

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.027

余欢, 贺中华, 顾小林, 等. 喀斯特地区不同时间尺度农业干旱对局地气候因子脉冲响应机制[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 296-304.

YU Huan, HE Zhonghua, GU Xiaolin, et al. Impulse response mechanism of agricultural drought to local climate factor at different time scales in karst region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 296-304.

喀斯特地区不同时间尺度农业干旱对局地气候因子脉冲响应机制

余欢¹, 贺中华^{1,2,3}, 顾小林⁴, 许明金⁴, 谭红梅¹, 杨树平¹, 杨秋云¹

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001; 4. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550000)

摘要: [目的] 为定量解析喀斯特地区农业干旱对单因子的响应机制。[方法] 利用泰森多边形及 K 均值聚类对贵州省 83 个站点年平均降雨量进行面积计算及分类, 将贵州省划分为 5 个区域, 并基于各分区降雨量 (Pre)、平均气温 (T)、潜在蒸散发 (E)、风速 (W)、气压 (P)、土壤水分 (SW)、标准化土壤水分指数 (SSD) 建立向量自回归 (VAR) 模型, 通过脉冲响应与方差分解分析不同时间尺度农业干旱对各气象因子及土壤水分含量的响应机制。[结果] (1) 农业干旱呈现西高东低, 总体由南往北逐渐减轻; 春、夏季农业干旱强于秋冬季。(2) 年尺度各因子对 SSI 脉冲响应达峰值所需时间为 $Pre < E = W < P < SW < T$, 恢复平稳期则为 $Pre > W > T > E > P > SW$ 。由月尺度到年尺度, 岩溶发育较强区域 E 对 SSI 脉冲达峰值所需时间缩短 2 期; SW 与之相反, 且非岩溶地区比岩溶地区恢复平稳期短。(3) 降雨量在农业干旱中占主导地位, 降雨与风速随时间尺度增加在农业干旱中作用增强, 其农业干旱贡献比例月、季、年分别为 31.88%, 34.25%, 58.33% 和 1.07%, 3.15%, 12.88%。[结论] 研究成果可为喀斯特地区农业干旱预警提供参考理论依据。

关键词: 农业干旱; 气候因子; 向量自回归模型; 脉冲响应; 贵州省

中图分类号: S423

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0296-09

Impulse Response Mechanism of Agricultural Drought to Local Climate Factor at Different Time Scales in Karst Region

YU Huan¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, GU Xiaolin⁴, XU Mingjin⁴, TAN Hongmei¹, YANG Shuping¹, YANG Qiuyun¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Guizhou Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001, China; 4. Guizhou Bureau of Hydrology and Water Resources, Guiyang 550000, China)

Abstract: [Objective] In order to quantitatively analyze the response mechanism of agricultural drought to single factor in karst areas. [Methods] In this study, Delaunay triangulation and K-means clustering were employed to calculate the area and classify the annual rainfall data of 83 stations in Guizhou Province, resulting in the division of Guizhou into 5 regions. Subsequently, a vector autoregressive (VAR) model was established based on the meteorological factors including precipitation (Pre), average temperature (T), potential evapotranspiration (E), wind speed (W), air pressure (P), soil moisture content (SW), and standardized soil moisture index (SSI) for each region. The response mechanism of agricultural drought to various time scales of meteorological factors and soil moisture content was analyzed using pulse response and variance decomposition. [Results] (1) The agricultural drought was higher in the west and lower in the east, and gradually decreased from south to north; The agricultural drought is more severe in spring and summer

收稿日期: 2024-05-07

修回日期: 2024-06-10

录用日期: 2024-06-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-11

资助项目: 国家自然科学基金项目 (u1612441, 41471032); 贵州省水利厅自然科学基金项目 (KT202237); 贵州省自然科学基金项目 (黔科合基础-ZK[2023]重点 028)

第一作者: 余欢 (2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: 1947116811@qq.com

通信作者: 贺中华 (1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: hezhonghua7621@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

than in autumn and winter. (2) The time required for the impulse response of each variable on the annual scale to reach the peak of SSI is $Pre < E = W < P < SW < T$, and the recovery period is $Pre > W > T > E > P > SW$. From the monthly scale to the annual scale, in areas with strong karst development, the time required for SSI pulse to reach its peak value is shortened by 2 periods for factor E ; while SW is opposite to this, and the non-karst area has a shorter recovery period than karst area. (3) Rainfall plays a dominant role in agricultural drought, and rainfall and wind speed played a stronger role in agricultural drought with the increase of time scale. The contribution ratio of agricultural drought was 31.88%, 34.25%, 58.33%, 1.07%, 3.15% and 12.88%, respectively. [Conclusion] The research results can provide a theoretical basis for the early warning of agricultural drought in karst areas.

Keywords: agricultural drought; climatic factor; vector autoregressive model; impulse response; Guizhou province

Received: 2024-05-07

Revised: 2024-06-10

Accepted: 2024-06-25

Online(www.cnki.net): 2024-09-11

干旱不同于其他自然灾害,具有明显的时间累积效应,当水资源持续短缺,社会经济与生态环境也随之受到影响^[1-2]。农业干旱受农业用地土壤类型、农作物种类及气象因子^[3-4]等影响,其中气象因子具有较为突出的变化性和复杂性^[5],导致农业干旱对气象因子的响应具有复杂的滞后性^[6]。因此,定量解析农业干旱对气象因子响应机制,对农业干旱预警具有重要的研究意义。

关于农业干旱对气象因子响应的研究主要集中于气象干旱和农业干旱二者的关系。一是将气象干旱指数与农业干旱指数相结合,利用二者的相关性,得出农业干旱对气象干旱的滞后时间^[7-9],如 LIU 等^[10]计算标准化土壤水分指数(SSI)、标准化降水指数(SPI)、标准化径流指数(SRI)与地下水干旱指数(GDI)之间的皮尔森相关系数,从而计算气象-水文-农业-地下水干旱四者的传播时间。二是构建气象干旱指数与农业干旱指数的联合分布函数,从条件概率的角度,计算气象干旱到农业干旱的传播概率与传播阈值^[11-13]。如 LI 等^[8]分别使用土壤水分指数(SSMI)与标准化降雨蒸发指数(SPEI)表征农业干旱与气象干旱,提出基于 Copula 函数与条件概率不同干旱程度下气象干旱向农业干旱的平均传播时间。地理环境条件的差异性也导致农业干旱对单因子响应不同,如 DENG 等^[14]研究表明,喀斯特地区与非喀斯特地区相比,气象干旱向农业干旱传播时间缩短 1.25 个月。已有研究主要基于干旱指数之间的相关性,从而计算出农业干旱对气象干旱的滞后时间, SPEI 等干旱指数其本质是综合因子的结果,仅能表明农业干旱对综合气象因子的响应,气象单因子对农业干旱响应的滞后性、滞后时间及影响贡献程度并不能体现。向量自回归(VAR)模型能同时考虑多个时间序列之间的相互依存关系,从而更全面地揭示变量之间的互动关系^[15]。

与其他多元时间序列模型相比,VAR 模型在处理多个内生变量之间的动态关系时具有优势,能够更好地解释地学现象的复杂性和多样性。

喀斯特地区农业干旱对气象单因子响应时序动态尚未定量解析的情况下,该区在应对农业干旱预警时,缓冲时间尚不可知,以致错过最佳防御时期而导致社会经济损失与生态环境破坏。贵州省为典型喀斯特山地,具有地形和气象复杂多变、生态环境脆弱、农业生产优质土地较少^[16-17]等特征。因此,为提高喀斯特地区农业干旱的预警效率,减少不必要的损失。本文以贵州省为研究区,利用 VAR 模型进行农业干旱对单因子响应时序动态定量解析,并探讨其响应机制,为喀斯特地区农业干旱预警提供科学参考,为提升预警效率提供重要依据。

1 研究区概况

贵州省(103°36'—109°35'E, 24°37'—29°13'N)位于中国西南部(图 1),是山地省份,其气象、气候及农业干旱状况对当地的农业生产和生态环境具有重要影响,属于亚热带湿润季风气候,四季分明,冬无严寒,夏无酷暑,全省大部分地区的年平均气温 14~16℃,温度变化较小,降水分布不均,部分地区在特定季节出现干旱现象^[18]。随着全球气候变暖的趋势,贵州省的干旱情况有所加剧,部分地区在秋季和冬季常面临农业干旱的威胁,这些干旱现象不仅影响农作物的播种和生长,还可能导致农作物减产甚至绝收。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

气象数据与土壤水分数据均由中国国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)提供的 CLDAS-V2.0 数据集,时间跨度为 2000—2021 年,时间分辨率为月。去除数据缺失的站点后,本文选取研究区内

83 个站点并提取其降雨量(Pre)、平均气温(T)、潜在蒸散发(E)、风速(W)、气压(P)及 0—100 cm 土层土壤水分(SW)数据。

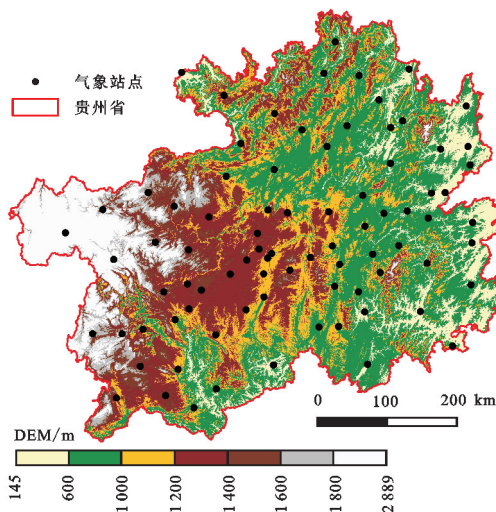


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 标准化土壤水分指数 (SSI) 用于农业干旱监测与分析,本研究土壤水分含量符合伽马分布,采用双参数伽马概率密度函数描述土壤水分的频率分布^[19],公式为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数; x 为土壤水分累计; α 和 β 分别为 Gamma 分布的形状参数与尺度参数。SSI 将农业干旱划分为正常、轻旱、中旱、重旱、特旱 5 个等级,对应值分别为 $(-0.5, +\infty]$, $(-1.0, -0.5]$, $(-1.5, -1.0]$, $(-2.0, -1.5]$, $(-\infty, -2.0]$ 。

2.2.2 向量自回归模型 (VAR) 是一种常用的多变量时间序列预测模型,对每个时间点上的变量都建立回归模型,通过自身过去时间点和和其他过去时间点进行预测,考虑变量之间的相互影响,能够捕捉变量之间的动态关系,以及每个冲击对内生变量变化的贡献度,即脉冲响应和方差分解^[20]。

对气象数据与土壤水分数据进行平稳性检验,对非平稳序列进行一阶/二阶差分转化,使各变量通过 ADF 平稳性检验。计算统计量 AIC、FPE、HQ、LR、SC,确定最佳滞后阶数,并通过格兰杰因果检验确定变量间是否存在因果关系,建立 VAR 模型,即:

$$X_t = C + \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_n X_{t-n} + \epsilon_t, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中: X_t 为 k 维内生变量的列向量; C 为 VAR 模型的截距列向量; $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 为 $k \times k$ 维持估参数

举证; n 为滞后阶数; ϵ_t 为 k 维随机误差列向量; T 为样本个数,它们之间可以同期相关,但不与自身滞后值、等式右边变量相关。

利用单位根估计法判断模型平稳性,若所有根模的倒数都 < 1 ,则该模型稳定。确定各个变量对残差冲击响应,基于脉冲响应函数结果,对 VAR 模型预测误差方差进行分解,计算每个变量对预测误差方差的贡献度,包括每个变量自身的方差贡献和与其他变量的协方差贡献。

3 结果与分析

3.1 喀斯特地区降雨分区原则及结果

本文利用泰森多边形与 K 均值聚类对贵州省 83 个站点年平均降雨量进行面积计算及分类,将 83 个站点划分为 5 个分区(图 2),其中分区 I、II、III、IV、V 年平均降雨量分别为 1 157, 1 212, 1 085, 1 280, 1 351 mm,聚类结果在空间上具有连续性且特征明显,第 III 分区位于贵州省西北部,具有岩溶发育程度较强及海拔较高的特点;第 V 分区位于贵州省东南部,为非岩溶区域,海拔较低,温度较高,降雨量相对充沛;第 IV 分区岩溶发育程度较高且海拔较低;第 I、II 分区分别处于第 III 分区与第 V 分区的过渡区域,岩溶发育程度与海拔高度适中。

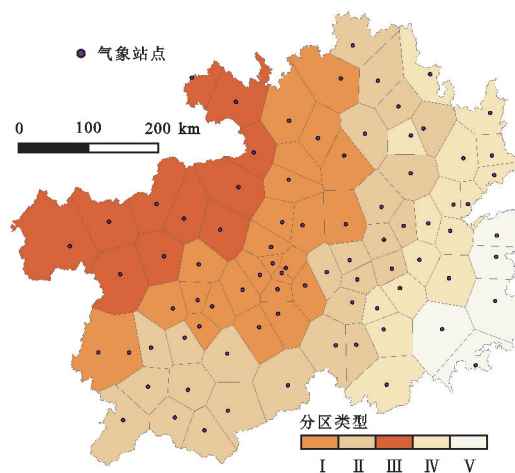


图 2 分区结果

Fig.2 Partitioning result

3.2 喀斯特地区农业干旱指数时空演变特征

3.2.1 喀斯特地区农业干旱指数时间演化 年尺度上,喀斯特地区 2000—2021 年 SSI 值主要呈下降趋势,表明农业干旱呈现加重趋势,2011 年 SSI 值为 2000—2021 年最小值,农业干旱最为严重。不同分区 SSI 值变化趋势不同(图 3a),其中,第 I、II、III 分区 SSI 趋势呈现明显的一致性;第 IV、V 分区也具有较为一致的趋势。在 2003—2005 年期间,第 I、II、III 分区农业干旱呈先增再减后增趋势不同,与第 IV、V 分区的变化趋势相反。

季节尺度上,喀斯特地区随着季节更替,农业需

水量也随之发生变化,作物在夏季生长发育需水量大,SSI在夏季的值总体比其他季节低。而季节尺度SSI变化趋势在5个分区有所不同(图3b),其中,第I、II、V分区具有高度相似的变化趋势,第IV分区与前者变化趋势相反,第III分区具有独特的递减趋势,且5个分区SSI最大值与最小值具有差异性。其中,第I、II、III、IV分区最大值与最小值均在2020年春季与2011年秋季;第V分区的最大值与最小值在2015年冬季和2011年夏季。

月尺度上,喀斯特地区月尺度SSI值变化趋势不同于年尺度与季节尺度,基于月尺度SSI变化趋势在5个分区基本一致,变化幅度仅有细微差别,5个区域SSI最大值与最小值出现在不同月份(图3c)。其中,第I、II区域最小值均在2011年9月,最大值分别在2020年2、3月;第III区域最小值在2011年8月,最大值在2016年1月;第IV、V区域最小值与最大值均在2011年5月和2020年3月。

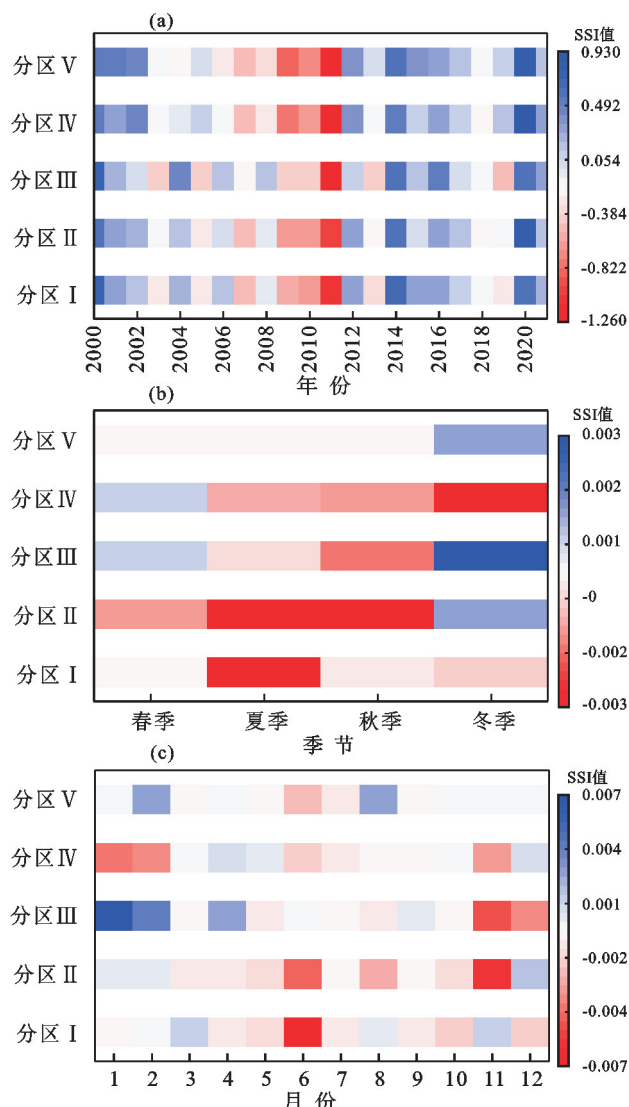


图3 各时间尺度SSI变化趋势

Fig.3 The trend chart of SSI across various time scales

3.2.2 喀斯特地区农业干旱指数空间分布 对83个站点SSI值采用克里金插值法由点到面扩展。年尺度上,农业干旱呈现西高东低,总体由南往北逐渐减轻(图4)。西部地区土壤较少,土层浅,裸岩较多,加之喀斯特地形渗水结构,导致蓄水、保水能力差;南部地区降雨量比同期北部地区少,地势较高,不利于水分储存,由南往北降雨量逐渐增加,地形相对平坦,蓄水能力增强。季节尺度上,由于春夏两季正值农作物生长发育需水关键期(图5),春夏季 $SSI < 0$ 的覆盖面积大于秋冬季,且总体上中西部地区农业干旱较其余地区严重。月尺度上,6、7月正值作物生长发育的需水阶段,因此其农业干旱程度较其余月份严重,不同月份 $SSI < 0$ 发生区域有所不同,但总体集中在西部地区, $SSI < 0$ 的空间覆盖面积12月 $>$ 6月 $>$ 1月 $=$ 2月 $>$ 3月 $>$ 9月 $>$ 5月 $=$ 7月 $=$ 10月 $>$ 8月 $>$ 4月(图6)。

3.3 喀斯特地区农业干旱对气象因子脉冲响应分析

当农作物受到外来因子冲击时,其生长发育会产生一定影响。同理,SSI受到外来因子作用时,其变化趋势也随之改变,当SSI受到随机扰动(如 Pre 、 T 、 E 、 W 、 P 、 SW 及 SSI)时,脉冲响应函数可计算出随机扰动因子对SSI当前及未来值的变化轨迹。

第I、II、III、IV、V分区SSI对随机扰动因子的脉冲响应曲线见图7。将SSI、 E 、 P 、 Pre 、 SW 、 T 及 W 对SSI冲击值进行归一化处理。月尺度上,蒸散发作为调控水量平衡的重要因子,第I、II、III、IV分区 E 对SSI的脉冲均在第3期达到峰值,于第7期左右恢复平稳,第V分区于第6期达到峰值,第8期恢复平稳;大气压强可以影响天气模式和降水分布,从而对农业干旱产生直接或间接的影响,第III分区 P 对SSI的脉冲在第1期便达到峰值,其余分区均在第3期达到峰值,且5个分区均在第8期恢复平稳;降雨量是衡量是否发生干旱的重要指标,5个分区 Pre 对SSI的冲击均在第1期到达峰值,第7期周围逐渐恢复平稳;土壤水分作为衡量农业干旱的重要指标,第I、II、III、IV分区 SW 对SSI的脉冲在第4期达到峰值,第V分区于第3期达到峰值,第II、V分区 SW 恢复平稳的期数比第I、III、IV分区多3期;温度变化也影响农作物的生长发育,5个分区 T 对SSI的冲击在第3期附近达到脉冲峰值,第V分区恢复期数明显长于其他分区;风速较大对农作物造成机械性损伤和生理损害,还造成植株因失水而凋萎,甚至导致农作物死亡,由 W 对SSI的冲击来看,其在3~5期内达到峰值,而恢复平稳的期数最大值与最小值相差5。

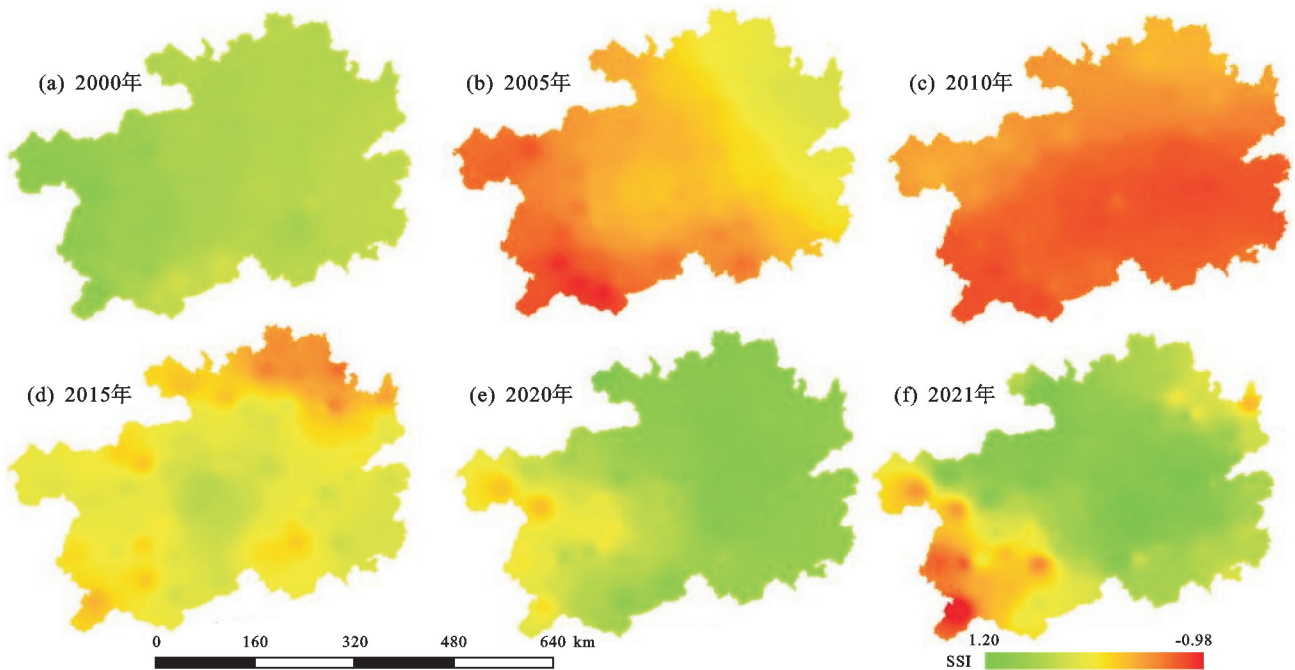


图 4 年尺度 SSI 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of SSI on an annual scale

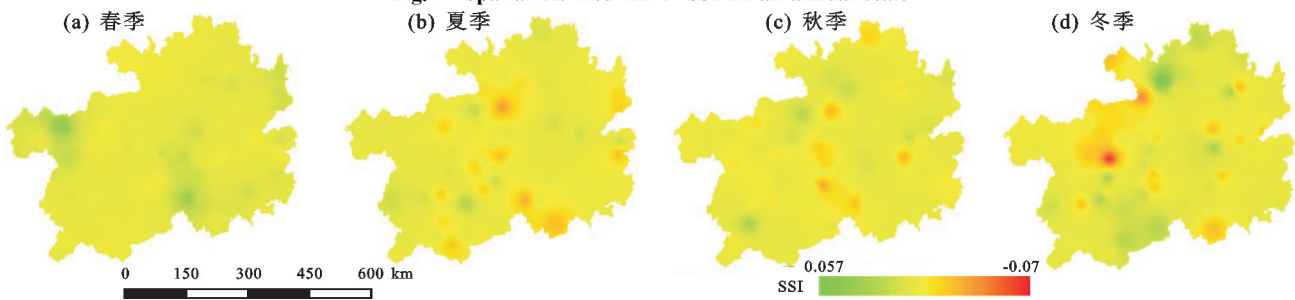


图 5 季节尺度 SSI 空间分布

Fig.5 Spatial distribution of SSI at seasonal scale

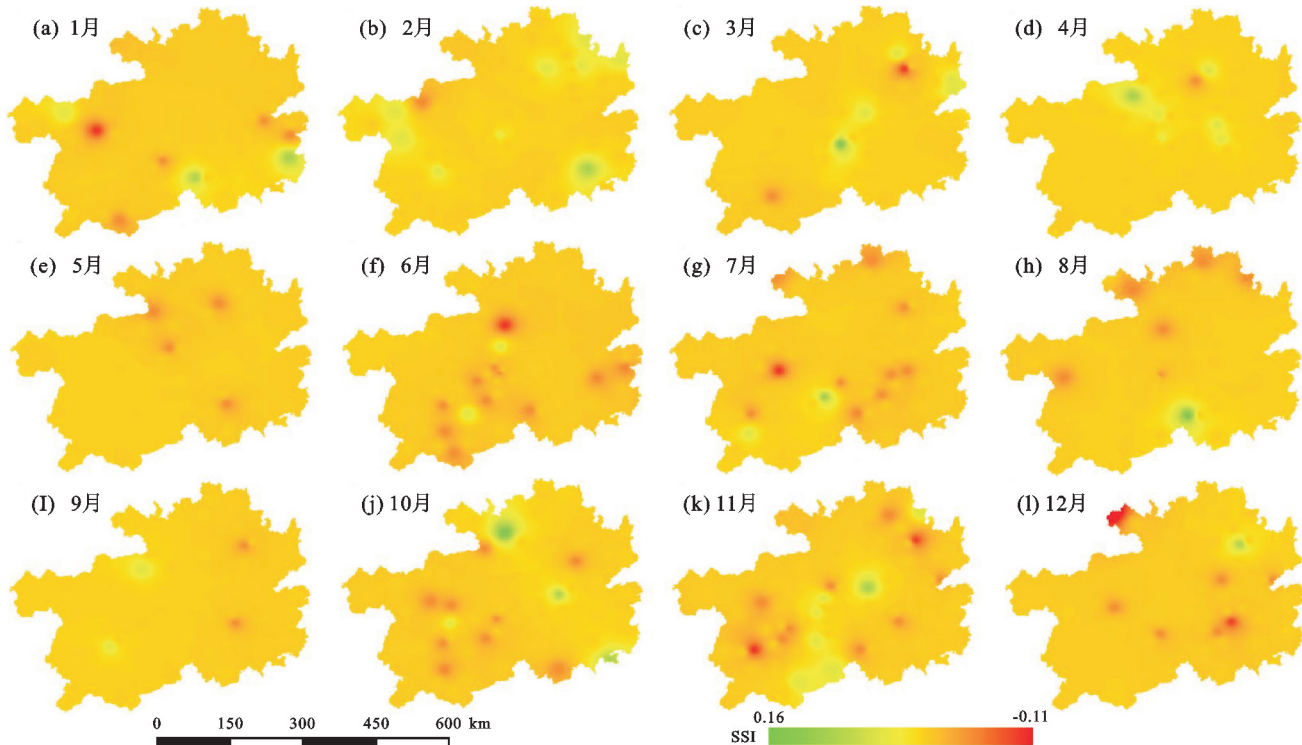


图 6 月尺度 SSI 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of SSI at the monthly scale

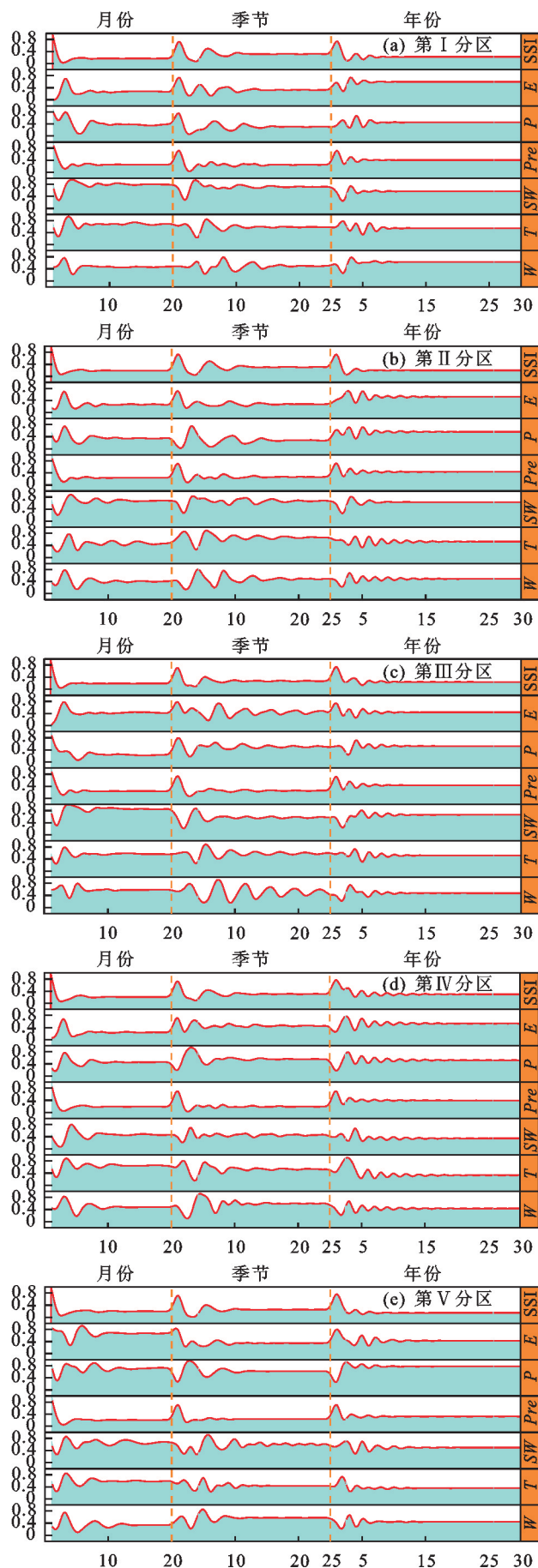


图7 各分区脉冲响应结果

Fig.7 The results of pulse response analysis for each region

季节尺度上, E 与 Pre 2个变量对 SSI 的冲击在5个分区均为第1期便达到峰值, Pre 对 SSI 冲击的恢复期为分区 $III > IV > I = II > V$,而变量 E 恢复平稳的期数仅在第III分区有较大差异,多于其他分区10期; P 对 SSI 的冲击在第I、III分区于第1期达到最大值,而第II、IV、V区域在第3期达到峰值,与 E 冲击变量相似,在第III分区恢复期较长; SW 对 SSI 的冲击达到峰值的区间在3~5期,恢复平稳期数15~21; T 对 SSI 的冲击,在第IV分区于第2期便达到峰值,其余分区均在第5期达到峰值,恢复平稳的期数为分区 $III = IV > II > V > I$;风速不会直接影响农业干旱,其作用是间接的,因此 W 对 SSI 的冲击在中后期才达到峰值。

年尺度上,各变量对 SSI 的脉冲响应达到峰值所需期数为 $Pre < E = W < P < SW < T$,而恢复平稳期则为 $Pre > W > T > E > P > SW$ 。降雨量作为衡量干旱的重要指标,5个分区 Pre 对 SSI 的冲击在第1期即达到峰值,但不同分区恢复平稳所需的期数差异较大,其中第I分区最短,第IV区域最长;对于潜在蒸散发的冲击,达到峰值所需的期数第II、IV区域需要5期,而第III、V分区则仅需要1期;第I与第II分区对于 T 变量达到峰值的期数一致,但恢复平稳所需期数第II分区为第I分区的2倍。

3.4 喀斯特地区农业干旱对气象因子方差分析

使用方差分解定量解析变量 E 、 P 、 Pre 、 SW 、 T 及 W 对 SSI 冲击的贡献比例,不同时间尺度同一变量对农业干旱贡献比例在5个分区变化趋势不同。月尺度上(图8a),各分区贡献比例总体上为 $Pre > E > P > SW > W > T$,仅有第II与第IV分区 $W > T$,其中降雨量所占比重随时间尺度延长而增大;季节尺度上(图8b),5个分区总体贡献比例为 $Pre > P > E > T > SW > W$,第IV分区 SW 比例占比最低,且同比其他区域平均减少3%,第I、II分区贡献比例为 $E > P$;年尺度上(图8c),5个分区总体贡献比例为 $Pre > W > E > SW > P > T$,降雨量在年尺度贡献率相比月尺度和季节尺度大幅度增长,风速贡献率在第IV、V区域大幅度增加并超过20%。

4 讨论

4.1 VAR模型合理性分析

向量自回归(VAR)模型采用Eviews 13建立,以2000—2021年/季节/月降雨量、气温、蒸散发、风速、气压及土壤水分数据为基础建立VAR模型。首先对数据序列进行ADF平稳性检验发现,潜在蒸散发、压强、降雨量、 SSI 数据为平稳序列,对非平稳序列数据土壤水分、温度、风速进行一阶差分处理,使所选取指标变量均为平稳序列数据,根据 SC 、 HQ 、 AIC 、 FPE 、 LR 统

计量的结果,最终确定年、季节、月的滞后阶数分别为 1,1,3;其次,对月、季节、年 VAR 模型进行稳定性检验显示,所有根模的倒数均 <1 ,符合 VAR 模型建立的标准,而后进行脉冲响应及方差分解分析。

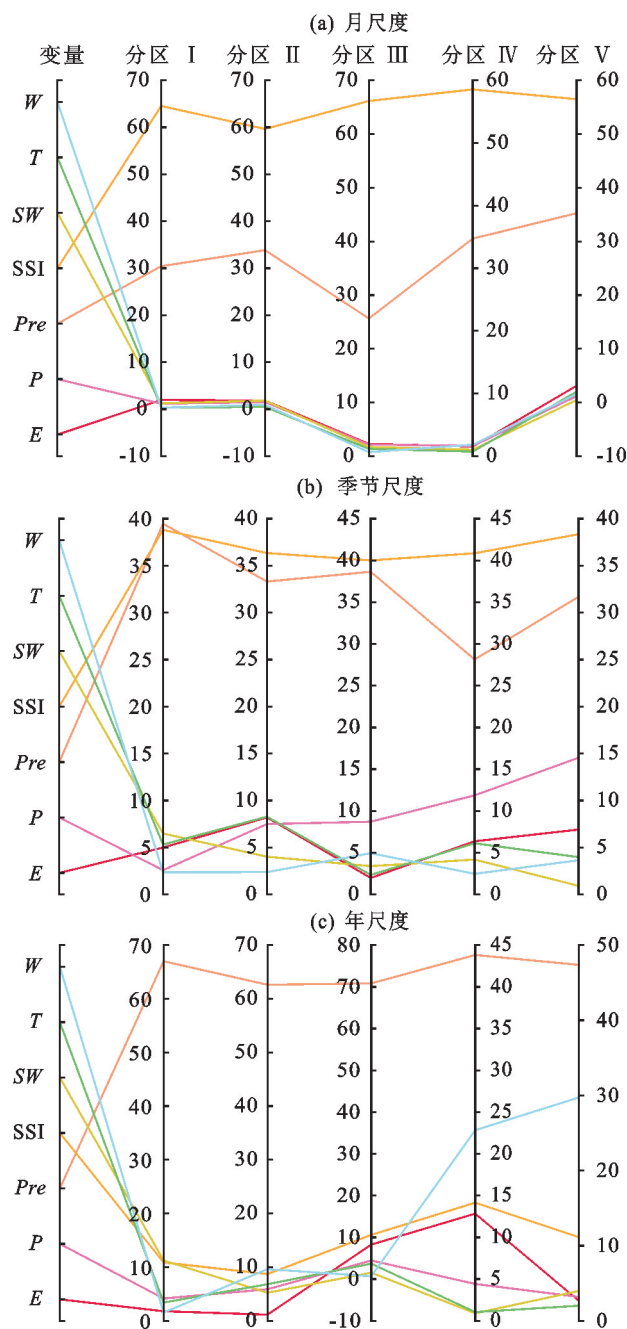


图 8 不同时间尺度方差分解结果

Fig.8 Variance decomposition results at different time scales

4.2 农业干旱对气候变化的响应机制

各气象因子对农业干旱的冲击程度并不相同,且具有时间上的异步性。月尺度上,各因子对 SSI 的冲击达到峰值仅有 E 在第 V 分区与其他分区具有较大差异,同比其余分区长 3 期,第 V 分区为非岩溶区域,土层较厚,土壤保水能力最强,因此,第 V 分区 E 对农业干旱的冲击与其他区域相比较为缓慢^[21],且 SW 因子恢复平稳的期数最短。

季节尺度上,由于第 IV 分区海拔高于第 V 分区且低于其他 3 个分区,且岩溶发育程度较高^[22],各因子对 SSI 的冲击达到峰值所需期数仅有 T 在第 IV 分区与其他区域具有较大的差异,同比其余分区多 3 期;E 因子恢复平稳期数第 III 分区高于第 V 分区 12 期,这是由于第 III 分区岩溶发育程度较高,土层薄,储水能力差,蒸散发活动也较为剧烈^[23-24]。

年尺度上,仅 E 与 T 对 SSI 的冲击达到峰值时具有较大差异,第 III、V 分区达到峰值位于前期,其余区域均在中后期,第 III 分区岩溶发育较为剧烈,土层较薄,储水能力较差,因此,E 对农业干旱的响应比较剧烈^[19];而第 V 分区虽大部分为非岩溶地区,但相比其他区域^[25-26],海拔较低,年平均气温较高,潜在蒸散发量比较大,E 对农业干旱的响应也表现比较剧烈,且第 IV 分区 E 因子对 SSI 冲击恢复平稳所需周期远高于其余分区,这是由于第 IV 区域岩溶发育与年平均气温都高于其他分区。

不同时间尺度,降雨量在农业干旱中都占有绝对性地位^[27],由于大尺度的降雨量更能反映出地区的气候特征和降水规律,因此,随着时间尺度的增加降雨量贡献率大幅度上升;风速是影响蒸发过程的关键因素,随着风速的增大,地表水分的蒸发作用加强^[21],特别是在干旱地区,可导致土壤更快地失去水分,加剧干旱程度,当考虑较长时间尺度风速变化时,如从季节到年际,这种蒸发作用累积效应更为显著,因此,风速对农业干旱贡献率由月到年大幅度增强,温度越高,风速越大,地表水分蒸发作用越强,是在第 IV、V 分区年尺度上风速在农业干旱中所占贡献率大幅度上升的原因。

4.3 本研究的适用范围

本文通过降雨量指标固定分区边界,考虑气象因子和表层土壤水分的情况,得出不同区域各变量因子对农业干旱的冲击状况,得到的结果可以解释农业干旱对气象因子与表层土壤水分的动态响应。也有研究^[28-32]证实,人类活动、大尺度的大气环流及不同土壤质地也对农业干旱产生影响。结果差异部分可能是由于变量因子的选取及分区标准不同而导致。因此,本文结果仅能解释以降雨量为分区边界的喀斯特地区局地气象因素与表层土壤水分含量对农业干旱的冲击情况。

5 结论

(1)贵州省 2000—2021 年农业干旱整体呈现西高东低,由南往北逐渐减轻;春、夏季正值作物生长发

育需水阶段,其农业干旱程度强于秋冬季。

(2)随着时间尺度延长,岩溶发育较强地区潜在蒸散发对农业干旱的冲击反应越来越剧烈,表层土壤水分却越来越平缓,非岩溶地区恢复平稳的周期较短;非岩溶地区虽土层厚,土壤储水能力强,但由于其温度较高,其农业干旱对潜在蒸散发及温度响应也较为剧烈,其中对温度的恢复平稳周期较长。

(3)降雨量在农业干旱中起主导作用,月、季、年尺度降雨量平均贡献率 41.48%,且降雨与风速随时间尺度增加在农业干旱中作用增强,月-季节-年尺度二者贡献率分别为 31.88%, 34.25%, 58.33% 和 1.07%, 3.15%, 12.88%。

参考文献:

- [1] 刘哲琼,余敦先,夏军,等.黄土高原地区气象干旱动态格局演变及其对植被的影响[J].地理科学,2023,43(9):1659-1671.
- LIU Z Q, SHE D X, XIA J, et al. Impacts of meteorological drought on vegetation and their dynamic pattern evolutions on the Loess Plateau[J].Scientia Geographica Sinica,2023,43(9):1659-1671.
- [2] XU S X, WANG Y H, LIU Y, et al. Evaluating the cumulative and time-lag effects of vegetation response to drought in Central Asia under changing environments [J].Journal of Hydrology,2023,627:e130455.
- [3] 陈莉会,贺中华,潘杉,等.基于不同时间尺度的喀斯特农业干旱时空演变特征及驱动探测:以贵州省为例[J].水土保持学报,2023,37(2):136-148.
- CHEN L H, HE Z H, PAN S, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of karst agricultural drought based on different time scales and driving detection: A case study of Guizhou Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):136-148.
- [4] 袁淑杰,何兴潼,谷晓平,等.贵州喀斯特区域土壤湿度持续下降时期气象要素对土壤湿度影响研究[J].土壤通报,2018,49(2):320-328.
- YUAN S J, HE X T, GU X P, et al. Response of declining soil moisture on meteorological factors over karst area of Guizhou Province[J].Chinese Journal of Soil Science,2018,49(2):320-328.
- [5] 张浪,贺中华,杨铭珂,等.气象干旱-水文干旱传播过程特征及其影响因素:以贵州黔中水利工程区为例[J].水土保持学报,2022,36(1):142-152.
- ZHANG L, HE Z H, YANG M K, et al. Characteristics of meteorological drought-hydrological drought propagation process and its influencing factors: Taking Guizhou Qianzhong water conservancy project area as an example[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):142-152.
- [6] ZHOU R X, JIN J L, CUI Y, et al. Agricultural drought vulnerability assessment and diagnosis based on entropy fuzzy pattern recognition and subtraction set pair potential[J].Alexandria Engineering Journal,2022, 61(1):51-63.
- [7] HUANG S Z, LI P, HUANG Q, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [J]. Journal of Hydrology, 2017,547:184-195.
- [8] LI F W, ZHANG M J, ZHAO Y, et al. Influence of irrigation and groundwater on the propagation of meteorological drought to agricultural drought[J].Agricultural Water Management,2023,277:e108099.
- [9] 陈令仪,朱秀芳,唐谊娟,等.黄河流域气象水文干旱时滞效应与影响因素分析[J].地理科学,2023,43(10):1861-1868.
- CHEN L Y, ZHU X F, TANG Y J, et al. Time lag effect and influencing factors of meteorological and hydrological drought in the Yellow River Basin[J].Scientia Geographica Sinica,2023,43(10):1861-1868.
- [10] LIU Y, SHAN F Z, YUE H, et al. Global analysis of the correlation and propagation among meteorological, agricultural, surface water, and groundwater droughts[J].Journal of Environmental Management,2023,333:e117460.
- [11] WANG H L, ZHU Y J, QIN T L, et al. Study on the propagation probability characteristics and prediction model of meteorological drought to hydrological drought in basin based on copula function[J].Frontiers in Earth Science,2022,10:e961871.
- [12] GUO Y, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels[J].The Science of the Total Environment,2020,712:e136502.
- [13] HE Z H, PAN S, GU X L, et al. Study on the driving mechanism of lagged effects based on different time scales in a karst drainage basin in South China[J].Scientific Reports,2023,13(1):e9347.
- [14] DENG S M, TAN X Z, TAN X J, et al. On the development and recovery of soil moisture deficit drought events[J].Journal of Hydrology,2024,632:e130920.
- [15] 张文强,刘若男,张含笑,等.基于向量自回归和动态模式分解的城市轨道交通短时 OD 预测[J].北京交通大学学报,2023,47(6):41-49.
- ZHANG W Q, LIU R N, ZHANG H X, et al. Short-term prediction of OD for urban rail transit using vector autoregression and dynamic mode decomposition[J].Journal

- of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(6): 41-49.
- [16] 王丹, 吴琳娜, 冯紫微, 等. 1995 年以来贵州省土地利用变化对地表径流的影响研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(5): 44-55.
- WANG D, WU L N, FENG Z W, et al. Study on the influence of land use change on surface runoff in Guizhou Province since 1995 [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023, 41(5): 44-55.
- [17] 彭大为, 周秋文, 谢雪梅, 等. 下垫面因素对喀斯特地区水分利用效率的影响[J]. 地理科学进展, 2021, 40(12): 2086-2100.
- PENG D W, ZHOU Q W, XIE X M, et al. Effect of underlying surface factors on water use efficiency in the karst area [J]. Progress in Geography, 2021, 40 (12): 2086-2100.
- [18] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 10-14.
- QIAN L L, HE Z H, LIANG H, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of agricultural drought based on precipitation Z index in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2019, 37(1): 10-14.
- [19] HAO Z C, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model [J]. Advances in Water Resources, 2013, 57: 12-18.
- [20] OUMA Y O, MOALAFHI D B, ANDERSON G, et al. Dam water level prediction using vector AutoRegression, random forest regression and MLP-ANN models based on land-use and climate factors [J]. Sustainability, 2022, 14(22): e14934.
- [21] SHI P, TANG H, QU S M, et al. Drought propagation in karst and non-karst regions in Southwest China compared on a daily scale [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: e101628.
- [22] CHEN L H, HE Z H, GU X L, et al. Construction of an agricultural drought monitoring model for karst with coupled climate and substratum factors: A case study of Guizhou Province, China [J]. Water, 2023, 15(9): e1795.
- [23] LU X J, LI Z B, YAN H B, et al. Spatiotemporal variations of drought and driving factors based on multiple remote sensing drought indices: A case study in karst areas of southwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(11): 3215-3232.
- [24] 贺中华, 陈晓翔. 基于土壤因素耦合的喀斯特流域水文干旱模拟: 以贵州省为例 [J]. 地理科学, 2013, 33(6): 724-734.
- HE Z H, CHEN X X. The hydrological drought simulating in karst basin based on coupled soil factors: Taking Guizhou Province as a case [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(6): 724-734.
- [25] 陈正发, 李靖, 相彪, 等. 基于 SPI 的云南省多尺度干旱时空演变特征识别 [J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 92-99.
- CHEN Z F, LI J, XIANG B, et al. Spatiotemporal variation of drought in Yunnan Province calculated using the standardized precipitation index [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 92-99.
- [26] 尹航, 张泽中, 张伟杰, 等. 基于植被健康指数的内蒙古干旱时空特征分析及驱动因素研究 [J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 80-89.
- YIN H, ZHANG Z Z, ZHANG W J, et al. Using vegetation health index to calculate spatiotemporal variation in drought and its determinants in Inner Mongolia [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 80-89.
- [27] TONI A T, MALCHEREK A, KASSA A K. Agroclimatic zone-based analysis of rainfall variability and trends in the wabi shebele river basin, Ethiopia [J]. Water, 2022, 14(22): e3699.
- [28] 游漫, 贺中华, 张浪, 等. 贵州省农业与气象干旱特征及其响应关系 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 255-264.
- YOU M, HE Z H, ZHANG L, et al. Characteristics of agricultural and meteorological drought in Guizhou Province and their response relationship [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 255-264.
- [29] SHAH D, SHAH H L, DAVE H M, et al. Contrasting influence of human activities on agricultural and hydrological droughts in India [J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: e144959.
- [30] WU J J, GU Y H, SUN K X, et al. Correlation of climate change and human activities with agricultural drought and its impact on the net primary production of winter wheat [J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: e129504.
- [31] REZAEI A. Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e126928.
- [32] YU M X, ZHANG J Y, WEI L, et al. Impact of soil textures on agricultural drought evolution and field capacity estimation in humid regions [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: e130257.