

云南气象和土壤干旱至植被干旱传播的累积与滞后效应

张 坤^{1,2}, 李宝芬³

¹云南省水文水资源局, 云南 昆明

²云南省水安全保障重点实验室, 云南 昆明

³云南省水文水资源局昆明分局, 云南 昆明

收稿日期: 2026年2月12日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

摘 要

愈加频繁和严重的干旱对农业生产和生态环境将造成严重影响。对气象干旱到生态农业干旱间传播的特征, 特别是时滞和累积效应进行定量识别, 有助于生态农业干旱监测能力的提升。使用ERA5land再分析数据和AVHRR植被指数数据, 分别获得气象干旱指数(NSPEI)、土壤干旱指数(SSMI)和植被干旱指数(VHI), 分析云南气象、土壤、植被干旱的时空分布特征, 揭示气象干旱到植被干旱、土壤干旱到植被干旱传播的滞后效应和累积效应, 并讨论不同下垫面与不同生态地理区的空间异质性及其主导效应。结果表明: 云南全境均易发生不同程度的气象干旱, 土壤干旱的易发区集中于云南高原的东部和丘陵平原、滇南谷地大部分区域, 丘陵平原的北部和云南高原的西部发生植被干旱的频率较高, 大部分区域均超过0.2的干旱频率。整体来看, 云南气象干旱均呈现不显著变化趋势; 土壤干旱显著加重的区域主要集中于川藏高山东部区域、云南高原西侧与东北侧区域; 植被干旱显著减缓的区域主要集中于云南高原和丘陵平原的大部分区域。气象干旱和土壤干旱向植被干旱传播的累积时长整体低于滞后时长, 川藏高山和云南高原西北部的滞后时间较长(高于18个月), 云南中东部的滞后时间较短(接近1个月)。通过对云南区域不同类型干旱传播过程中累积效应与滞后效应的区域分异性进行分析和主导效应探究, 研究结果可为当地农业(植被)干旱的预警提供理论支持。

关键词

气象干旱, 土壤干旱, 植被干旱, 干旱传播, 累积效应, 滞后效应

Cumulative and Lag Effects of Meteorological and Soil Drought Propagation to Vegetation Drought in Yunnan

Kun Zhang^{1,2}, Baofen Li³

¹Yunnan Provincial Hydrology and Water Resources Bureau, Kunming Yunnan

²Yunnan Provincial Key Laboratory of Water Security Guarantee, Kunming Yunnan

³Kunming Branch of Yunnan Provincial Hydrology and Water Resources Bureau, Kunming Yunnan

文章引用: 张坤, 李宝芬. 云南气象和土壤干旱至植被干旱传播的累积与滞后效应[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 421-432. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152047

Abstract

Increasingly frequent and severe droughts will significantly impact agricultural production and the ecological environment. Quantifying the characteristics of drought propagation from meteorological to agroecological droughts, particularly the time lag and cumulative effects, can enhance the monitoring capability of agroecological droughts. Using ERA5-Land reanalysis data and AVHRR vegetation index data, we derived the meteorological drought index (NSPEI), soil drought index (SSMI), and vegetation drought index (VHI) to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of meteorological, soil, and vegetation droughts in Yunnan. The study reveals the lag and cumulative effects of drought propagation from meteorological to vegetation drought and from soil to vegetation drought, while also discussing spatial heterogeneity and dominant effects across different underlying surfaces and eco-geographical zones. The results indicate that meteorological droughts of varying severity are prone to occur across Yunnan, while soil droughts are concentrated in the eastern Yunnan Plateau, hilly plains, and most parts of the southern Yunnan valleys. Vegetation droughts occur more frequently in the northern hilly plains and western Yunnan Plateau, with drought frequencies exceeding 0.2 in most areas. Overall, meteorological droughts in Yunnan show no significant trend. Areas with a significant intensification of soil drought are primarily located in the eastern part of the Chuan-Tibet mountains, as well as the western and northeastern sides of the Yunnan Plateau. Areas with a significant mitigation of vegetation drought are mainly found in most parts of the Yunnan Plateau and the hilly plains. The cumulative duration of meteorological and soil drought propagation to vegetation drought is generally shorter than the lag duration. The lag time is longer in the Chuan-Tibet mountains and the northwestern Yunnan Plateau (over 18 months), while it is shorter in central and eastern Yunnan (nearly one month). By analyzing the spatial differentiation of cumulative and lag effects during the propagation of different drought types in Yunnan and exploring their dominant effects, the research results can provide theoretical support for early warning of local agricultural (vegetation) drought.

Keywords

Meteorological Drought, Soil Drought, Vegetation Drought, Drought Propagation, Cumulative Effect, Lag Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是最复杂的自然灾害之一, 其发生缓慢, 持续性强, 对社会经济和农业生产造成了严重的损失[1]。越来越多的证据表明, 气候变化背景下, 全球气候极端事件的强度、持续时间和频率会进一步增加[2]。随着全球气候变暖, 干旱的风险呈显著增加趋势[3]。目前, 针对干旱监测的研究主要集中于气象、水文和农业干旱上, 但干旱也会对植被生态系统造成深远的影响[4]。植被作为地表生态系统的重要组成部分, 是环境条件与人类长期活动共同作用的结果[5]。气候变化导致植被生长状态、土壤水分含量等发生改变, 进而对地表生态环境产生重要影响, 目前已成为社会各界和国际组织关注的热点问题[6]。在全

球气候变暖背景下, 植被生长过程的水热条件会受到影响并导致植被生长规律发生变化, 进而引起生态系统物质循环过程的改变[7]。生态干旱指标反映了植被水热状态, 目前已逐渐成为主要的干旱类型之一。干旱是复杂的综合性问题, 涉及到地表各个圈层的物质与能量循环。在其中贯穿着干旱传播的过程, 并演变为不同类型的干旱, 进而影响到自然环境以及人类社会[8]。1950年以来中国每年有超过2020万公顷作物受到干旱影响, 而植被(农业)干旱的源头是气象干旱[9]。因此, 深入了解从其它类型干旱到植被干旱的传播规律及其影响因素, 对农业旱灾的预警具有重要参考价值。

干旱传播是不同类型干旱在时空演化过程中的中间环节, 其现象由Changnon [10]最先发现。Eltahir [11]将气象干旱至水文干旱的转化过程首次定义为干旱传播。大气圈中降水亏缺和高温热浪等异常气候状况首先导致气象干旱现象的产生。之后在水气交互以及下垫面等因素的共同作用下传播为水文、农业等其它类型的干旱, 其传播具有滞后时间和累积时间等特征[12]。使用最大相关系数作为评价不同时间尺度气象干旱指数(要素)与其它类型干旱(植被)之间关系的方法在近年来已经被广泛使用。累积的时间尺度(滞后的月份)通常被用作表征干旱传播的累积(滞后)特征[12] [13]。已有学者在全球尺度研究了气候因素对植被生长影响的滞后和累积效应[14]。Jiang 等[15]在长江流域与黄河流域对比了气候因子对植被的滞后和累积效应。结果表明气候因素对植被的生长阶段具有滞后或累积效应, 但由于地区和植被类型的不同, 呈现出的效应具有一定差异。已有许多研究分析了SPEI和植被初级生产净值(GPP), 植被物候期间的滞后或累积性[16] [17]。例如, 在黄河流域的研究表明, 滞后和累积时长多集中于短期(1~3个月), 并且草地和植被受到的影响要强于林地[12] [18]。同一植被的滞后和累积效应的时长有所差异[13], 而不同类型植被对干旱的反馈亦存在不同[14]。

在针对不同类型干旱传播的研究中, 主要集中于气象干旱对农业干旱和气象干旱对水文干旱两个方面[8]。例如, 美国中西部的农业干旱对气象干旱的短期响应更明显[19]。中国北部的滞后与累积时长主要在9-10个月[20]。西北半干旱地区的农业干旱对气象干旱响应最强[21]。在黄河流域的研究表明, 水利用率低的区域受滞后与累积的时长更短[12]。而水文干旱对气象干旱响应的研究大多在流域尺度。目前针对中国区域的干旱传播研究, 并且在探究干旱传播时大多仅考虑到滞后或者累积效应, 较少考虑到两种效应之间的差异, 且大多仅限于地貌单元或流域尺度[15]。这样难以在大范围上了解不同植被对干旱传播响应的特征, 所使用的气象干旱指数大多也未考虑到非平稳性。

因此, 本研究基于ERA5land再分析数据的降水、气温、土壤湿度等变量分别计算气象干旱指标NSPEI和土壤干旱指标SSMI, 选择AVHRR遥感指数产品VHI作为植被干旱指标, 了解1982~2022年期间各类干旱在不同生态地理分区下的差异化空间分布格局; 从全时间序列的角度分析各类干旱的在不同时间尺度的频率、趋势等特征; 采用最大相关性法, 考虑干旱传播的累积效应与滞后效应, 分别确定各类型干旱之间的传播时间; 对比累积效应与滞后效应的差异, 确定各个生态地理区的主导效应。研究结果以期为当地植被旱灾的预警提供理论依据。

2. 研究数据与方法

2.1. 研究数据

用于计算非平稳性标准化降水蒸散发指数, 标准化土壤湿度指数, 大气水汽压差的数据均来自于欧洲中期天气预报中心European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>)数据集中的“2m dewpoint temperature, 2m temperature, Total precipitation 和 Volumetric soil water layer 2”变量。植被健康指数来自于美国大气海洋中心National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vhftp.php>)的Global Vegetation Health Products; 净生态

系统生产力数据来源于国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>)。植被分类数据选择采用 IGBP 分类标准的 MCD12Q1 的土地分类产品(<http://lpdaacsvc.cr.usgs.gov>), 选择最新年度(2020)的数据。海拔高程和气候区划依据中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)。将研究区范围分为 4 个生态地理区, 分别为川藏高山区、云南高原区、丘陵平原区和滇南谷地(图 1)。各类土地覆盖类型的对照见表 1。

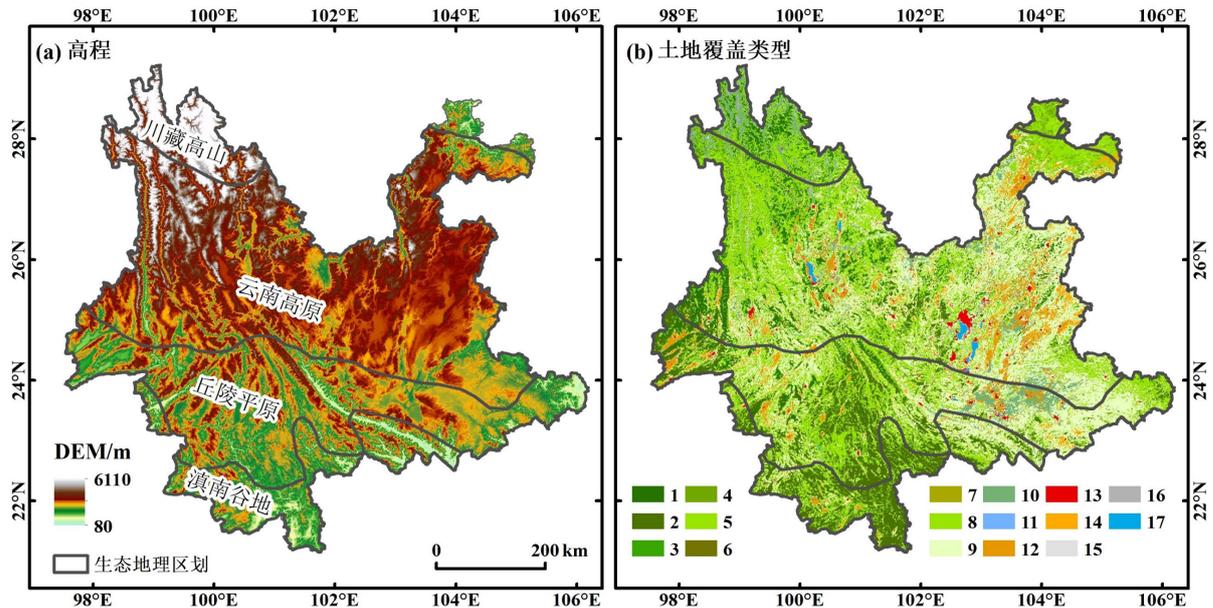


Figure 1. Location of the study area (Approval number: GS (2026)1760)
图 1. 研究区概况图(审图号: GS(2026)1760 号)

2.2. 研究方法

2.2.1. 非平稳标准化降水蒸散指数(NSPEI)

气象干旱指标方面, 基于以往的研究[22], 选择具有多长时间尺度以及考虑气象水文要素的非平稳性的气象干旱指数(NSPEI)。标准化降水蒸散指数(SPEI)由于其考虑蒸散发和具备多时间尺度的优势, 已在气象干旱监测方面取得了广泛应用[23]。随着极端气候事件发生的频率逐渐增加, 在干旱监测指标中考虑非平稳性已越来越重要[8][24]。NSPEI 的计算采用基于时变位置参数 Log-logistic 概率分布函数, 对时变的降水与蒸散发差值进行拟合, 从而更好地反映植被指数对非平稳性气象干旱的恢复特征, 计算过程以及干旱分类的标准见(表 1)。本研究据此计算了 1980~2022 年, 1~24 个月尺度逐月的 NSPEI, 作为气象干旱监测指标。使用 NSPEI-3 表征季节性干旱, 使用 NSPEI-12 表征年际干旱。

Table 1. Drought classification based on NSPEI and SSMI
表 1. 依据 NSPEI 和 SSMI 的干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	极端干旱
NSPEI	(-0.5, +∞)	(-1.0, -0]	(-1.5, -1.0]	(-2.0, -1.5]	(-∞, -2.0]
SSMI	(-0.5, +∞)	(-1.0, -0]	(-1.5, -1.0]	(-2.0, -1.5]	(-∞, -2.0]

NSPEI 和 SPEI 计算过程的差异在于, NSPEI 采用 Log-logistic 概率分布函数对时变 D_t 进行拟合。使用平滑样条函数以拟合降水和蒸散发的差值(D_t)。

$$f_{ss}(D_t) = \sum_{t=1}^n [D_t - f(D_t)]^2 + h \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} [f''(D_t)]^2 dt \quad (1)$$

$$\gamma_{D_t} = f_{ss}(D_t) \quad (2)$$

f_{ss} 是 D_t 的平滑样条拟合函数, h 是平滑参数; $t=1, 2, \dots, n$, 月份。 γ_{D_t} 为 Log-logistic 函数中的位置参数。

2.2.2. 标准化土壤湿度指数(SSMI)

土壤水分与植被生长息息相关, 已有研究证明了选择 SSMI 作为土壤干旱监测指标的适用性[25][26]。标准化土壤湿度指数 SSMI 的计算原理与标准化降水指数(SPI)类似, 先前的研究表明[27], GEV 分布函数适合作为中国土壤水分数据的拟合函数。因此本研究的研究选择 GEV 函数进行土壤水分的拟合, 并计算 1 个月时间尺度的 SSMI。与 NSPEI 的计算一致, SSMI 的计算同样使用 ERA5land 再分析数据集的月度 7~28 cm 表层土壤深度的水分变量[28], 空间分辨率为 0.1°。

$$SSMI = W - \frac{C_0 + C_2 + C_3 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (3)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln P}$$

其中 $C_0=2.515517$, $C_1=0.802853$, $C_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_3=0.001308$ 。当 $P \leq 0.5$, 时 $P=F(x)$, $P > 0.5$ 时, $P=1-F(x)$ 。

2.2.3. 植被健康指数(VHI)

在植被状态监测方面, 植被状态指数(VCI), 以及反映与温度相关植被胁迫的温度条件指数(TCI)表明其能够有效地监测大尺度区域植被的干旱。Kogan 等[29]提出的 VHI 结合了 VCI 和 TCI 的优点, 是专为监测农业干旱开发的遥感植被指数。VHI 的空间分辨率为 4 km, 时间分辨率为 8 d。为了与 ERA5land 再分析数据进行匹配, 使用双线性法将 VHI 的空间分辨率重采样至 0.1°, 使用最大值合成法(MVC)将 VHI 合成为月度时间尺度。以上 3 种干旱指数的时间范围均统一为 1982 年 1 月至 2022 年 12 月(表 2)。

Table 2. Drought classification based on VHI

表 2. 依据 VHI 的干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	极端干旱
VHI	(40, 100)	(30, 40]	(20, 30]	(10, 20]	(0, 10]

2.2.4. 干旱特征分析

(1) 干旱频率

其中干旱频率 P 的计算, 见公式(4)。本研究分析了不同程度干旱发生的频率以评估气象干旱和农业干旱的空间分布特征。

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中: n 为研究时段发生干旱的月份, N 为时段总长度。

(2) Sen 趋势分析

相对于简单的线性回归分析, Sen 提出的斜率估计法可以减少异常值的影响, 见公式(5)。本研究据此逐像元估计 3 类干旱的时间趋势。配合 MK 检验方法检验数据时间序列上的显著性 P 值。

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_k - x_i}{k - i}\right), k > i \quad (5)$$

式中: β 为变化趋势, x_k 和 x_i 分别为时间 k 和 i 时的值, Median 是中位数函数。 β 大于或小于 0 分别表示时间序列呈上升或下降趋势。

(3) MK 检验

Mann-Kendall 检验是提取序列变化趋势的有效工具, 被广泛应用于气候参数和水文序列的分析。 本论文主要采用非参数 M-K 趋势突变检验法来评估水文气候要素时间序列趋势变化, M-K 非参数检验方法以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称, 其检验统计量公式是:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (6)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数, 当 $X_i - X_j$ 小于、等于或者大于零时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 -1、0 和 1; M-K 统计量公式 S 大于、等于、小于零时分别:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z 为正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28、1.96、2.32 时分别通过了信度 90%、95%、99% 显著性检验。

2.2.5. 最大相关性法确定累积与滞后效应

本研究分别计算 1~24 月份的 1 个月时间尺度的 NSPEI, 1~24 个月时间尺度的 NSPEI 与 VHI 的最大相关系数, 所对应的月份(时间尺度)代表气象干旱对生态干旱的滞后和累积效应。 本研究将据此评估两种干旱传播的滞后性和累积性, 以及二者的差异。

$$R_lag_i = \text{corr}(VHI, NSPEI_i) 1 \leq i \leq 24 \quad (8)$$

$$R_{\max_lag} = \max(R_lag_i) 1 \leq i \leq 24 \quad (9)$$

R_lag_i 是 VHI 和滞后的 NSPEI 时间序列的皮尔逊相关系数, i 是第 i 个月, VHI 代表 VHI 时间序列, $NSPEI_i$ 是 1 个月时间尺度的 NSPEI 滞后月份。

$$R_cum_j = \text{corr}(VHI, NSPEI_j) 1 \leq j \leq 24 \quad (10)$$

$$R_{\max_cum} = \max(R_cum_j) 1 \leq j \leq 24 \quad (11)$$

R_cum_j 是 VHI 和累积的 NSPEI 时间序列的皮尔逊相关系数, j 是累积的时间尺度, VHI 代表 VHI 时间序列, $NSPEI_j$ 是累积 j 长度时间尺度的 NSPEI。

3. 结果与分析

准确掌握不同类型干旱发生的时空特征是探究干旱传播响应工作的基础。 在不同程度的气象干旱、土壤干旱和植被干旱中, 云南整体上发生中度干旱的频率最高, 发生极端干旱的频率最低。 从不同生态地理区上看, 云南高原西部和丘陵平原南部发生中度气象干旱的频率超过 0.2 (图 2)。 云南高原中部和丘陵平原西南部发生中度土壤干旱的频率较高。 川藏高山易发生轻度植被干旱。 云南全境均易发生不同程度的气象干旱。 土壤干旱的易发区集中于云南高原的东部和丘陵平原、滇南谷地大部分区域。 丘陵平原的北部和云南高原的西部发生植被干旱的频率较高, 大部分区域均超过 0.2 的干旱频率。

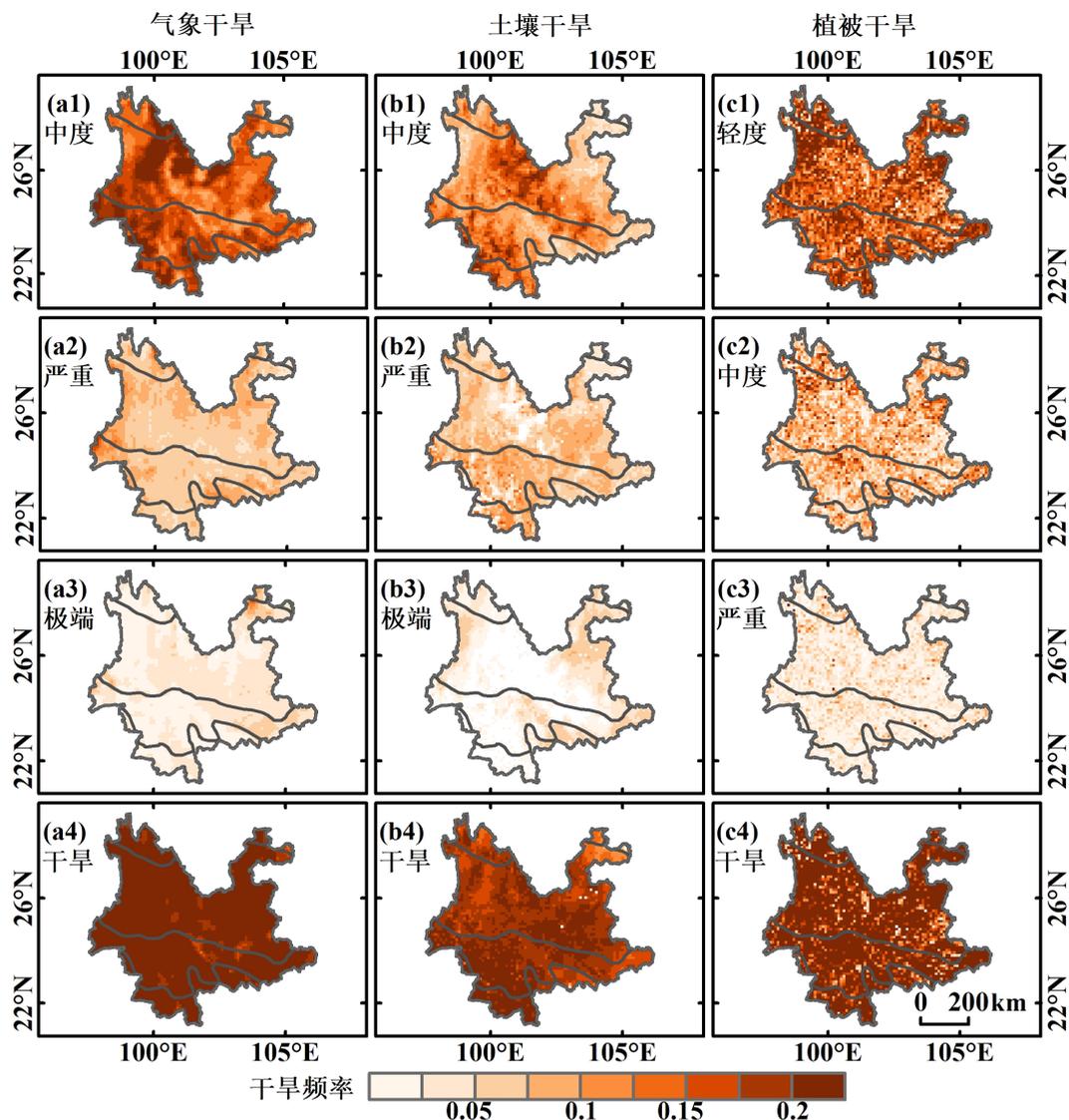


Figure 2. Occurrence frequency of meteorological, soil, and vegetation droughts at different severity levels
图 2. 不同程度气象、土壤和植被干旱的发生频率

整体来看, 云南气象干旱均呈现不显著变化趋势, 不显著加重和不显著减缓的区域约占 81% (图 3)。从生态地理区来看, 1982~2022 年以来气象干旱加重趋势的区域多分布于川藏高山和云南高原的东北部区域。云南大部分区域(98%)的土壤干旱则呈现加重趋势, 其中 44% 的区域显著加重($P < 0.05$)。土壤干旱显著加重的区域重要集中于川藏高山东部区域、云南高原西侧与东北侧区域。其余有 2% 的区域呈现不显著减缓趋势, 主要集中于滇南谷地南侧。植被干旱超过 73% 的区域呈现减缓趋势, 其中高达 64% 的区域呈现显著减缓趋势($P < 0.05$)。显著减缓的区域主要集中于云南高原和丘陵平原的大部分区域。但植被干旱在云南高原东南部和滇南谷地东部仍出现了显著加重区域集中分布的情况, 约占研究区域面积的 19%。

干旱在不同类型之间的传播并非即时完成, 而是一个伴随显著时间延迟的复杂过程, 其中主要包含累积效应与滞后效应两种特征。为定量识别这两种效应, 本研究采用最大相关性法, 分别计算了 1 至 24 个月时间尺度的气象干旱指数(NSPEI)、土壤干旱指数(SSMI)与植被干旱指数(VHI)之间的皮尔逊相关系数, 以最大相关系数所对应的月份(滞后时长)或时间尺度(累积时长)来表征传播过程的关键时间属性。在

气象干旱向植被干旱的传播过程中(图 4), 两种效应均表现出明显的时空分异。就累积效应而言, 全区平均累积时长约为 10.5 个月, 空间上主要集中于 10 至 11 个月。具体来看, 丘陵平原区在 10 个月累积尺度上占比最高, 表明该区域植被生长更易受近一年内气象干旱累积水分亏缺的调控; 而滇南谷地在 11 个月累积尺度上占比最高, 暗示其植被对更长期气象干旱累积的响应更为敏感。在滞后效应方面, 滞后时长以 1 至 6 个月的短时间尺度为主导。丘陵平原区在滞后 3 个月的像元占比最高, 说明该区域植被生长对当季或前一季的气象干旱响应最为迅速。空间对比显示, 川藏高山区和云南高原西北部部分区域的滞后时间显著延长, 可达 18 个月以上, 这反映了高寒或地形复杂区域植被生态系统对气象干旱响应的严重延迟; 而云南中东部多数区域滞后时间较短, 接近 1 个月, 表明这些地区的植被对气象变化的响应更为直接和快速。总体比较累积与滞后时长, 在大部分区域, 累积时长普遍长于滞后时长, 这说明气象干旱对植被的影响更多是通过前期持续的水分胁迫累积实现的, 而非单一月份的极端干旱事件所驱动。

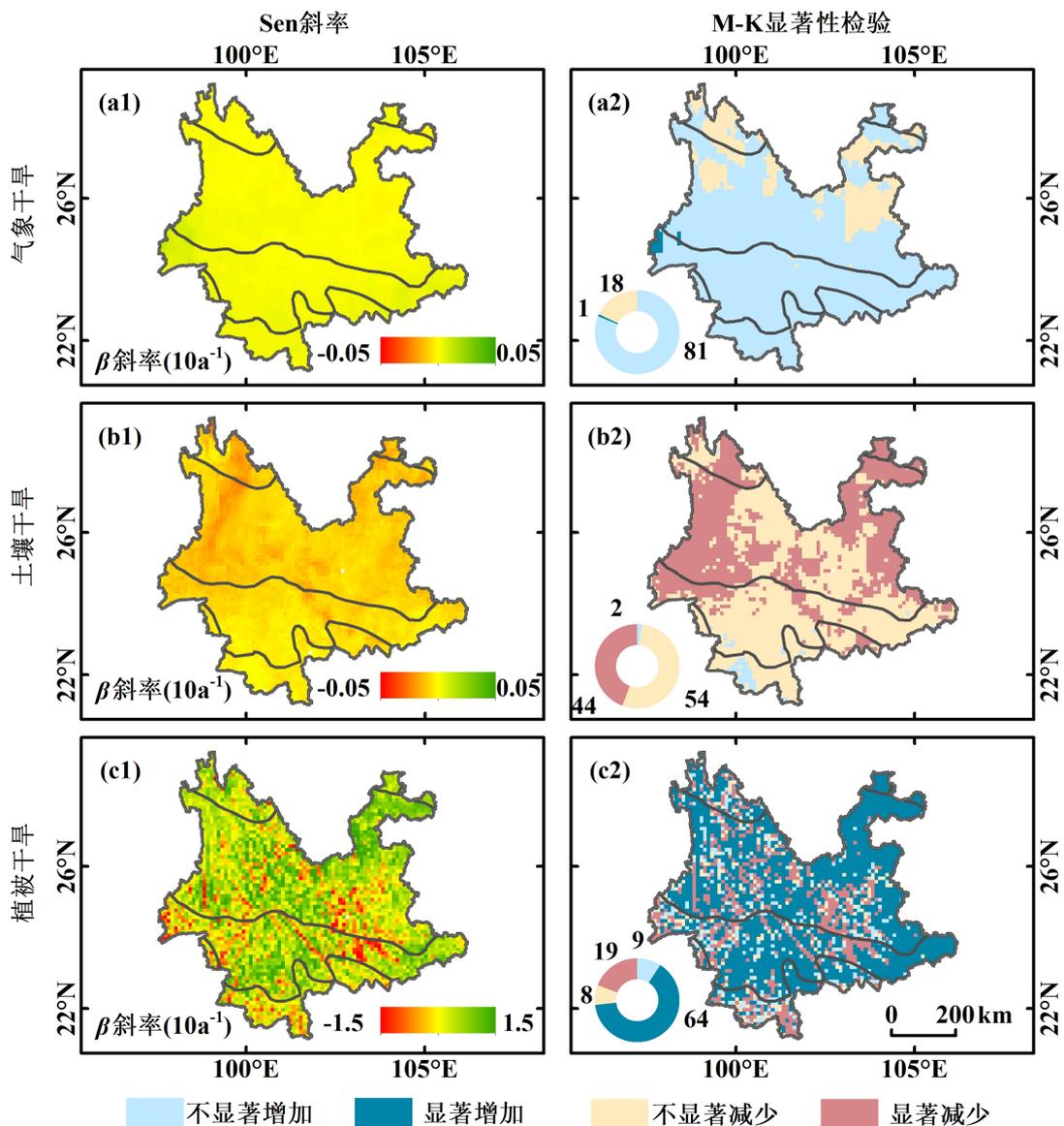


Figure 3. Trends and significance of meteorological, soil, and vegetation droughts
图 3. 气象、土壤和植被干旱的变化趋势及显著性

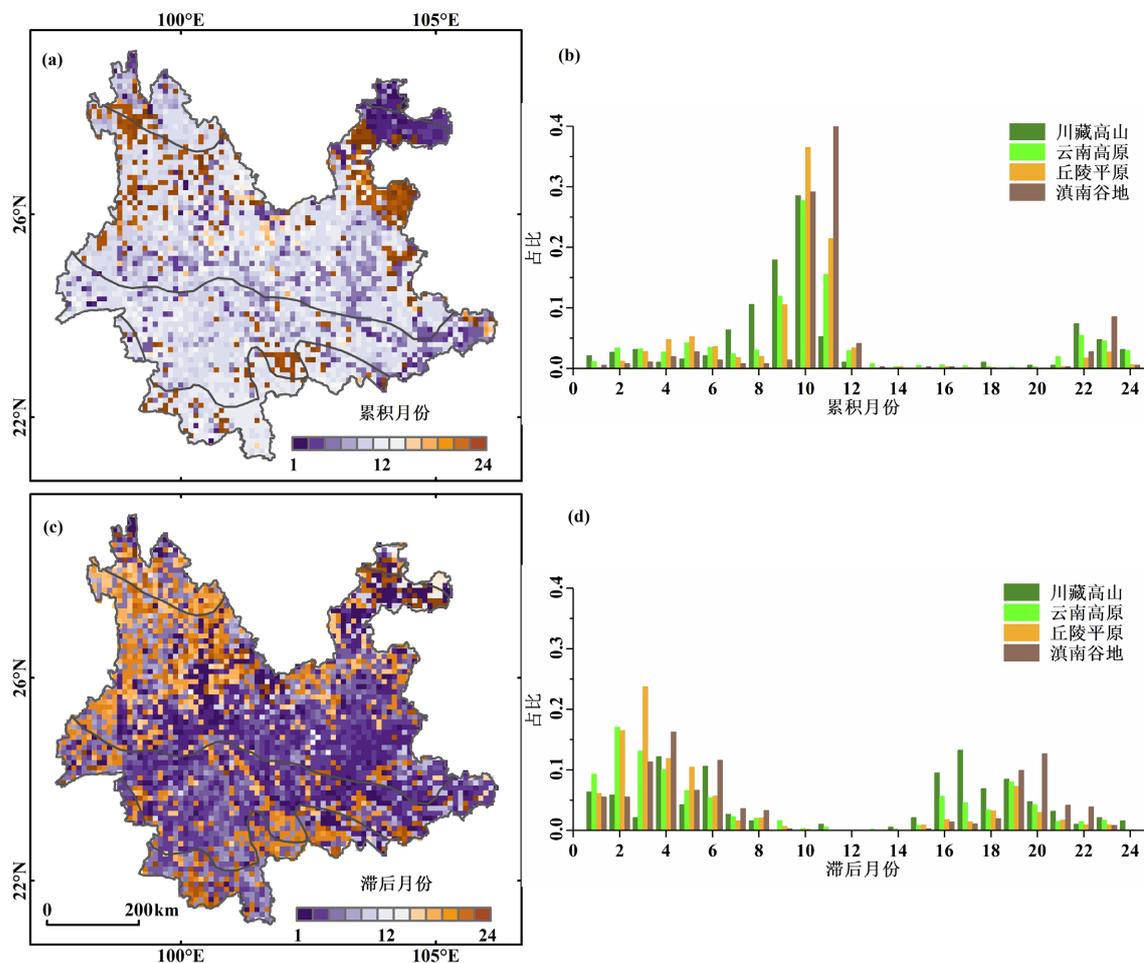


Figure 4. The cumulative duration and lag duration of meteorological drought to vegetation drought propagation
图 4. 气象干旱向植被干旱传播的累积时长与滞后时长

土壤干旱作为连接气象条件与植被生长的关键环节，其向植被干旱的传播时间特征与气象干旱有所不同(图 5)。分析表明，土壤干旱向植被干旱传播的平均累积时长整体上低于平均滞后时长。这意味着植被生长更直接地依赖于某一特定前期的土壤水分状况，而对长期土壤水分亏缺累积的依赖性相对较弱。从空间格局看，传播时间存在显著异质性。在云南高原大部和丘陵平原，滞后时长集中在 3~6 个月，这与主要作物的生长周期和根系水分吸收特征较为吻合；而在滇南谷地的部分区域和川藏高山区，滞后时间可达 9 个月以上，可能与深层土壤水补给缓慢、植被生理适应策略或多年生植被占主导有关。

为进一步揭示不同区域干旱传播机制的主导过程，本研究通过对比同一像元上累积效应与滞后效应的相对强度(以最大相关系数为指标)，识别了干旱传播的主导效应(图 6)。丘陵平原、滇南谷地大部及云南高原东南部主要以累积效应为主导，表明这些区域植被受前期连续干旱条件的影响更大，干旱影响的“记忆力”较长；而川藏高山、云南高原西北部及部分零散区域则以滞后效应为主导，说明这些区域植被生长更关键地依赖于某个特定前期时段的干旱状态，响应具有更强的“事件性”。这种主导效应的空间分异受到植被类型、土壤特性、地形气候及人类活动的综合控制。例如，生长迅速的一年生农作物或草地往往对短期水分胁迫(滞后效应)更敏感；而深根系森林或多年生植被可能更依赖长期水分储备(累积效应)。持水能力强的土壤可能延长干旱传播的累积时间，而砂质土则可能使滞后效应更突出。山区复杂的地形与水文过程可能显著延长滞后时间，而灌溉等人类活动则可能改变或打断自然的干旱传播路径。

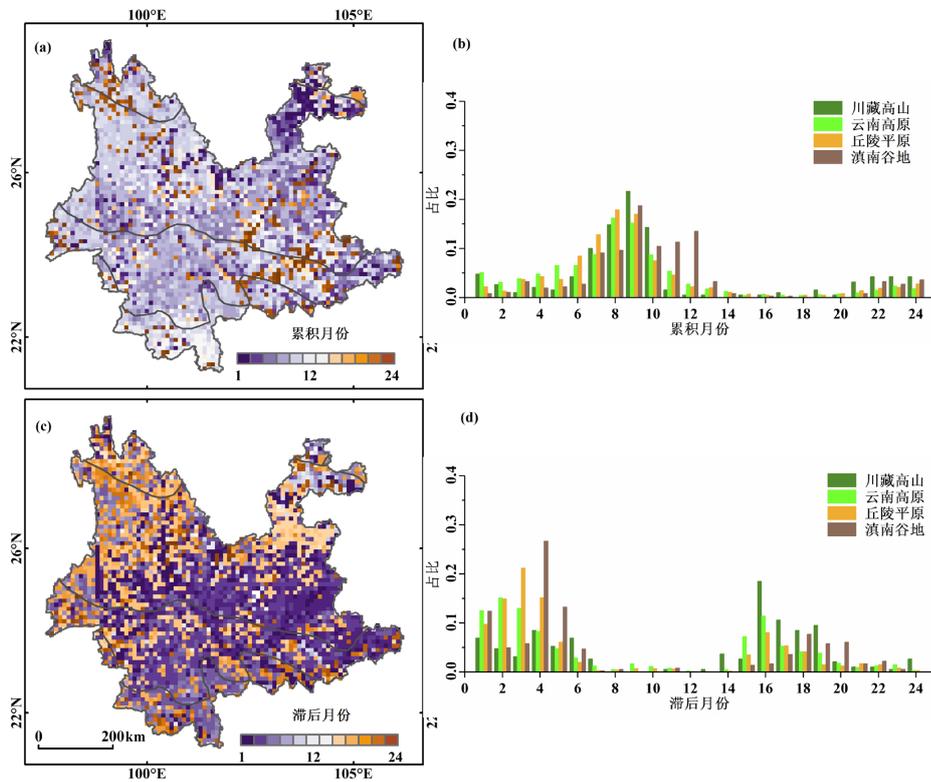


Figure 5. The cumulative duration and lag duration of soil drought to vegetation drought propagation
图 5. 土壤干旱向植被干旱传播的累积时长与滞后时长

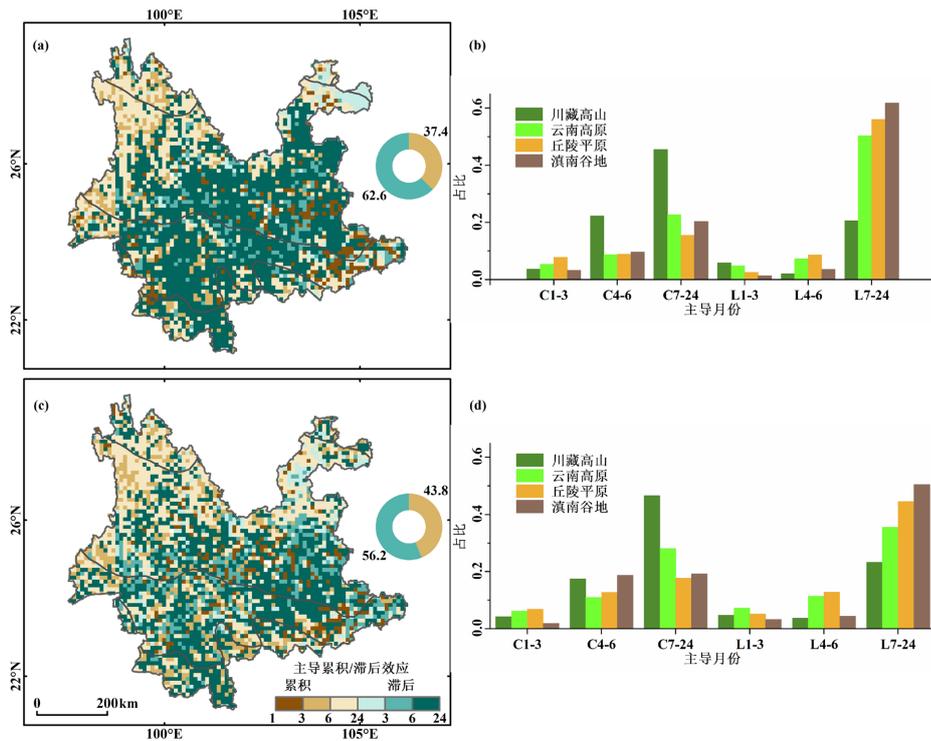


Figure 6. The dominant effect of meteorological drought and soil drought on vegetation drought propagation
图 6. 气象干旱、土壤干旱向植被干旱传播的主导效应

4. 结论

本研究基于 ERA5-Land 再分析数据和 AVHRR 遥感植被指数, 系统分析了 1982~2022 年云南地区气象干旱、土壤干旱与植被干旱的时空演变特征, 并重点揭示了从气象干旱、土壤干旱到植被干旱传播过程中的累积效应与滞后效应。主要结论如下:

(1) 气象干旱在全境普遍易发但趋势不显著; 土壤干旱在近一半区域显著加重, 空间上集中于高原边缘与川藏高山东部; 植被干旱则在大部分区域显著减缓, 仅局部出现加重, 反映出干旱影响在不同圈层传递中的复杂性与植被可能的适应性响应。

(2) 气象干旱的影响更多表现为长期累积效应(约 10~11 个月), 而土壤干旱的影响则更侧重于滞后效应(多 3~6 个月)。空间上, 丘陵平原与滇南谷地以累积效应主导, 而川藏高山与云南高原西北部以滞后效应主导, 这种分异受植被类型、土壤属性及地形气候的综合调控。

本研究通过融合非平稳性干旱指数与最大相关分析法, 定量揭示了干旱传播中时间累积与事件滞后的双重机制, 为理解干旱在大气-土壤-植被系统中的传递路径提供了新的视角, 对构建考虑区域异质性与主导效应的生态农业干旱动态预警系统具有重要的方法论价值与实践指导意义。

参考文献

- [1] Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2010) A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, **391**, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- [2] Deng, Y., Wang, X., Wang, K., Ciais, P., Tang, S., Jin, L., et al. (2021) Responses of Vegetation Greenness and Carbon Cycle to Extreme Droughts in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **298**, Article 108307. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108307>
- [3] Wang, T., Tu, X., Singh, V.P., Chen, X. and Lin, K. (2021) Global Data Assessment and Analysis of Drought Characteristics Based on Cmp6. *Journal of Hydrology*, **596**, Article 126091. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126091>
- [4] Wang, Y., Zhou, H., Huang, J., Yu, J. and Yuan, Y. (2023) A Framework for Identifying Propagation from Meteorological to Ecological Drought Events. *Journal of Hydrology*, **625**, Article 130142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130142>
- [5] 张华, 徐存刚, 王浩. 2001-2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J]. *地理科学*, 2020, 40(6): 1029-1038.
- [6] 张晓东, 朱文博, 张静静, 等. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 41-53.
- [7] 刘玉洁, 葛全胜, 戴君虎. 全球变化下作物物候研究进展[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 14-24.
- [8] Zhang, X., Hao, Z., Singh, V.P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., et al. (2022) Drought Propagation under Global Warming: Characteristics, Approaches, Processes, and Controlling Factors. *Science of The Total Environment*, **838**, Article 156021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156021>
- [9] Li, Y., Huang, S., Wang, H., Zheng, X., Huang, Q., Deng, M., et al. (2022) High-Resolution Propagation Time from Meteorological to Agricultural Drought at Multiple Levels and Spatiotemporal Scales. *Agricultural Water Management*, **262**, Article 107428. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107428>
- [10] Changnon, S.A. (1987) Detecting Drought Conditions in Illinois. Board of Trustees of the University of Illinois: Illinois State Water Survey.
- [11] Eltahir, E.A.B. and Yeh, P.J.-F. (1999) On the Asymmetric Response of Aquifer Water Level to Floods and Droughts in Illinois. *Water Resources Research*, **35**, 1199-1217. <https://doi.org/10.1029/1998wr900071>
- [12] Zhan, C., Liang, C., Zhao, L., Jiang, S., Niu, K. and Zhang, Y. (2022) Drought-Related Cumulative and Time-Lag Effects on Vegetation Dynamics across the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, **143**, Article 109409. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109409>
- [13] Zhao, A., Yu, Q., Feng, L., Zhang, A. and Pei, T. (2020) Evaluating the Cumulative and Time-Lag Effects of Drought on Grassland Vegetation: A Case Study in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, **261**, Article 110214. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110214>
- [14] Ding, Y., Xu, J., Wang, X., Peng, X. and Cai, H. (2020) Spatial and Temporal Effects of Drought on Chinese Vegetation under Different Coverage Levels. *Science of The Total Environment*, **716**, Article 137166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137166>

- [15] Jiang, W., Niu, Z., Wang, L., Yao, R., Gui, X., Xiang, F., *et al.* (2022) Impacts of Drought and Climatic Factors on Vegetation Dynamics in the Yellow River Basin and Yangtze River Basin, China. *Remote Sensing*, **14**, Article 930. <https://doi.org/10.3390/rs14040930>
- [16] Bai, Y. and Li, S. (2022) Growth Peak of Vegetation and Its Response to Drought on the Mongolian Plateau. *Ecological Indicators*, **141**, Article 109150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109150>
- [17] Ge, C., Sun, S., Yao, R., Sun, P., Li, M. and Bian, Y. (2022) Long-Term Vegetation Phenology Changes and Response to Multi-Scale Meteorological Drought on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, **614**, Article 128605. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128605>
- [18] Shi, X., Chen, F., Ding, H., Li, Y. and Shi, M. (2022) Quantifying Vegetation Stability under Drought in the Middle Reaches of Yellow River Basin, China. *Forests*, **13**, Article 1138. <https://doi.org/10.3390/f13071138>
- [19] Zhong, S., Sun, Z. and Di, L. (2021) Characteristics of Vegetation Response to Drought in the CONUS Based on Long-Term Remote Sensing and Meteorological Data. *Ecological Indicators*, **127**, Article 107767. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107767>
- [20] Xu, H., Wang, X. and Zhao, C. (2021) Drought Sensitivity of Vegetation Photosynthesis along the Aridity Gradient in Northern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **102**, Article 102418. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102418>
- [21] Cao, S., Zhang, L., He, Y., Zhang, Y., Chen, Y., Yao, S., *et al.* (2022) Effects and Contributions of Meteorological Drought on Agricultural Drought under Different Climatic Zones and Vegetation Types in Northwest China. *Science of The Total Environment*, **821**, Article 153270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153270>
- [22] Sun, P., Ge, C., Yao, R., Bian, Y., Yang, H., Zhang, Q., *et al.* (2024) Development of a Nonstationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI) and Its Application across China. *Atmospheric Research*, **300**, Article 107256. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107256>
- [23] Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, **23**, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>
- [24] Zha, X., Xiong, L., Liu, C., Shu, P. and Xiong, B. (2023) Identification and Evaluation of Soil Moisture Flash Drought by a Nonstationary Framework Considering Climate and Land Cover Changes. *Science of The Total Environment*, **856**, Article 158953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158953>
- [25] Carrão, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G. and Barbosa, P. (2016) An Empirical Standardized Soil Moisture Index for Agricultural Drought Assessment from Remotely Sensed Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **48**, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.011>
- [26] Xu, Y., Wang, L., Ross, K., Liu, C. and Berry, K. (2018) Standardized Soil Moisture Index for Drought Monitoring Based on Soil Moisture Active Passive Observations and 36 Years of North American Land Data Assimilation System Data: A Case Study in the Southeast United States. *Remote Sensing*, **10**, Article 301. <https://doi.org/10.3390/rs10020301>
- [27] Sun, P., Liu, R., Yao, R., Shen, H. and Bian, Y. (2023) Responses of Agricultural Drought to Meteorological Drought under Different Climatic Zones and Vegetation Types. *Journal of Hydrology*, **619**, Article 129305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129305>
- [28] Li, L., Wu, D., Wang, T. and Wang, Y. (2022) Effect of Topography on Spatiotemporal Patterns of Soil Moisture in a Mountainous Region of Northwest China. *Geoderma Regional*, **28**, e00456. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00456>
- [29] Kogan, F.N. (1995) Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection. *Advances in Space Research*, **15**, 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-t](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-t)