, 33(10): 1048-1057. Zhang Xiang, Chen Nengcheng, Hu Chuli, et al. 2018. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015[J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 33(10): 1048-1057. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.10.1048.
- Zhou J, Wang Y, Su B, et al. 2020. Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment: A case study in China[J]. *Atmospheric Research*, 242: 104979. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104979
- Zhu X, Xin Y, Ge H. 2015. Recursive random forests enable better predictive performance and model interpretation than variable selection by LASSO[J]. *Journal of chemical information and modeling*, 55(4). doi: 10.1021/ci500715e
- Zhu Y, Yang P, Huang H, et al. 2024. How is about the flash drought events and their impacts on vegetation in Central Asia[J]. *Climate Dynamics*, 62(8): 7073-7093. doi: 10.1007/s00382-024-07266-3