

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.005; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.005.

赵彦颜, 张璇, 许杨, 等. 干旱半干旱地区气象干旱到农业干旱的传播阈值研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 234-243.

Zhao Yanyan, Zhang Xuan, Xu Yang, et al. Study on the propagation thresholds from meteorological drought to agricultural drought in arid and semi-arid region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 234-243.

干旱半干旱地区气象干旱到农业干旱的传播阈值研究

赵彦颜¹, 张璇¹, 许杨², 赵乾佐¹, 李冲¹, 郝芳华¹

(1.北京师范大学 水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,
北京 100875; 2.清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: [目的]探究不同类型的干旱传播顺序与传播阈值,为干旱监测、预测与早期预警提供科学依据。[方法]以东北亚干旱半干旱区为研究区,采用标准化干旱指数(SPEI)表征气象干旱,采用标准化土壤湿度指数(SSMI)和标准化归一化植被指数(SNDVI)从土壤水和植被角度表征了农业干旱,利用游程理论识别干旱事件及其特征并进行干旱事件匹配,基于 Copula 函数确定了干旱传播阈值。[结果](1) 1982—2014 年研究区域干旱呈现加剧趋势,气象干旱和土壤干旱加剧趋势大于植被干旱;(2) 气象干旱到土壤干旱的传播率和平均传播时间大于植被干旱,传播次序为气象干旱传播到植被干旱再到土壤干旱;(3) 干旱传播阈值随干旱等级的增大而增大,该地区气象干旱到土壤干旱的传播阈值小于植被干旱。[结论]东北亚干旱半干旱区因气象干旱引发的农业干旱威胁粮食安全与生态安全,土壤与植被之间的干旱传播规律与传播阈值存在差异,应因地制宜地制定生态防护及修复措施。

关键词: 气象干旱; 农业干旱; 干旱传播; 传播阈值; Copula

中图分类号: P429

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0234-10

Study on the propagation thresholds from meteorological drought to agricultural drought in arid and semi-arid region

Zhao Yanyan¹, Zhang Xuan¹, Xu Yang², Zhao Qianzuo¹, Li Chong¹, Hao Fanghua¹

(1.Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology,

College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the order of drought propagation and propagation thresholds of different types of droughts, and to provide scientific reference for monitoring, prediction and early warning. [Methods] The arid and semi-arid region of Northeast Asia was taken as the study area. Standardized precipitation evapotranspiration index was used to characterize meteorological drought. Standardized soil moisture index and normalized difference vegetation index were used to characterize agricultural droughts from the perspectives of soil moisture and vegetation. The Run theory was used to identify drought events and their characteristics and to match drought events. The thresholds for drought propagation were determined based on the Copula function. [Results] (1) Drought in the study area showed an increasing trend from 1982 to 2014. The increasing trend of meteorological drought and soil moisture drought was greater than that of vegetation drought. (2) The propagation rate and average propagation time of meteorological drought to soil moisture drought was greater than that of vegetation drought, and the sequence of propagation was as follows: meteorological drought propagated to vegetation drought to soil

收稿日期: 2024-03-20

修回日期: 2024-05-22

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“基于生态和水文响应的干旱传播机制研究”(42271023)

第一作者: 赵彦颜(1999—), 女, 河南濮阳人, 硕士, 研究方向为生态水文学。E-mail: zhaoyanyan2021@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张璇(1984—), 女, 河南安阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事流域水环境管理、绿色发展与环境规划、面源污染与管理控制研究。
E-mail: xuan@bnu.edu.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

water drought. The thresholds of drought propagation increased with the increase of drought level. (3) The propagation threshold from meteorological drought to soil moisture drought in this area was smaller than that of vegetation drought. [Conclusion] Agricultural drought triggered by meteorological drought in the arid and semi-arid region of Northeast Asia threatens food security and ecological safety. There are differences in drought propagation patterns and propagation thresholds between soils and vegetation, so that ecological protection and restoration measures should be formulated according to local conditions.

Keywords: meteorological drought; agricultural drought; drought propagation; drought thresholds; Copula

干旱是指一段时期内,特定区域降水量明显低于正常状态导致水分收支失衡而引起的一种水资源短缺现象,是世界上最具有破坏性的自然灾害之一^[1],具有持续时间长、发生频繁、影响范围广等特点,对农业、生态和社会经济都具有毁灭性影响^[2]。在气候变化和社会经济快速发展的背景下,水资源短缺问题更为显著,干旱有可能变得更加严重和频繁^[3]。其中,干旱半干旱地区生态环境对气候变化的响应较为敏感^[4]。在温度持续上升的影响下,降水的减少和潜在蒸散发的增加进一步加剧了干旱半干旱地区的扩张^[5],气候变化造成的影响更为频繁、危害更为严重。

一般而言,干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型,分别表示降水、土壤湿度、河川径流和社会发展用水的亏缺^[6]。已有研究表明,不同类型的干旱之间存在较强的联系,当达到某些特定条件时,气象干旱会触发其他类型的干旱^[7],这种现象被称为干旱传播。降水的相对不足加上较高的蒸散发触发气象干旱,长时间的降水亏缺,导致土壤水缺乏补给,造成水分亏缺,影响植被生长及陆地生态系统,甚至引发农业干旱。由于土壤系统的水分动态变化具有长记忆特征,受早期土壤水分的影响,前期土壤水分充足的条件下,小规模气象干旱可能无法触发农业干旱,因此气象干旱向农业干旱的传播需要一定的触发条件,气象干旱只有在保持一定的强度并持续足够长的时间时才能引起严重的农业干旱。干旱作为植被蒸腾和光合作用的主要限制因素,直接影响着作物生产^[8],干旱程度决定了植被覆盖度的类型和结构,对植被生长和恢复、土地退化等具有重要影响。在气候变化的影响下,干旱强度和频率的增加大大降低了植被生产力^[9],对社会经济造成巨大损害。因此,从土壤水和植被两个角度出发,探究气象干旱到农业干旱的传播特征,对干旱的早期预警与应对措施的制定具有重要意义。

相关性分析作为一种理解不同类型干旱传播的基本工具,在气象干旱与水文干旱、农业干旱的研究中得到了广泛的应用^[3]。然而,气象干旱向其他类型干旱传播是一个复杂的过程,传统的相关性分析方法

在研究干旱传播规律时包含了干、湿两种状态的传播,其结果存在较大不确定性。相对于相关性分析,基于干旱事件匹配探究不同干旱类型之间的传播规律可以有效提高分析结果的可信性。此外,干旱传播阈值^[10]量化了什么程度的气象干旱会发生传播,传播的风险有多大,也是当前研究的热点问题。概率模型被广泛应用于干旱传播定量化研究,通过联合概率分布模型连接多个干旱特征指标并进行模型构建,以实现干旱事件的发生概率预测^[11],例如 Copula 函数被广泛应用于不同情境下干旱传播的定量化研究^[12]。以往的研究多以土壤水或植被单方面来指征农业干旱^[13],而综合分析气象干旱与土壤水、植被的干旱传播关系的研究相对较少,且气象干旱向土壤干旱和植被干旱的传播次序也是当前研究的难点。本文选择位于东北亚的典型干旱半干旱区为研究对象,开展干旱事件匹配并分析干旱传播规律,利用概率模型从土壤干旱和植被干旱响应两方面探讨气象干旱引发农业干旱的传播阈值,并揭示研究区的干旱传播顺序特征,确定气象干旱触发不同等级的农业干旱的关键特征值,对有效预测并应对气候变化以及干旱灾害预警具有重要意义。

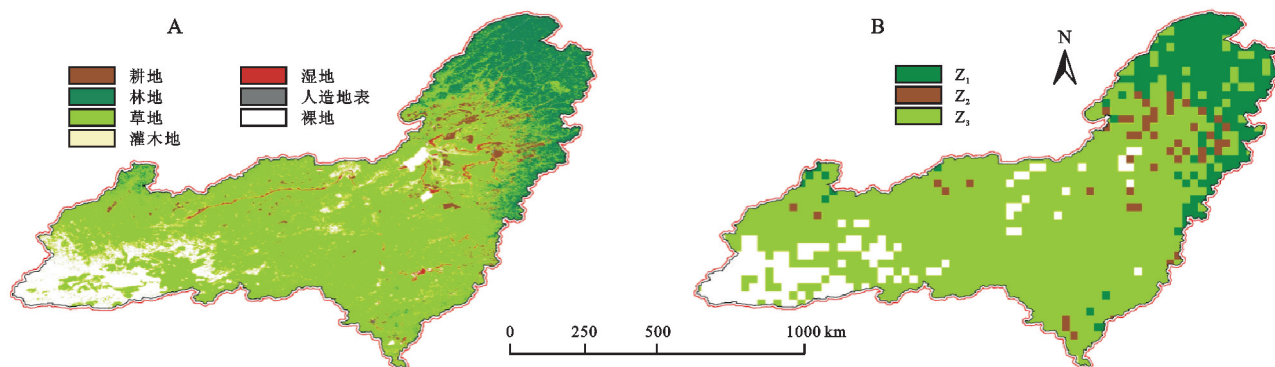
1 研究区概况与数据来源

研究区位于亚洲东北部中纬度的干旱半干旱区,介于 104.97—122.88°E, 42.54—53.44°N, 横跨中国、蒙古和俄罗斯 3 个国家,总面积 648 739 km²,受温带大陆性季风气候的影响,年平均气温约为 0℃,冬季气温在 0℃以下,年均降水量约为 290 mm,且降水主要集中在夏季(6—9月)。研究区植被覆盖度较高,以草原生态系统为主,兼有部分林地、耕地、裸地等。目前,该区域的人类活动干扰较少,生态系统的变化主要由气候变化引起,对于气候变化的响应较为敏感。已有研究表明,近几十年该地区干旱呈现加重趋势^[14],干旱的加剧会对敏感的生态系统造成不可逆的影响。

本研究所需的水文气象数据来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,

NASA)全球陆地同化系统 2.0 版本 (GLDAS V2.0) (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) 提供的 1982—2014 年月尺度 0—10 cm 土壤湿度、潜在蒸散发和降水数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,用于计算区域标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、标准化土壤湿度指数 (Standardized Soil Moisture Index, SSMI)。归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 数据来源于 NASA 陆地数据中心推出的全球植被指数变化数据 GIMMS (Global Inventory Modelling and Mapping Studies), 该数据集的时间分辨率为 15 d, 空间分辨率为 $(1/12)^{\circ}$ (约 8 km), 时间范围为 1982—2014 年。地表覆盖数据来源于全国地理信息资源目录服务系统提供的 30 m 全球地表覆盖数据 Globe-

Land30 数据集 (2010 期), 分辨率为 30 m。为保证数据空间分辨率的一致性, 借助 ArcGIS 软件的重采样工具将地表覆盖数据重采样到 0.25° 分辨率。从研究区地表覆盖空间分布来看, 区域内土地利用类型具有一定空间聚集性, 林地主要位于区域的东北部, 中部为大面积的草地, 草地与林地之间分布少量的耕地, 西南部地区主要为裸地。依据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2007), 裸地指表层为土质, 基本无植被覆盖的土地, 或表层为岩石、石砾, 其覆盖面积 $\geq 70\%$ 的土地, 在本研究中不将其考虑在内。将研究区依据下垫面条件分为 3 类区域, 如图 1 所示, 其中, Zone 1 (Z_1) 为以林地为主要用地类型的区域, Zone 2 (Z_2) 为以耕地为主要用地类型的区域, Zone 3 (Z_3) 为以草地为主要用地类型的区域。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)2938 号的标准地图制作, 底图未做修改, 下同图。

图 1 研究区位置及地表覆盖与分区示意图

Fig. 1 Location of the study area and schematic diagram of surface cover and zoning

2 研究方法

2.1 干旱指数计算

标准化干旱指数全面反映了区域的干湿状态, 可用于捕捉干旱的发生发展过程、持续时间以及干旱程度等, 且具有多尺度特点, 被广泛地应用在干旱的监测与传播研究中^[3]。本研究以标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 表征气象干旱, 以标准化土壤湿度指数 (Standardized Soil moisture Index, SSMI) 表征土壤干旱, 参考 Hao 等^[15] 研究, 以标准化归一化植被指数 (Standardized Normalized Difference Vegetation Index, SNDVI) 表征植被干旱, 通过逐个网格计算干旱指数序列以实现干旱的捕捉。为了提高计算效率, 减少因为边缘分布拟合造成的误差, 便于不同干旱指数的相互比较, 采用 Gringorten 经验公式^[16] 计算 SPEI, SSMI 及 SNDVI 的累计经验频率, 通过正态分位数转换得到系列标准化干旱指数, 计算公式见公式 (1) — (2)。

$$P(x_i) = [r(x_j - x_i) - 0.04] / (n + 0.12) \quad (1)$$

$$SDI = \Phi^{-1}(P) \quad (2)$$

式中: x 为时间序列数据; n 为序列的年份长度; $r(*)$ 为 x_i 在降序排列的 x 序列中的排序; Φ^{-1} 为正态分位数转换; P 为经验频率; SDI 为干旱指数。

2.2 干旱事件及特征指标识别

游程理论主要通过设定临界条件 (阈值), 利用阈值法识别干旱事件和特征指标, 如干旱开始时间、结束时间、干旱烈度等。参考张璇等^[17] 研究, 分别设定干旱识别阈值 x_0 , 干旱合并阈值 x_1 , 以及独立干旱事件剔除阈值 x_2 , 分别为 $x_0 = 0$, $x_1 = 0.5$, $x_2 = -0.5$ 。基于游程理论采用干旱指标识别不同类型的干旱事件。

根据游程理论识别的干旱事件, 可对每一场干旱事件的历时及烈度等特征进行计算。对于第 n 场干旱事件, 计算其干旱历时及烈度如下:

$$D_n = t_{\text{end},n} - t_{\text{onset},n} + 1 \quad (3)$$

$$S_n = \sum_{i \in [t_{\text{onset},n}, t_{\text{end},n}]} SDI_i \quad (4)$$

式中: D_n 为第 n 场干旱事件的干旱历时; $t_{\text{onset},n}$ 和 $t_{\text{end},n}$ 分别为第 n 场干旱事件的开始和结束时间; S_n 为第 n 场干旱事件的烈度; SDI_i 为第 i 个月的干旱指数值。

2.3 多类型干旱之间的匹配与传播

从干旱类型的形成发展内在联系来看,气象干旱是其他类型干旱的先决条件^[18],持续的气象干旱可能会引起农业干旱的发生和发展^[19],这个过程即是干旱的传播。由于区域下垫面的调节能力或其他因素的影响,并非所有的气象干旱都会传播发展成为农业干旱,同时也并非所有的农业干旱均由气象干旱单一过程引起。因此,为探究研究区干旱传播规律,本研究基于 SPEI3,SSMI,SNDVI 指数,依据游程理论识别干旱事件,并从农业干旱事件入手,进行气象干旱与农业干旱事件匹配,具体如下:(1)若一场农业干旱事件的开始时间介于某一场气象干旱事件的开始和结束时间之间,则对应的气象干旱与农业干旱事件进行匹配,认为该场农业干旱事件是由气象干旱传播引起,如事件1所示(图2);(2)若农业干旱事件的开始时间不在某一场气象干旱事件的开始和结束时间之间,如事件2的情形,设定时间阈值,当农业干旱事件与气象干旱事件开始时间之差小于时间阈值时,认为该场农业干旱与气象干旱存在传播关系,将其进行匹配,否则不进行匹配。相关研究表明,蒙古地区、中国内蒙古地区农业干旱应对极端事件的响应时间较短,主要集中在6个月以内^[20],若时间过长其变化受其他因素影响较大,因此,在本研究中,设定时间阈值为6个月,即当 $t_{2\text{onset},2} - t_{1\text{onset},2} < 6$ 时,则认定气象干旱与农业干旱之间存在传播关系。

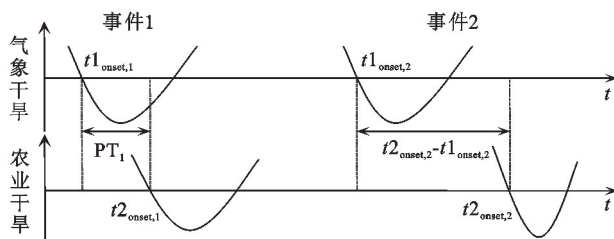


图2 干旱事件匹配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of matching of drought event

将气象干旱事件与农业干旱事件的开始时间之差定义为干旱传播时间,计算公式如下:

$$PT_n = t_{1\text{onset},n} - t_{2\text{onset},n} \quad (5)$$

式中: PT_n 为匹配后的第 n 场干旱事件的传播时间; $t_{1\text{onset},n}$ 为第 n 场气象干旱事件开始时间; $t_{2\text{onset},n}$ 为第 n 场土壤水/植被干旱事件开始时间。

此外,干旱传播率也是气象干旱向农业干旱的传播评价的一个重要指标,本研究将引发农业干旱的气象干旱次数与气象干旱事件总次数之比定义为干旱传播率^[3],计算公式如下:

$$R = m/n \quad (6)$$

式中: R 为干旱传播率; n 为气象干旱总次数; m 为引

发农业干旱的气象干旱次数。

2.4 基于 Copula 的条件概率

Copula 函数是一种可以有效连接多元随机变量边缘分布的联合分布函数,其不受变量边缘分布的限制,可以被应用在不同类型干旱传播特征与概率分析方面。其方程式表示为:

$$H(u, v) = C[u = F_X(x), v = G_Y(y)] \quad (7)$$

式中: $H(u, v)$ 为组合两个随机变量 x 和 y 的联合分布函数; u 为 x 的边缘分布 $F_X(x)$; v 为 y 的边缘分布 $G_Y(y)$ 。

在构建联合分布之前,需要先确定随机变量的边缘分布情况,本研究选取匹配后的干旱事件的气象历时和干旱烈度作为两个变量,选择 Gamma, EXP, EV, Lognormal, Poisson 等常用的累计概率密度函数(CDF)对匹配后的变量序列进行拟合,通过 Kolmogorov-Smirnov 检验(K-S 检验)和均方根误差 RMSE 最小原则筛选最优边缘分布函数。基于最优边缘分布,采用常用的二维 Copula 函数,包括 t , Gaussian, Clayton, Frank 和 Gumbel Copula 函数等,根据 RMSE 选择最优 Copula 函数根据式(8)构建联合分布。

本研究根据干旱历时和干旱烈度的单变量经验频率,将 $[0, 0.5)$, $[0.5, 0.75)$, $[0.75, 0.9)$ 和 $[0.9, 1]$ 的单变量累积经验频率区间对应的情景分别定义为轻度、中度、重度和极度干旱。通过构建条件累计概率分布函数来确定在不同概率水平下触发相应等级土壤干旱和植被干旱的气象干旱特征阈值,具体如下:

分别以农业干旱 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和气象干旱 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的历时或烈度为两个随机变量,计算边缘分布 $U(u_1, u_2, \dots, u_n)$, $V(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 并优选 Copula 函数。以土壤水、植被干旱为条件,推导触发不同等级土壤水、植被干旱的气象干旱概率如下:

$$P\{Y < y | x_1 < X < x_2\} = [C(u_2, v) - C(u_1, v)] / (u_2 - u_1) \quad (8)$$

式中: y 为气象干旱特征值; v 为其累积概率密度函数值; x_1, x_2 分别为不同等级的农业干旱特征值上下界; u_1, u_2 为对应的累积概率密度函数值。

3 结果与分析

3.1 干旱时空特征

研究区 1982—2014 年的 SPEI(1—12)、SSMI, SNDVI 时间序列变化如图 3 所示。不同时间尺度的 SPEI 序列表明,研究区在 2000 年之前整体呈现干湿交替的现象,但是 1987 年 Z_1 区域发生严重气象干旱, Z_2 区域发生轻微气象干旱,在同一个时间段内, Z_1 和 Z_2 区域均发生了严重土壤干旱,表明 1987 年这两个区

域气象干旱与土壤干旱之间可能发生了干旱传播;但是在 Z_3 区域,这一关联度并不明显。1982—2014 年 4 个分区植被干旱发生更为频繁,干旱持续时间较短,干湿交替明显。2000 年之后 3 种类型的干旱频率显著增加,年际气象干旱的频率与烈度尤其明显,

但是土壤干旱与植被干旱和气象干旱的发生时序呈现出了一定程度上的差异。研究结果显示,1982—2014 年亚洲东北部中纬度的半干旱区干旱逐渐加剧,2000 年以前相对湿润,2000 年以后干旱显著加重,这与 Cao 等^[21-22]在蒙古高原地区的研究一致。

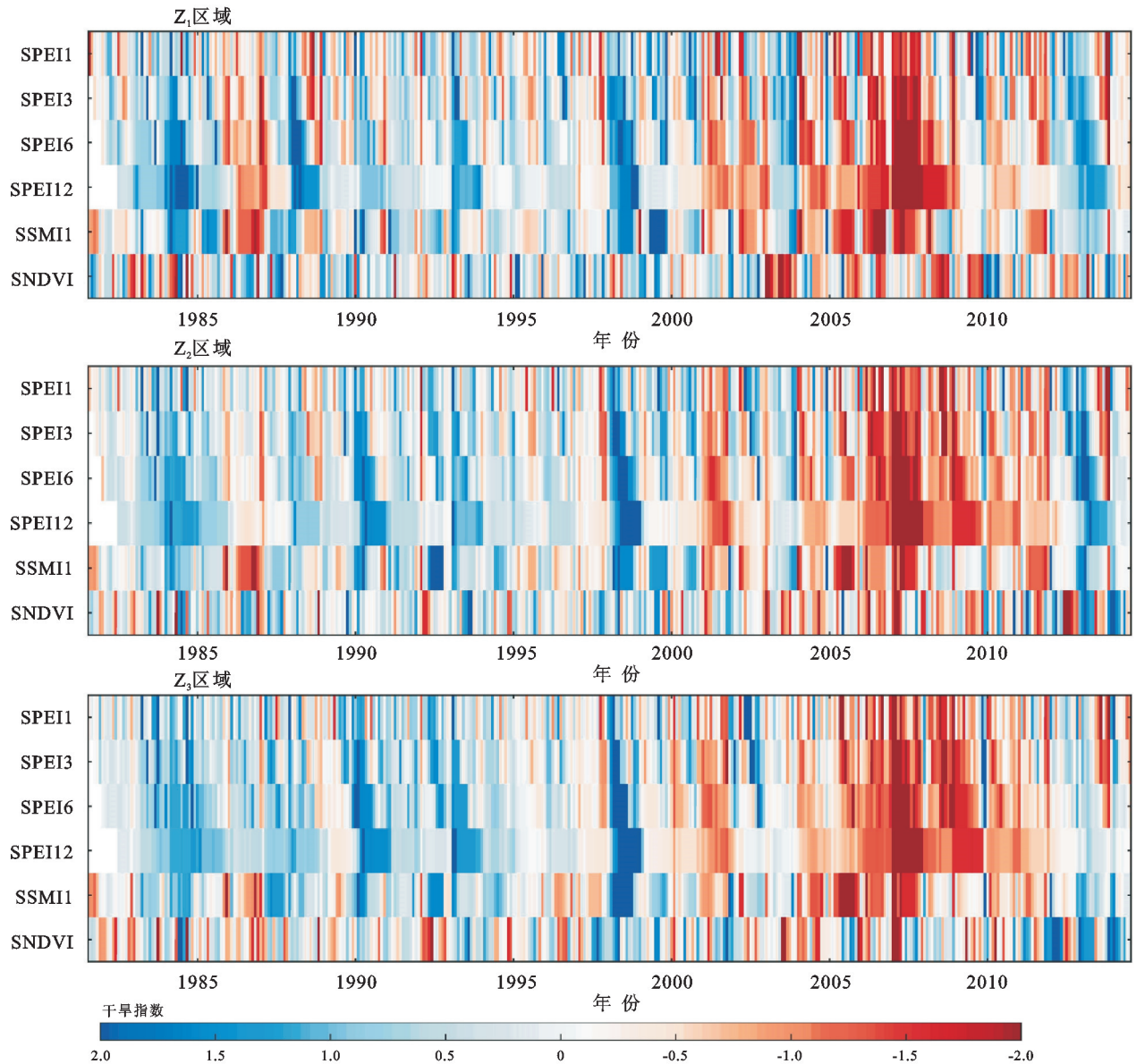


图 3 多时间尺度 SPEI,SSMI1 和 SNDVI 的时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of SPEI, SSMI1 and SNDVI at multiple time scales

由于标准化干旱指数的多尺度特性,不同尺度的干旱指数可以表征相应时段的干旱累积效应,1,3,12 个月尺度的干旱指数分别表征月、季、年尺度的流域干旱状况,因此为探究研究区多类型干旱空间变化趋势的季节性特征,选取 5 月、8 月、11 月和次年 2 月的 SPEI3 和 SSMI3 分别用来表征春季、夏季、秋季和冬季的气象干旱和土壤干旱。基于月尺度 NDVI 计算各季节 NDVI 均值并进行标准化得到 SNDVI 序列,用于表征区域各季节的植被干旱。使用 MK 检验和 Sen's 趋势相结合的方法,对 1982—2014 年研究

区各季节不同类型干旱指数变化趋势进行分析,结果如图 4 所示。

研究发现,流域内夏季和秋季均呈现变干趋势,夏季和秋季的 SPEI3 的变化斜率分别介于 $-0.074\ 4\sim-0.022\ 8$ 和 $-0.078\ 3\sim-0.014\ 3$,而春季和冬季在东北部林地和耕地区域呈现变湿趋势。SSMI3 值在夏季、秋季和冬季呈显著下降趋势,变化斜率介于 $-0.070\ 0\sim0.200$,而春季除东北部部分地区外,大部分区域(90.1%)干旱程度减弱。植被干旱的变化幅度明显小于气象干旱和土壤干旱(图 4I—L),春季、夏季、秋季大部分地

区干旱程度有所减弱,主要集中在中部草地区域和东北部林地区域,面积占比分别为 83.54%,65.62%,

67.43%,冬季大部分地区呈现变干趋势,东北部耕地区域干旱程度显著加深,斜率为 $-0.004\ 69$ 。

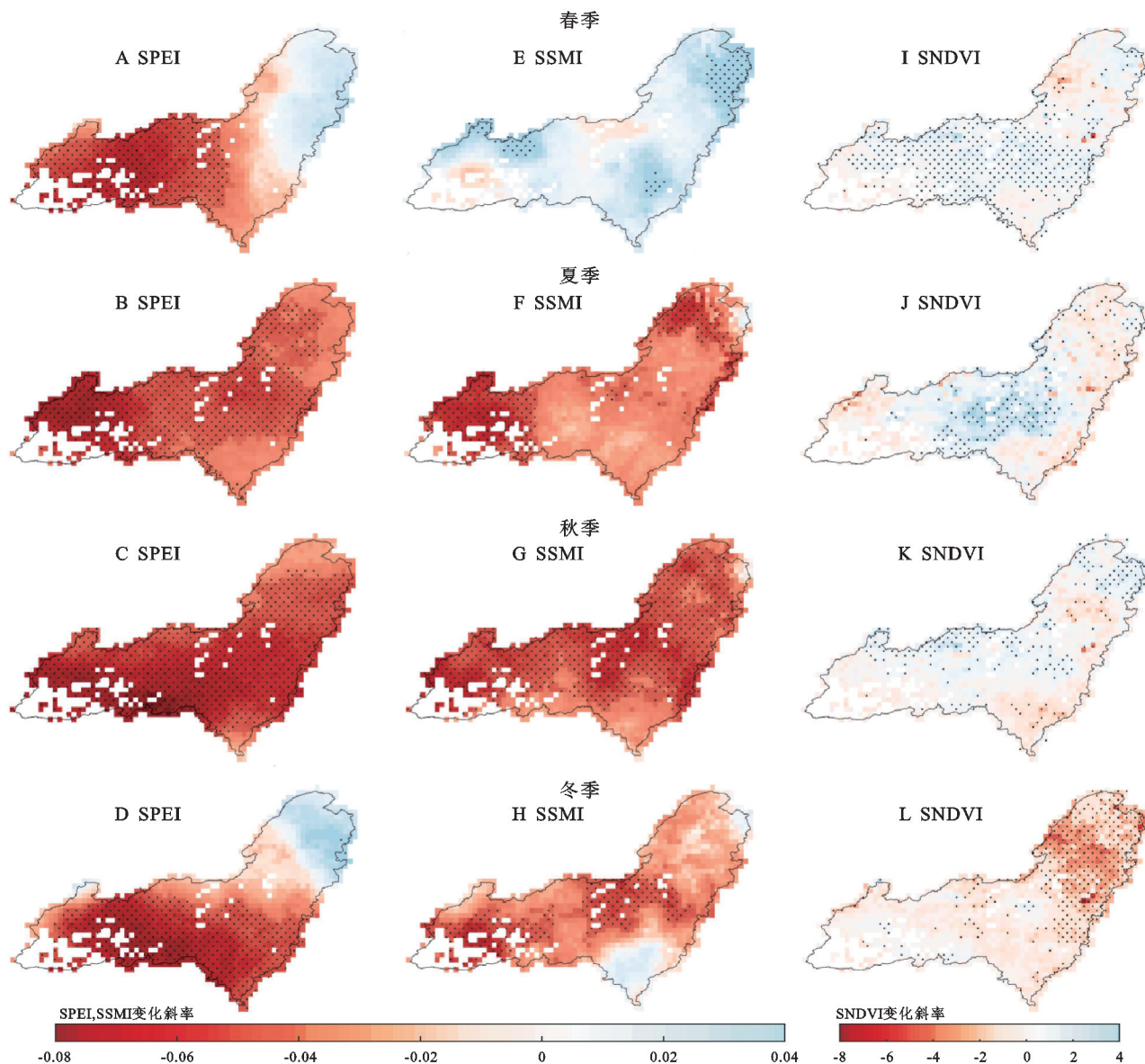


图4 1982—2014年各季节 SPEI、SSMI 和 SNDVI 变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trends in SPEI, SSMI and SNDVI by season, 1982–2014

3.2 气象干旱到农业干旱的传播特征

基于游程理论识别与匹配气象干旱与土壤干旱和植被干旱事件,干旱事件次数与干旱传播率见表1。由表可知,3个区域识别出气象干旱事件次数分别为47,46,49,47次, Z_2 区域气象干旱到土壤干旱的传播率高于其他区域,引发土壤干旱的气象干旱事件为28次,干旱传播率为0.61,而其余3个区域干旱传播率相差不大且均不足0.5。 Z_2 区域引发植被干旱的气象干旱次数也比 Z_1 和 Z_3 多,为25次,对应的干旱传播率为0.54。换句话说, Z_2 区域的干旱传播率(气象干旱到土壤干旱、气象干旱到植被干旱)均高于其他两个区域。

研究结果显示,气象干旱传播到土壤干旱(图5A)和植被干旱(图5B)的传播时间空间分布存在空

间差异性。气象干旱到土壤干旱的传播时间在东北部地区即 Z_1 区域传播时间最短,平均传播时间为2.8月,中部地区传播时间较长, Z_2 和 Z_3 区域平均传播时间分别为3.2月和3.3月。而气象干旱到植被干旱的传播时间则表现出相反的规律,东北部地区干旱传播时间最长,平均传播时间为3.1月,其余区域传播时间约2.7月,表明草地生态系统对气象干旱较为敏感,其次为耕地,而林地对气象干旱具有一定的韧性。气象干旱到植被干旱的传播时间略小于气象干旱到土壤干旱的传播时间,表明在该地区的干旱传播次序为:气象干旱传播到植被干旱再到土壤干旱。

3.3 干旱传播阈值

3.3.1 最优边缘分布函数与 Copula 函数优选 本研

究利用 3.2 节匹配的干旱事件序列,对干旱特征的边缘分布函数优选,选取 Gamma,EXP,EV,Lognormal,Poissson 5 种常见的累积分布函数拟合气象干旱、土壤水、植被干旱事件的干旱历时和干旱烈度序列,筛选最优边缘分布函数。基于最优拟合边缘分布,通过优选 Frank,Clayton, t ,Gaussian,Gumbel 等 Copula 函数构建不同干旱类型特征变量之间联合分布,确定干旱传播阈值模型。上述 5 种边缘分布函数均通过了 K-S 检验,各干旱特征的边缘分布函数及 Copula 函数优选结果见表 2。由表可知,除了匹配后的土壤干旱历时最优边缘分布为 EV 分布外,其余各个特征变量最

优边缘分布函数以 Lognormal 和 EXP 为主,根据不同边缘分布函数可以构建二元 Copula 联合分布,进而确定不同情境下干旱传播的条件概率。

表 1 干旱匹配结果与干旱传播率

Talbe 1 Drought matching results and drought propagation rates					
分区	n	m_{SSMI}	R_{SSMI}	m_{SNDVI}	R_{SNDVI}
Z_1	47	23	0.49	22	0.47
Z_2	46	28	0.61	25	0.54
Z_3	49	22	0.45	17	0.35

注: n 为气象干旱总次数; m_{SSMI} 为引发土壤干旱的气象干旱次数; m_{SNDVI} 为引发植被干旱的气象干旱次数; R 为相应的干旱传播率。

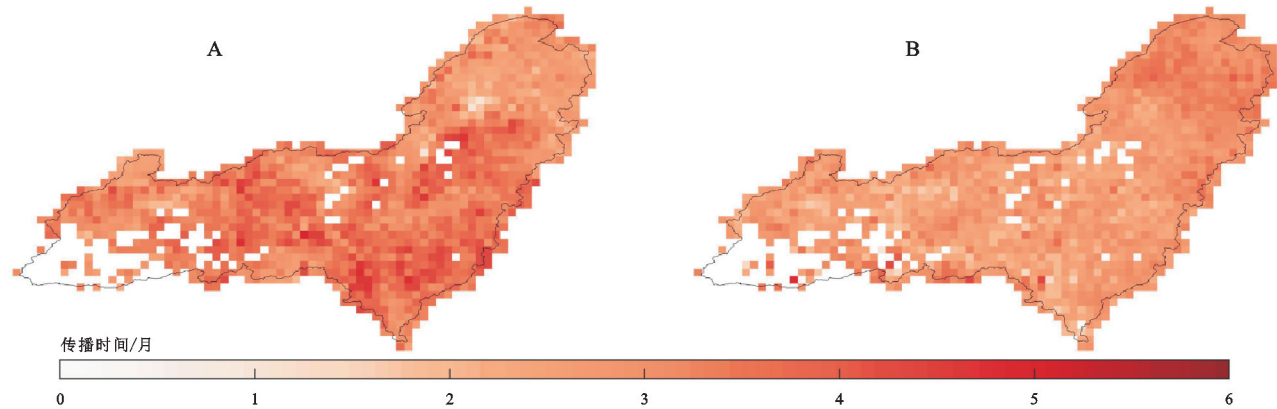


图 5 气象干旱到土壤干旱(A)和植被干旱(B)的传播时间

Fig. 5 Propagation time from meteorological drought to soil moisture drought (A) and vegetation drought (B)

表 2 干旱特征最优边缘分布函数及 Copula 函数优选结果

Table 2 Optimal marginal distribution function and Copula function optimization results for drought features

分区	特征变量	气象-土壤干旱			气象-植被干旱		
		SPEI	SSMI	Copula 函数	SPEI	SNDVI	Copula 函数
Z_1	干旱烈度	Lognormal	Lognormal	Frank	Lognormal	Lognormal	Frank
	干旱历时	Lognormal	EV	Gaussian	EXP	EXP	Clayton
Z_2	干旱烈度	Lognormal	Lognormal	Clayton	Lognormal	EXP	Clayton
	干旱历时	Lognormal	Lognormal	Clayton	Lognormal	Lognormal	Frank
Z_3	干旱烈度	Lognormal	Lognormal	Frank	Lognormal	EXP	Clayton
	干旱历时	EXP	Lognormal	t	EXP	EXP	Clayton

3.3.2 气象干旱到土壤干旱和植被干旱的传播阈值
在不同条件概率下,将对应的气象干旱特征值作为向土壤干旱和植被干旱的传播阈值,3 个区域气象干旱到土壤干旱和植被干旱的传播阈值如图 6—7 所示。在达到或接近传播阈值之前,曲线均呈现稳定而快速的增加趋势,当气象干旱条件超过阈值后,条件概率的增加趋势减缓,并无限接近于 1。气象干旱向土壤干旱发生传播时,在 0.5 的概率下,触发轻度、中度、重度、极度土壤干旱的气象干旱历时平均为 3.5, 5.6, 7.0, 9.3 个月,干旱烈度平均为 1.9, 4.1, 6.0, 7.6; 在 0.7 的概率下,触发轻度、中度、重度、极度土壤干旱的气象干旱历时平均为 5.5, 8.3, 10.1, 13.1 个月,干旱烈度平均为 2.9, 6.0, 8.8, 11.3; 在 0.9 概率下,触发轻度、中度、重度、极度土壤干旱的气象干旱历时平

均为 10.2, 14.1, 16.5, 20.5 个月,干旱烈度平均为 5.7, 11.4, 16.4, 20.5。在不同的下垫面条件中,以草地为主要用地类型的 Z_3 区域气象干旱到土壤干旱的传播阈值较大, Z_2 区域气象干旱到土壤干旱的传播阈值最小,不同等级的传播阈值相差较小,且 Z_2 区域气象干旱到土壤干旱的传播时间也相对短,表明耕地区域的土壤干旱对气象干旱的响应较为敏感,干旱历时较短、烈度较小的气象干旱就能引发土壤干旱。

气象干旱向植被干旱发生传播时,在 0.5 的概率下,3 个区域触发轻度、中度、重度、极度植被干旱的气象干旱历时平均为 5.2, 7.1, 8.0, 8.8 个月,干旱烈度平均为 3.5, 4.7, 5.5, 6.1; 在 0.7 的概率下,触发轻度、中度、重度、极度植被干旱的气象干旱历时平均为 9.0, 11.6, 12.8, 13.7 个月,干旱烈度平均为 6.3, 8.3,

9.4, 10.5; 在 0.9 概率下, 触发轻度、中度、重度、极度植被干旱的气象干旱历时平均为 17.6, 21.3, 23.4, 25.0 个月, 干旱烈度平均为 15.2, 18.8, 21.0, 23.1。气象干旱到植被干旱的传播阈值在各等级中差别较小, Z_3 区域为以草地为主, 由 3.2 节的表 1 可知, 该区域

匹配成功的气象干旱与植被干旱事件仅为 17 次, 由于数据量较小, 在进行边缘分布函数拟合与条件概率计算时存在一定误差。 Z_1 区域的传播阈值最大, 表明当发生气象干旱时, 森林生态系统通过自身的调节能力在一定程度上可以减弱气象干旱带来的影响。

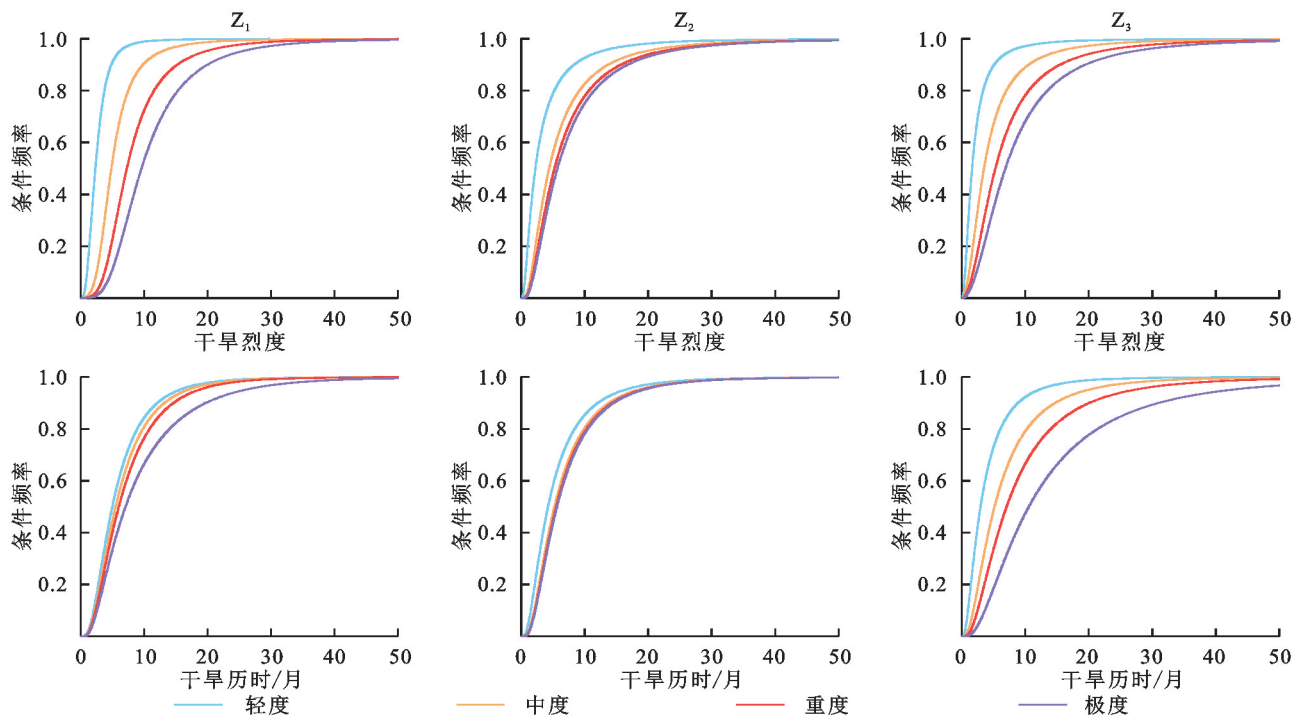


图 6 气象干旱到不同等级土壤干旱的传播阈值

Fig. 6 Propagation thresholds from meteorological drought to different levels of soil moisture drought

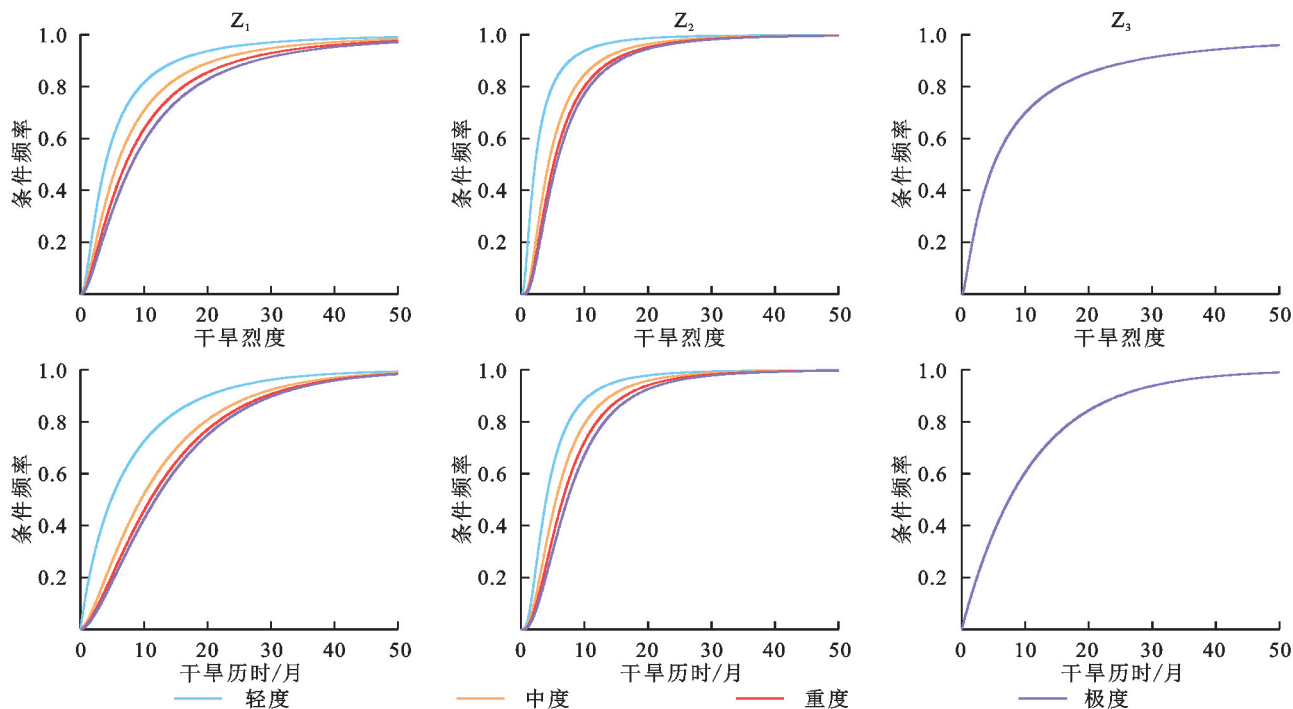


图 7 气象干旱到不同等级植被干旱的传播阈值

Fig. 7 Propagation thresholds from meteorological drought to different levels of vegetation drought

3.4 讨论

气象干旱到农业干旱的传播是一个复杂的过程,

其中涉及到降水、蒸散发以及植被生长等多方面因素。传播特征与阈值研究作为国内外研究的热点话

题,现有研究通常选择土壤水或植被响应的单一角度分析^[23],而农业干旱的表征应该综合考虑土壤水分和植被生长状况多角度进行分析。在以往的研究中,相关性分析的方法被广泛应用于干旱传播时间的探究中。然而,相关性分析考虑了干湿两种状况,且无法反映干旱传播的滞后性^[24];此外,相关关系不能代替因果关系。因此,基于事件匹配的干旱特征具有更低的不确定性,能更好地反映气象干旱向其他干旱传播的各种特征。研究表明,在1982—2014年研究区干旱情况逐渐加剧,以2000年为分界线,2000年以前区域相对湿润,2000年以后出现长时间连续性干旱。基于干旱事件匹配发现,在草地和耕地地区气象干旱到土壤干旱的传播率高,但传播时间长;而在林地地区,气象干旱到土壤干旱的传播时间较短,但传播到植被干旱的时间较长。此外,研究也证实了,植被类型对干旱传播具有重要影响^[25],林地的干旱传播时间长于草地^[26]。林地的植被叶面积大于耕地、草地的植被,因此植被蒸腾消耗的水量大。另外,林地的根系较草地和耕地更为发达^[27],从土壤中吸收更多的水分,可能会加速土壤水分的散失。在林地区域建议加强土壤墒情的监测,从而开展干旱的预警与灾害防治。综合考虑不同类型干旱传播顺序产生的机理与传播阈值,可为干旱管理提供更全面的参考依据,促进对干旱问题的深入理解和有效应对。干旱阈值反映了气象干旱向其他类型干旱的传播触发条件,研究区干旱传播阈值随干旱等级的增大而增大,气象干旱到土壤干旱的传播阈值小于气象干旱到植被干旱的传播阈值,即气象干旱更容易触发土壤干旱,与基于传播率得出的结论一致,这可能由于植被的生长情况不仅受到干旱的影响,还受到土壤、热胁迫、管理措施以及人类活动等多方面因素影响有关^[28]。由气象干旱随生态水文过程的传播造成的土壤水亏缺、植被生理活动减弱、生态系统功能破坏,严重威胁粮食安全、生态安全以及水资源可持续利用。基于干旱事件匹配,从土壤水和植被两方面评价其对气象干旱响应顺序,确定触发不同等级农业干旱的气象干旱传播阈值,有利于干旱的预测和早期预警,因地制宜地制定生态防护及修复措施。

4 结论

(1) 1982—2014年,研究区干旱呈逐渐加剧趋势,气象干旱和土壤干旱的加剧趋势比植被干旱更加明显,2000年以前研究区干湿交替频繁,2000年以后干旱频发且显著加重;季节性干旱的研究发现,夏季和秋季气象干旱呈显著加重趋势,而春季和冬季东北部区

域气象干旱程度减弱;春季土壤干旱程度减弱,夏季、秋季和冬季则呈加重趋势;植被干旱变化趋势相对不明显,但是东北部区域在冬季呈显著加重趋势。

(2) 气象干旱触发土壤干旱的传播率大于气象干旱触发植被干旱的传播率,传播率分别介于0.45~0.61,0.35~0.57,以耕地为主要用地类型的区域(Z_2)干旱传播率最高;以林地为主要用地类型的区域气象干旱更快地传播到土壤干旱,而以耕地、草地为主要用地类型的区域气象干旱更快地传播到植被干旱;研究区气象干旱到植被干旱的平均传播时间小于气象干旱到土壤干旱的平均传播时间,干旱传播次序为气象干旱传播到植被干旱再到土壤干旱。

(3) 干旱传播阈值随着干旱等级的增大而增大,气象干旱到土壤干旱的传播阈值小于植被干旱;以林地为主要用地类型的区域气象干旱到土壤干旱的传播阈值较小,以草地为主要用地类型的区域传播阈值较大;以林地为主要用地类型的区域气象干旱到植被干旱的传播阈值最大,表明森林生态系统可通过自身调节能力在一定程度上削弱气象干旱造成的影响。

参考文献(References):

- [1] 李京芳,彭涛,董晓华,等.基于Copula函数的汉江流域水文干旱风险研究[J].水土保持研究,2022,29(3):179-188.
Li J F, Peng T, Dong X H, et al. Hydrological drought risk in the Hanjiang River basin based on Copula function [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29 (3):179-188.
- [2] 刘永佳,黄生志,方伟,等.不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J].水利学报,2021,52(1):93-102.
Liu Y J, Huang S Z, Fang W, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1):93-102.
- [3] Zhang X, Hao Z C, Singh V P, et al. Drought propagation under global warming: characteristics, approaches, processes, and controlling factors[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 838:156021.
- [4] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(12):5391-5398.
- [5] Li Y, Huang J P, Ji M X, et al. Dryland expansion in northern China from 1948 to 2008 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(6):870-876.
- [6] Xu Y, Zhang X, Wang X, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579:124147.
- [7] Apurv T, Sivapalan M, Cai X M. Understanding the

- role of climate characteristics in drought propagation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(11): 9304-9329.
- [8] Zhang Y, Hao Z C, Feng S F, et al. Agricultural drought prediction in China based on drought propagation and large-scale drivers [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107028.
- [9] Duo A, Zhao W J, Qu X Y, et al. Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China Plain in the last 33 years [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 53: 103-117.
- [10] Liu Q, Yang Y T, Liang L Q, et al. Thresholds for triggering the propagation of meteorological drought to hydrological drought in water-limited regions of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 876: 162771.
- [11] 张翔, 黄舒哲, 管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(6): 563-579.
Zhang X, Huang S Z, Guan Y H. Research progress, challenges, and prospects in drought propagation [J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(6): 563-579.
- [12] Shin J Y, Chen S, Lee J H, et al. Investigation of drought propagation in South Korea using drought index and conditional probability [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 29(2): 231-241.
- [13] Jiang T L, Su X L, Zhang G X, et al. Estimating propagation probability from meteorological to ecological droughts using a hybrid machine learning copula method [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(2): 559-576.
- [14] Tong S Q, Lai Q, Zhang J Q, et al. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980—2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1557-1565.
- [15] Hao Y, Hao Z C, Fu Y S, et al. Probabilistic assessments of the impacts of compound dry and hot events on global vegetation during growing seasons [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(7): 074055.
- [16] Gringorten I I. A plotting rule for extreme probability paper [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(3): 813-814.
- [17] 张璇, 许杨, 郝芳华, 等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析 [J]. *水利学报*, 2022, 53(2): 165-175.
Zhang X, Xu Y, Hao F H, et al. Characteristics and risk analysis of drought propagation from meteorological drought to hydrological drought in Luanhe River basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(2): 165-175.
- [18] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(6): 982-991.
- Yuan W P, Zhou G S. Theoretical study and research prospect on drought indices [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(6): 982-991.
- [19] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 449-456.
Pei Y S, Jiang G Q, Zhai J Q. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 449-456.
- [20] 刘洋洋, 任涵玉, 呼天明, 等. 中国草地 NDVI 时空动态对多尺度干旱的响应 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 153-161, 168.
Liu Y Y, Ren H Y, Hu T M, et al. Spatiotemporal dynamics of NDVI of grassland and its response to multi-scale drought in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 153-161, 168.
- [21] Cao X M, Feng Y M, Wang J L. An improvement of the Ts-NDVI space drought monitoring method and its applications in the Mongolian Plateau with MODIS, 2000—2012 [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(6): 433.
- [22] Cao X M, Feng Y M, Wang J L. Remote sensing monitoring the spatio-temporal changes of aridification in the Mongolian Plateau based on the general Ts-NDVI space, 1981—2012 [J]. *Journal of Earth System Science*, 2017, 126(4): 58.
- [23] 冯凯, 李彦彬, 许桂平, 等. 西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 59-69.
Feng K, Li Y B, Xu G P, et al. Spatiotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 59-69.
- [24] Entekhabi D. Propagation in the drought cascade: observational analysis over the continental US [J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(9): e2022WR032608.
- [25] van Dijk A I J M, Beck H E, Crosbie R S, et al. The Millennium Drought in southeast Australia (2001—2009): natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 1040-1057.
- [26] Zhou Z Q, Liu S N, Ding Y B, et al. Assessing the responses of vegetation to meteorological drought and its influencing factors with partial wavelet coherence analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: 114879.
- [27] Shi M Q, Yuan Z, Shi X L, et al. Drought assessment of terrestrial ecosystems in the Yangtze River basin, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132234.
- [28] Wang H L, Chen A F, Wang Q F, et al. Drought dynamics and impacts on vegetation in China from 1982 to 2011 [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 75: 303-307.