

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

陈莉会¹, 贺中华^{1,2,3}, 潘杉¹, 顾小林⁴, 许明金⁴, 游漫¹, 皮贵宁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 550002)

摘要:为提高喀斯特农业干旱监测的准确性和进一步揭示其驱动机制,基于 MODIS—NDVI/LST 数据,利用地理加权回归模型对 GLDAS 土壤水分进行降尺度研究;并基于 SSI 对农业干旱进行识别,分析不同时间尺度农业干旱时空演变及联合概率特征;最后运用地理探测器揭示喀斯特农业干旱驱动机制。结果表明:(1)20 年间,贵州省不同时间尺度的干旱强度整体上呈减弱趋势,干旱面积也呈减少趋势;干旱强度和干旱频率在空间上呈西高东低分布格局。(2)干旱联合特征值呈秋季>冬季>生长季>夏季>全年>春季规律,说明贵州省秋冬容易发生较高强度和较多面积的农业干旱。(3)岩溶发育强度、降雨和海拔是喀斯特农业干旱主导驱动因子,与其空间分布有较强的耦合关系;不同因子交互作用对 SSI 均呈双因子增强和非线性增强,且各因子之间无显著性差异的组合较少,说明农业干旱是因子之间协同的结果。研究结果可为喀斯特农业干旱监测和防旱抗旱措施的制定提供参考依据。

关键词:农业干旱; 地理加权回归模型; 地理探测器; 干旱联合特征; 降尺度

中图分类号:S423 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)02-0136-13

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.017

Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Karst Agricultural Drought Based on Different Time Scales and Driving Detection —A Case Study of Guizhou Province

CHEN Lihui¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, PAN Shan¹, GU Xiaolin⁴, XU Mingjin⁴, YOU Man¹, PI Guining¹

(1.School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2.National Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 3.Guizhou Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001; 4.Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002)

Abstract: To improve the accuracy of karst agricultural drought monitoring and further reveal its driving mechanism, a downscaling study of GLDAS soil moisture was conducted based on MODIS—NDVI/LST data using a geographically weighted regression model; agricultural drought was identified based on SSI, and the spatial and temporal evolution and joint probability characteristics of agricultural drought at different time scales were analyzed; finally, the driving mechanism of karst agricultural drought was revealed by geographic detector. The results showed that: (1) The drought intensity at different time scales in Guizhou Province showed an overall weakening trend over the 20-years period, and the drought area also showed a decreasing trend; the drought intensity and drought frequency showed a spatial distribution pattern of high in the west and low in the east. (2) The joint characteristic values of drought showed a pattern of autumn > winter > growing season > summer > year-round > spring, indicating that agricultural drought of higher intensity and larger area was prone to occur in autumn and winter in Guizhou Province. (3) Karst development intensity, rainfall and elevation were the main driving factors of agricultural drought in karst agriculture, and there was a strong coupling relationship with their spatial distribution; the interaction of different factors showed both

收稿日期:2022-08-11

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(KT201402,KT202237);贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目

第一作者:陈莉会(1997—),女,贵州习水人,在读硕士,主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:chenlihui0828@163.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州兴义人,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:zhonghuahe@gznu.edu.cn

two-way enhancement and non-linear enhancement of SSI, and there were few combinations without significant differences among factors, indicating that agricultural drought was the result of synergy among factors. The results can provide a reference basis for the monitoring of agricultural drought in karst agriculture and the formulation of drought prevention and anti-drought measures.

Keywords: agricultural drought; geographically weighted regression models; geographic detector; joint drought characteristics; downscaling

预测在21世纪中后期,中国将呈现广泛干旱化趋势^[1]。干旱是影响范围最广、持续时间最久的自然灾害,不仅影响农作物生长、人类活动和社会经济等^[2],同时还影响着国家粮食安全^[3]。农业干旱监测是减少农业损失的重要途径^[4],因此,精准监测农业干旱具有重要意义。

农业干旱是指地表土壤水分亏缺无法满足植被正常生长,甚至导致作物产量亏损并造成经济损失的现象^[5],其以土壤水分和植被生长状况来反映植被生长过程中需水量的亏损程度^[6],因此,土壤水分是农业干旱监测的重要因子^[7]。目前主要通过站点实测和遥感技术获取土壤水分,站点实测数据虽然精度高,但很难大面积获取^[8],且喀斯特地区土壤水分时间序列不完整。遥感技术具有快速、大面积、全天候获取数据的特点,学者们利用遥感技术围绕土壤水分进行了许多关于农业干旱的研究,并提出许多基于土壤水分的农业干旱监测指数。Wei等^[9]基于ERA5—Land的土壤水分亏缺指数(soil water deficit index, SWDI)对中国南方四省进行农业干旱评估,发现全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)产品和ERA5—Land产品与站点实测的土壤水分评估的结果相似;吴志勇等^[10]基于可变渗透模型(variable infiltration capacity, VIC)模型模拟土壤含水量并计算土壤含水量距平指数(variable infiltration capacity, SMAPI),SMAPI能够较好地再现长江流域历史干旱情形;田晴等^[11]选择CCI和实测土壤水分,运用标准化土壤湿度指数(standard soil moisture index, SSMI)研究长江流域农业干旱历史时空演变规律。除此之外,目前已具有许多土壤水分卫星观测平台和产品,包括土壤水分主被动卫星(SMAP)、气象业务卫星(SMOS),以及风云三号卫星(FY-3B/C)等。这些产品对于区域农业干旱监测空间分辨率较粗,但目前国内外已有许多学者为获取中高分辨率对土壤水分进行空间降尺度研究^[12],同时还解决了土壤水分时间序列不完整问题。

喀斯特农业干旱具有独特的驱动机制,然而目前关于喀斯特农业干旱驱动机制的探讨中,综合考虑多因子对农业干旱的影响研究尚少。综上,本文以贵州省为例,利用地理加权回归模型(geographically

weighted regression, GWR)^[13]对GLDAS土壤水分进行降尺度研究,解决实测数据时间序列不完整、遥感数据空间分辨率低的问题;再基于此以标准化土壤湿度指数(standardize soil moisture index, SSI)为干旱指标,从年尺度、生长季尺度、季尺度分析喀斯特干旱强度、干旱频率和干旱面积时空演变特征,同时利用Copula函数分析干旱强度和干旱面积的联合概率特征;并从气象、下垫面和人类活动3个方面共选取14个因子,运用地理探测器(geographic detector, GD)进一步揭示喀斯特农业干旱驱动机制,以期为喀斯特农业干旱抗旱减灾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部(图1),云贵高原东斜坡地带($103^{\circ}36' - 109^{\circ}35'E$, $24^{\circ}37' - 29^{\circ}13'N$),全省面积约 $1.76 \times 10^5 km^2$,喀斯特地区约占全省面积的73.8%,是世界上喀斯特地貌分布最广的区域。境内河流密布,总长度11 270 km;以乌蒙山—苗岭为分水岭,分属于长江流域和珠江流域。气候属于亚热带湿润季风气候^[14],大部分地区年均气温为 $14\sim16^{\circ}C$,年降水量 $1\,100\sim1\,400 mm$,但时空分布不均,导致干旱现象较普遍。平均海拔1 100 m,地势呈西高东低,干旱发生频率整体上也呈相似分布格局。2011年受厄尔尼诺现象影响,干旱明显加重,尤其喀斯特岩溶发育剧烈,地表蓄水能力弱,水土流失严重,影响农业生产。

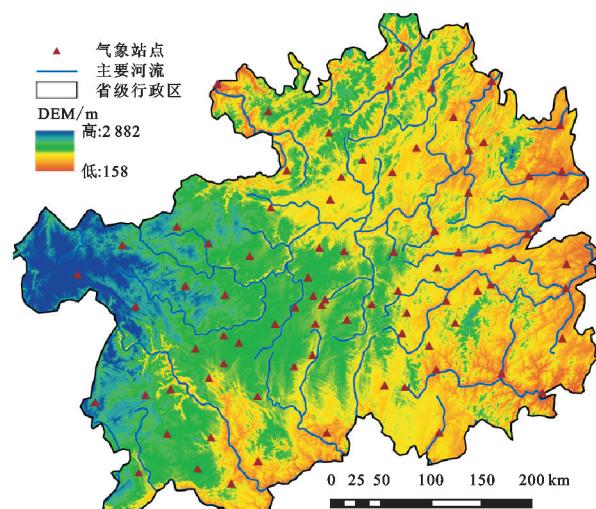


图1 研究区概况

1.2 数据来源与处理

本研究数据来源见表 1。时间序列为 2001—2020 年, 投影均统一为 WGS-1984-UTM-zone-48N。土壤水分“GLDAS-NOAH025-M-2.1”数据集中的 0—10 cm 数据, 单位为 kg/m³。归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表温度(land surface temperature, LST)利用 HEG(HDF-EOS TO GeoTIFF Conversion Tool)统一投影和空间分辨率, 并合成年尺度、生长季尺度和季尺度(春季

3—5 月, 夏季 6—8 月, 秋季 9—11 月, 冬季 12 月至翌年 2 月)。将土地利用数据重分类为水田、旱地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 7 类, 使用干旱强度最强年份最近年份的土地利用进行驱动探测, 比如, 2009 年、2011 年为干旱最强年份, 则选用 2010 年的数据。岩溶发育强度数据来源于《贵州省水文地质志》^[15] 中的贵州省岩溶发育强度图, 将其数字化并分为非岩溶区、弱发育区、中等发育区、较强发育区及强烈发育区。

表 1 数据集与数据来源

数据集	空间分辨率	时间分辨率	数据来源
土壤含水量	0.25°	1 个月	全球陆面数据同化系统(global land date assimilation system, GLDAS) (https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/#)
NDVI	250 m	16 d	LAADS DACC 数据中心(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)
LST	1 km	8 d	同 NDVI
降水量	1 km	1 个月	国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn)
潜在蒸散发	1 km	1 个月	同降水量
平均气温	1 km	1 个月	同降水量
人口密度	1 km	1 a	WorldPop (https://www.worldpop.org/)
土地利用数据	1 km	5 a	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
土壤类型数据	1 km	—	同土地利用数据
土壤质地数据	1 km	—	同土地利用数据
DEM	1 km	—	同土地利用数据
坡度	1 km	—	基于 DEM 数据利用 ArcGIS 计算获取
坡向	1 km	—	基于 DEM 数据利用 ArcGIS 计算获取
岩溶发育强度分区	—	—	《贵州省水文地质志》
岩性	—	—	World Soil Information (https://www.isric.org/)
地貌类型	—	—	贵州省 1:100 万综合地貌图

1.3 研究方法

1.3.1 喀斯特农业干旱识别 SSI 考虑土壤水的分布特征, 计算前需先确定土壤水分的概率分布^[16]。本研究年均土壤水分时间序列数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验, 结果符合正态分布。因此, SSI 的计算方法为:

$$SSI = \frac{SM - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: SM 为某一时间尺度的土壤水分; μ 为该时间尺度下多年土壤水分均值; σ 为该时间尺度下多年土壤水分标准差。SSI 干旱等级划分正常、轻旱、中旱、重旱和特旱, SSI 值分别为 $(-0.5, +\infty]$, $(-1.0, -0.5]$, $(-1.5, -1.0]$, $(-2.0, -1.5]$ 和 $(-\infty, -2.0]$ 。

1.3.2 土壤水分降尺度研究 GWR 是全局回归模型的扩展, 考虑变量的空间地理位置和辅助因子参数来建立线性回归模型^[17], 该模型的高斯核平滑函数还考虑回归系数的空间非平稳性, 其降尺度效果优于全局回归模型^[18]。NDVI 和 LST 是土壤水分降尺度研究广泛采用的 2 个辅助因子^[19], 因此, 本研究选择

NDVI 和 LST, 利用局部自适应窗口 GWR 将空间分辨率为 0.25° 的 GLDAS 土壤水分提高为 1 km。具体步骤为:

(1) 将 250 m 的 NDVI 和 1 km 的 LST 重采样, 转成 0.25°(低分辨率, L), 保证 NDVI 和 LST 与 GLDAS 空间分辨率一致。

(2) 在低空间分辨率(0.25°, L)建立研究区土壤水分 SM_L 与 NDVI 和 LST 的映射关系。即:

$$SM_L(i) = C_0(i) + C_1(i)NDVI_L(i) + C_2(i)LST_L(i) + R_L(i) \quad (2)$$

(3) 将 1 km 的 $NDVI_H$ 和 LST_H 代入式(2), 计算高空间分辨率(1 km, H)的土壤水分。即:

$$SM_H(i) = C_0(i) + C_1(i)NDVI_H(i) + C_2(i)LST_H(i) + R_H(i) \quad (3)$$

公式(2)和公式(3)中: $SM_L(i)$ 为 0.25° 的 GLDAS 图像第 i 个格网的土壤水分; $SM_H(i)$ 为 1 km 图像第 i 个格网的土壤水分; C_0 、 C_1 和 C_2 分别为常数项、NDVI 系数和 LST 系数, 即不同格网的常数项和系数都不相同; $NDVI_L(i)$ 、 $LST_L(i)$ 分别为 0.25° 图像第 i 个格网的

植被指数和地表温度; $NDVI_H(i)$ 、 $LST_H(i)$ 分别为 1 km 图像第 i 个格网的植被指数和地表温度。

1.3.3 干旱联合概率 Copula 函数是多个变量定义在 $[0,1]$ 上均匀分布的联合分布函数, 可联合服从不同边缘分布的变量, 能更好地描述变量间的关系, 该函数构建的多变量联合分布模型较传统多元分布模型优势显著^[20], 为干旱分析提供新的途径。根据 Sklar 定理, 干旱强度(x)和干旱面积(y)的联合分布函数与边缘分布函数存在一一对应的关系, 因此构建干旱强度和干旱面积二元 Copula 模型, 可表示为:

$$F(x,y) = C_\theta [F_x(x), F_y(y)] = C(U_x, U_y) = C(U, V) \quad (4)$$

$$U = F(x)_x, V = F(y)_y$$

式中: θ 为待定参数; $F(x,y)$ 为干旱强度和干旱面积的联合分布函数; U, V 分别为干旱强度和干旱面积的边缘分布函数。

1.3.4 干旱驱动探测 GD 是广泛应用于各个领域中^[21] 探测地理要素空间分异性以及揭示其背后驱动力的一种新空间分析模型^[22], 解释力强度(q 值)不用进行线性假设, 能客观地描述探测因子能在多大程度上解释探测变量^[23], 同时还能有效避免多变量共线性问题。因此, 本研究利用 GD 探测各因子在不同时间尺度对农业干旱空间分异的影响程度^[21], 进一步探讨喀斯特农业干旱驱动机制。GD 包括因子、风险、交互和生态 4 个探测器^[22]。 q 值的计算表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 为解释力强度。 q 值越大, 表示探测因子对农业干旱的解释力越强, q 值的值域为 $[0,1]$; L 为探测因子的类别数; h 为某一具体类别; N_h 和 N 分别为某类别 h 和全区单元数; σ_h^2 和 σ^2 为分别为某类别 h 和全区单元数; q 值以 F 统计量来检验。

2 结果与分析

2.1 喀斯特农业干旱时空演变特征

2.1.1 干旱强度时空变化特征 基于 NDVI、LST, 利用 GWR 将 0.25° 的 GLDAS 提升为 1 km 的 GLDAS。从年尺度、生长季和季尺度(春、夏、秋、冬)计算 2001—2020 年贵州省的 SSI(图 2~图 4)。在年尺度下(图 2), SSI 呈波动上升趋势(倾斜率 $0.345/10$ 年), 意味着年平均干旱强度整体呈减弱趋势, 平均干旱强度为 -0.842 。尤其 2002 年和 2011 年为典型干旱年, 干旱强度分别达 -1.948 和 -2.042 ; 2008 年和 2020 年为正常年, 干旱强度为 0。生长季尺度与年尺度相比干旱强度波动趋势相似, SSI 整体也呈上升趋势($0.218/10$ 年), 意味着干旱强度整体呈减弱趋势,

平均干旱强度为 -0.766 (图 2)。春季 SSI 波动较小, 整体呈下降趋势($-0.009/10$ 年), 意味着春旱强度呈增强趋势, 平均干旱强度为 -0.912 , 且在 2010 年最强(-1.610)。夏季 SSI 呈上升趋势($0.171/10$ 年), 即夏季干旱强度呈减弱趋势, 平均干旱强度为 -0.683 ; 2011 年和 2012 年干旱强度最强, 分别达到 -1.596 和 -1.527 , 即为重旱。秋季 SSI 呈上升趋势($0.478/10$ 年), 干旱强度呈减弱趋势, 平均干旱强度为 -0.815 ; 2011 年秋季干旱强度最高(-1.744), 为重旱; 2010 年、2015 年和 2019 年秋季干旱强度最弱(0)。冬季 SSI 也呈上升趋势($0.106/10$ 年), 干旱程度呈减弱趋势, 平均干旱强度为 -0.785 ; 2009 年干旱强度最高(-1.643), 即重旱。

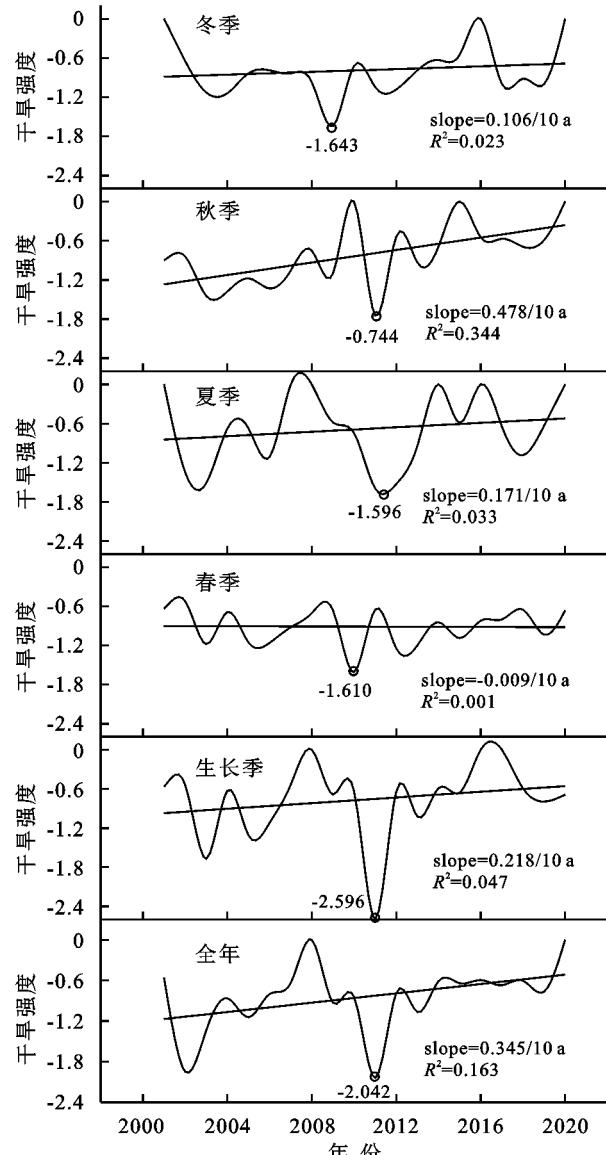


图 2 不同时间尺度干旱强度年际变化趋势

因此, 根据图 1 找出干旱强度最强的年份(年尺度 2011 年, 生长季尺度 2011 年, 春季 2010 年, 夏季 2011 年, 秋季 2011 年, 冬季 2009 年), 结合表 2 绘制干旱强度空间分布图(图 3)。由图 3a 可知, 年尺度下, 贵州省干

旱强度呈西南低东北高分布格局,其中,习水、赤水、剑河、锦屏和印江等地干旱强度较高,SSI 为 $-2.960 \sim -3.922$,为特旱。生长季尺度下(图 3b),全省范围内干旱强度较强(特旱),局部地区(贵定、福泉和平塘等地)干旱强度相对较弱(中旱)。春旱强度主要呈东西向“弱—强—弱”交替分布,SSI 为 $-1.015 \sim -3.263$,其中特旱主要集中在桐梓、黔西、安顺、望谟等地(图 3c)。夏季 SSI(图 3d)呈东高西低分布,尤其东北部的习水、

赤水、道真和东部的三穗、天柱等地 SSI,为 $-2.286 \sim -2.647$,即为特旱;西南部的兴义、贞丰、兴仁等地干旱程度相对较轻,干旱等级为正常和轻旱。秋季干旱呈西高东低分布格局(图 3e),其中威宁、赫章、兴义等地干旱程度较强($-2.326 \sim -3.316$),为特旱;雷山、台江部分地区干旱强度为 0。冬旱强度呈西南(盘县、兴义等地)和东北(石阡、施秉等地)高、西北(赤水等地)和东南(麻江等地)低的分布格局。

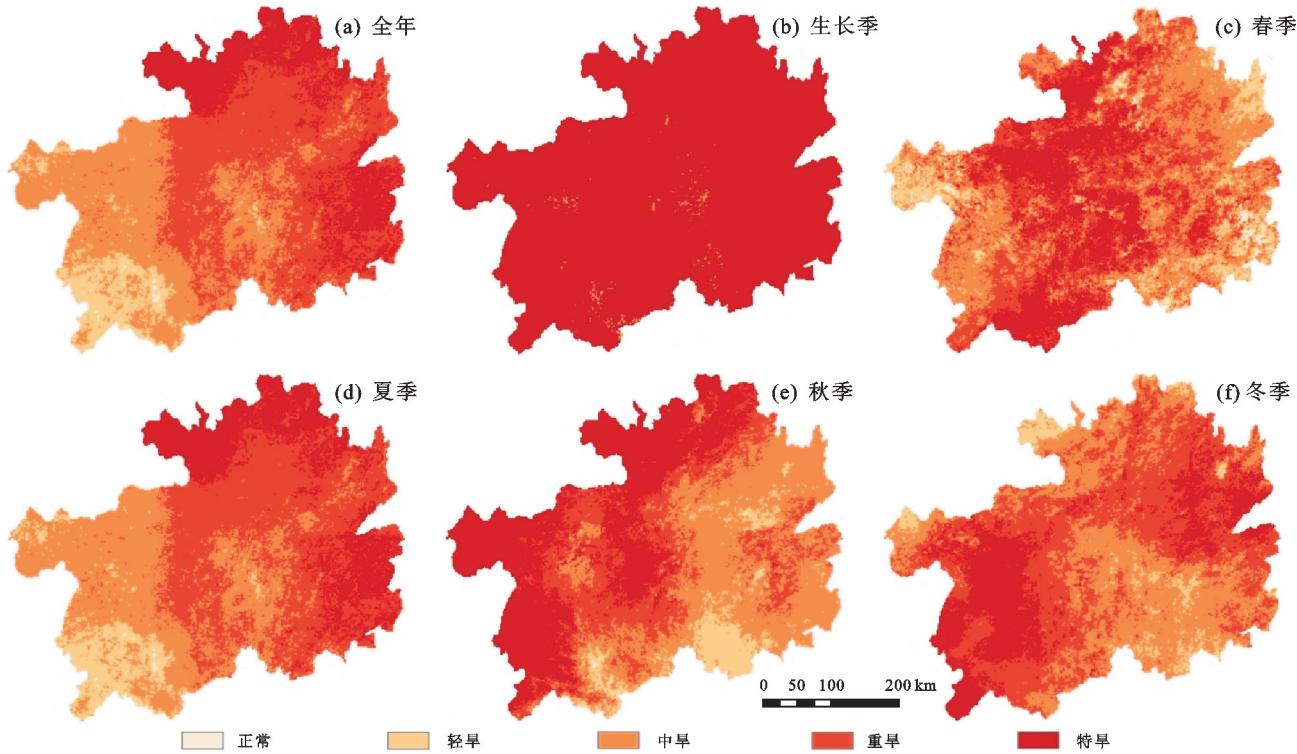


图 3 典型年份干旱等级空间分布格局

2.1.2 干旱面积时间变化特征 本研究以 $SSI = -0.5$ 为阈值统计农业干旱面积(图 4)。年尺度干旱面积变化趋势呈“M”形波动减少,其中 2005 年($130\ 423\ km^2$)、2011 年($174\ 893\ km^2$)为“M”形的 2 个峰值;2001 年($61\ km^2$)、2008 年(0)和 2020 年(0)则为“M”形的 3 个低谷。生长季 2003 年($173\ 716\ km^2$)和 2011 年($175\ 048\ km^2$)干旱面积分布最广;2002 年($24\ km^2$)、2007 年($28\ km^2$)和 2020 年($10\ km^2$)干旱面积分布最少,总体呈减少趋势。春季与年尺度相比呈略微减少趋势。而夏季与春季相比减少趋势快,2011 年和 2012 年最多,分别达 $174\ 721$ 、 $173\ 728\ km^2$,其次为 2003 年($166\ 276\ km^2$)。秋季与年尺度相同呈波动减少趋势,但波动范围比年尺度大;2003 年($170\ 340\ km^2$)、2004 年($163\ 416\ km^2$)、2009 年($165\ 004\ km^2$)和 2011 年($174\ 845\ km^2$)干旱面积较多,全省大范围具有旱情;除干旱强度为 0 的年份(2010 年、2015 年、2020 年),2012 年干旱面积最少($22\ km^2$)。冬季波动较小,但比春季大,其中 2009 年($175\ 005\ km^2$)干旱面积最多,2019 年干旱面积最少($8\ km^2$)。

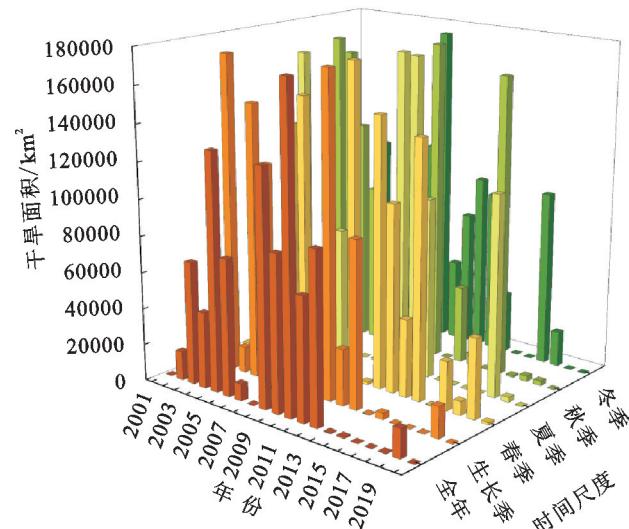


图 4 不同时间尺度干旱面积统计

2.1.3 干旱频率空间分布特征 干旱频率为农业干旱发生的频繁程度,年尺度 2001—2020 年干旱频率($0.05 \sim 0.50$)由东北向西南方向增大,呈西高东低格局(图 5a),平均干旱频率为 0.30;西南部的兴义、兴仁等地干旱频率($0.40 \sim 0.50$)较高;北部的正安、道真以及中部

的贵定等地干旱频率(0.05~0.10)较低。与年尺度相比,生长季尺度干旱频率不高(0.10~0.45),呈西南高东北空间格局(图5b);其中西南部的册亨、望谟、紫云等地干旱频率较高(0.35~0.4),西北部的赤水、习水等地干旱频率较低(0.10~0.15)。春旱频率与生长季尺度具有相似性,均呈西南高、东北低格局(图5c),但春旱北部和西南部频率呈点状分布;西南部的盘县、普安和水城等地春旱频率(0.45~0.55)较高,而册亨、安龙等地春旱频率(0.05~0.15)较低。夏旱频率呈“两高两低”分布(图5d),

“两高”是东北部思南、印江等地和中部福泉、麻江等地(0.35~0.45),“两低”是西北部桐梓、正安等地和西部威宁、水城等地(0.15~0.20)。秋旱与生长季相反,呈东北高西南低格局(图5e),与之不同的是西北部赤水、习水等地秋旱频率不高;东北部万山、江口等地频率高。冬旱呈多点分布(图5f),有东北部印江、江口地区,北部道真,湄潭、绥阳,中部龙里、南明,中西部黔西、大方,西部雷山、凯里等多个点频率较高;而西南部册亨、望谟和关岭等地频率低。

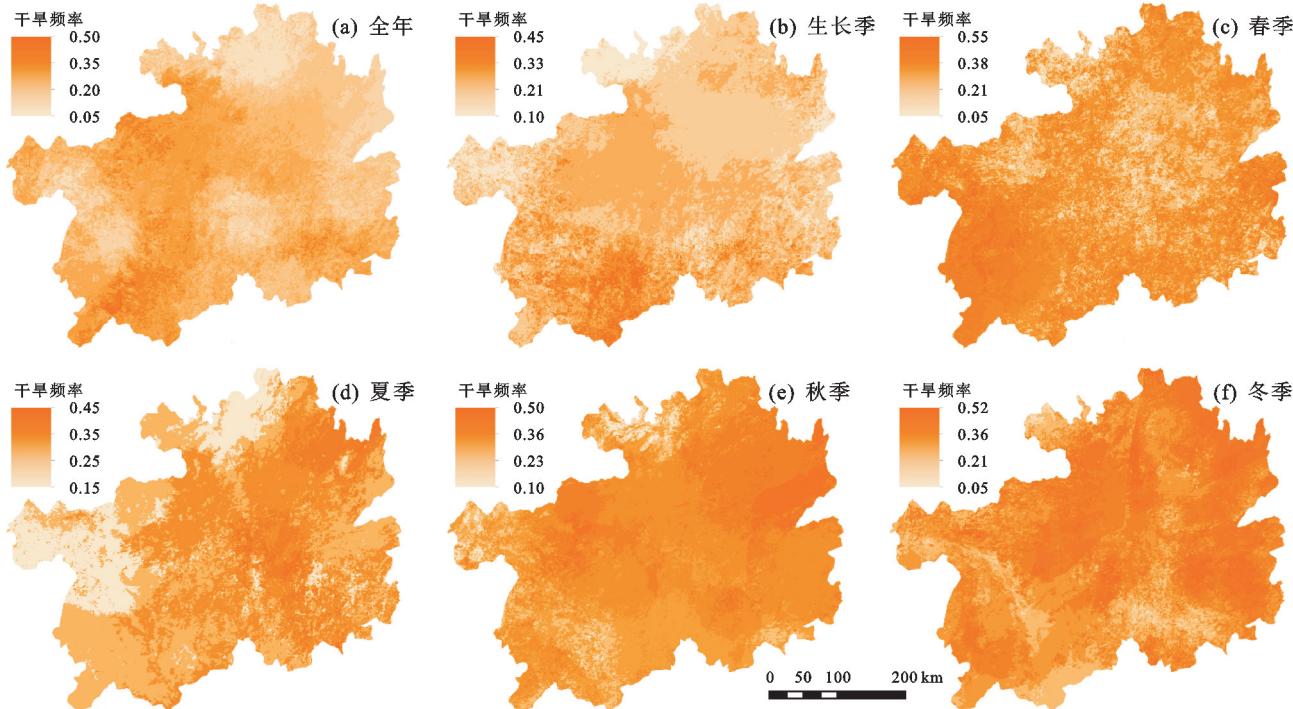


图5 不同时间尺度干旱频率空间分布格局

2.2 干旱强度与干旱面积联合概率分析

利用Copula函数分析干旱强度和干旱面积联合概率特征(图6)。除夏季,其他时间尺度干旱联合特征总体相似,随着干旱强度和干旱面积的增大,区域内干旱特征联合值也增大;除秋季,其他时间尺度干旱联合特征值总体偏低。年尺度干旱强度边缘分布为0.80~1.00,干旱面积边缘分布为0.90~1.00时,两者联合特征值高,干旱联合特征极值约为0.22~0.24。与年尺度相比,生长季干旱联合特征值有所增加;干旱强度边缘分布为0.75~1.00,干旱面积边缘分布为0.55~0.85时,干旱联合特征极值为0.30。春季干旱联合特征极值与其他时间尺度相比较低(0.20~0.22),干旱强度边缘分布在0.30~1.00,干旱面积边缘分布在0.70~1.00,表明春季不同等级干旱面积均较多。与春季相比,夏季干旱特征极值有所增高(0.28~0.30),此时干旱强度边缘分布为0.95~0.10,干旱面积边缘分布为0.30~0.55,说明夏旱强度高,面积并不一定多。秋季干旱联合特征值与其他时间尺度相比较高(0.54~0.56),秋旱强度比夏季低,但干旱面积却比夏季多;秋季联合特征等值距大意味着秋

旱强度和面积变化较大,发生高强度和大面积的干旱概率较大。冬季与秋季相比干旱联合特征值有所降低,但与其他时间尺度相比有所增高;而联合特征等值线较为密集,与秋季一样区域内干旱发生率较大。干旱联合特征值呈秋季>冬季>生长季>夏季>全年>春季规律,秋冬干旱联合特征值较高,说明秋冬容易发生较高强度和较多面积的农业干旱。

2.3 喀斯特农业干旱驱动机制分析

2.3.1 探测因子最优离散化结果 选取气象(降水量、潜在蒸散发、平均气温)、社会(人口密度、土地利用类型)、下垫面(土壤类型、土壤质地、海拔、坡度、坡向、岩溶发育强度、地貌类型、岩性)为探测因子,SSI为探测变量,进一步探讨不同时间尺度干旱驱动机制。本研究连续变量以自然断点法(natural)、百分位值法(quantile)和标准差法(standard deviation, SD)3种离散化方法,4~12个组数计算q值,最佳离散化方法和分类组数以q值最大为标准^[21]。以10 km×10 km格网大小对研究区创建规则格网,并以格网中心为采样点(1 687个),对不同时间尺度干旱

强度最强年份进行驱动力探测(图 2),所有连续型因

子最佳离散化方法和分类组数见表 2。

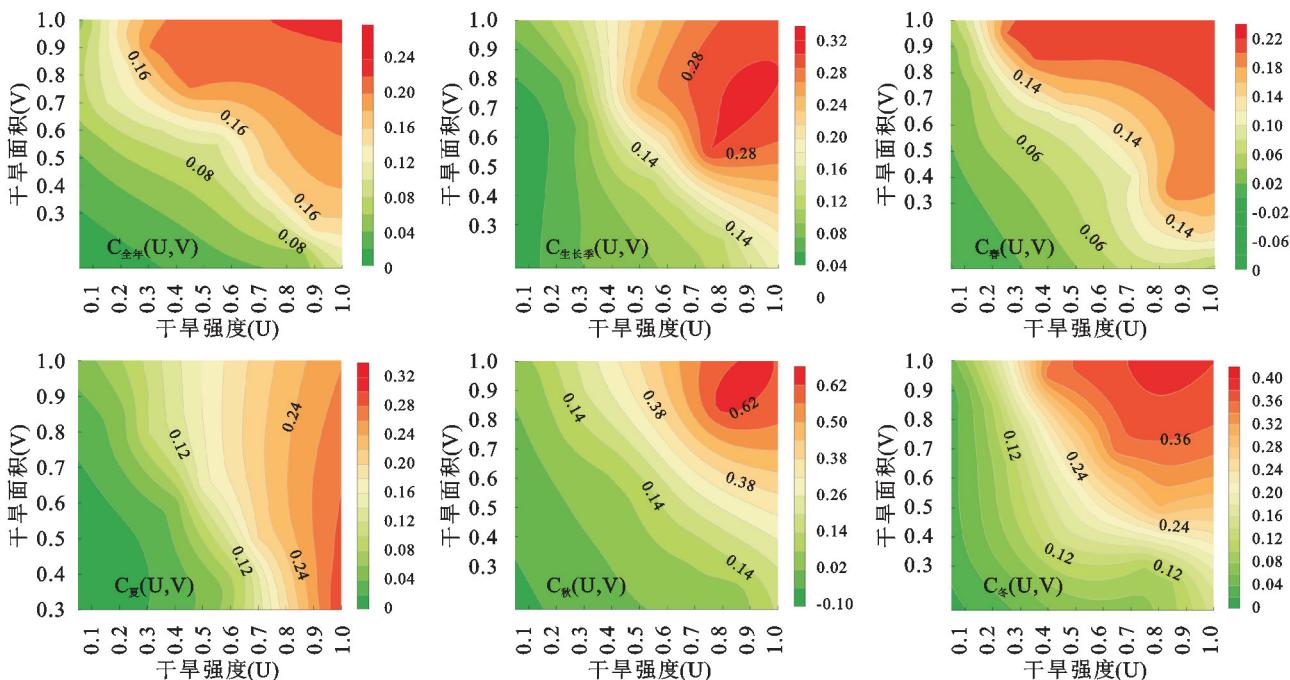


图 6 不同时间尺度联合概率分布

表 2 离散型探测因子的最佳分类组数和分类结果

时间尺度	探测因子	砂土含量	黏土含量	海拔	坡度	人口密度	降雨	潜在蒸散发	气温
年尺度	离散化方法	百分位值法	百分位值法	自然断点法	标准差法	自然断点法	自然断点法	自然断点法	标准差法
	分类组数	12	12	12	12	12	12	11	12
生长季尺度	离散化方法	百分位值法	百分位值法	百分位值法	标准差法	百分位值法	自然断点法	自然断点法	自然断点法
	分类组数	12	12	12	12	9	12	10	10
春季	离散化方法	百分位值法	百分位值法	百分位值法	标准差法	百分位值法	自然断点法	自然断点法	自然断点法
	分类组数	11	10	10	11	10	11	9	11
夏季	离散化方法	百分位值法	百分位值法	百分位值法	自然断点法	百分位值法	自然断点法	自然断点法	自然断点法
	分类组数	9	9	9	10	10	10	10	10
秋季	离散化方法	百分位值法	百分位值法	自然断点法	标准差法	百分位值法	自然断点法	自然断点法	标准差法
	分类组数	12	12	11	12	12	12	12	11
冬季	离散化方法	百分位值法	百分位值法	自然断点法	标准差法	百分位值法	自然断点法	自然断点法	自然断点法
	分类组数	12	12	11	12	12	11	10	10

2.3.2 因子探测分析 从图 7 可以看出,因子探测 q 值均通过 0.05 的显著性检验。年尺度各探测因子对 SSI 的解释力(q 值)从大到小为岩溶发育强度(0.344)>海拔(0.266)>降雨(0.167)>地貌类型(0.097)>黏土含量(0.080)>气温(0.079)>人口密度(0.076)>潜在蒸散发(0.072)>岩性(0.070)>土壤类型(0.066)>土地利用类型(0.048)。岩溶发育强度、海拔、降雨对 SSI 的解释力>10%,岩溶发育强度为干旱的主导驱动因子;黏土含量与气温 q 值接近,即 2 个因子对干旱的影响程度接近;土地利用类型对干旱的影响相对较弱。生长季只有 4 个因子通过 0.05 显著性检验,且 q 值总体不高,从大到小为岩溶发育强度(0.115)>潜在蒸散发(0.064)>人口密度(0.049)>海拔(0.036)。与年尺度一样,岩溶发育强度为主导驱动因子,影响干旱最弱的因子为海拔。春季 q 值从大到小为降雨(0.342)>海拔(0.151)>岩溶发育

强度(0.106)>岩性(0.072)>气温(0.056)>潜在蒸散发(0.043)>黏土含量(0.035)>地貌类型(0.033)>人口密度(0.017)。夏季与春季相比 q 值增大, q 值从小到大为岩溶发育强度(0.467)>降雨(0.423)>海拔(0.270)>气温(0.168)>黏土含量(0.071)>地貌类型(0.067)>土壤类型(0.064)>土地利用类型(0.045)>潜在蒸散发(0.038)>人口密度(0.034),夏季岩溶发育强度和降雨对 SSI 的解释力大于 40%,说明夏季岩溶发育强度和降雨与干旱的关系较密切。秋季和春季一样降雨为主导驱动因子,其次是海拔和气温,人口密度对干旱影响较小; q 值大小排序为降雨(0.407)>海拔(0.362)>气温(0.321)>岩溶发育强度(0.233)>土壤类型(0.227)>潜在蒸散发(0.208)>黏土含量(0.195)>砂土含量(0.151)>岩性(0.101)>地貌类型(0.058)>人口密度(0.055)。

冬季 q 值与春季、夏季和秋季相比整体要小,也是降雨为主导驱动因子(0.275),其次为岩溶发育强度(0.228)和潜在蒸散发(0.138),与干旱关系较弱是坡度(0.023)。年尺度、生长季和夏季主导驱动因子为岩溶发育强度;春季、秋季和冬季主导驱动因子为

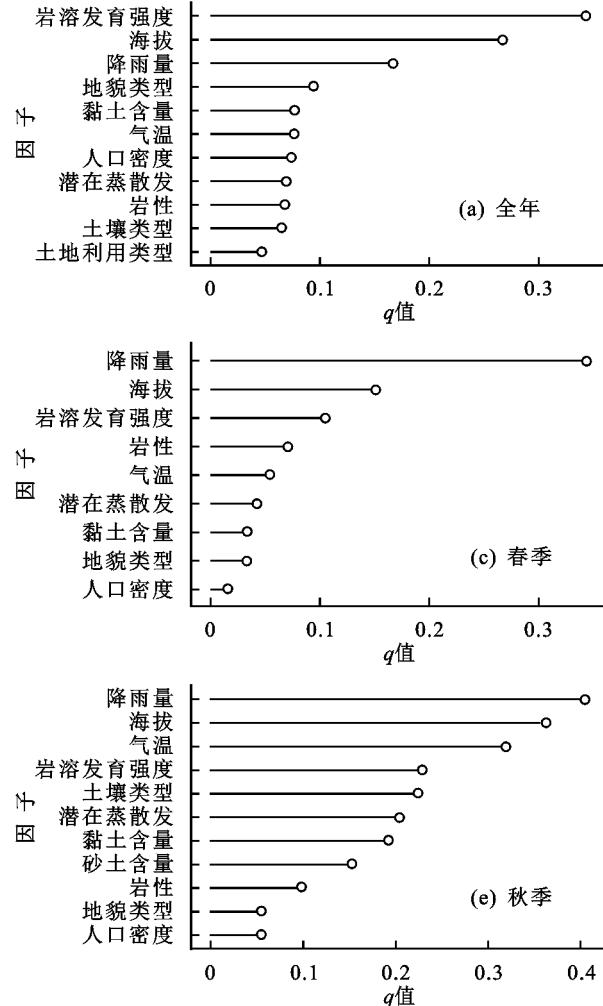
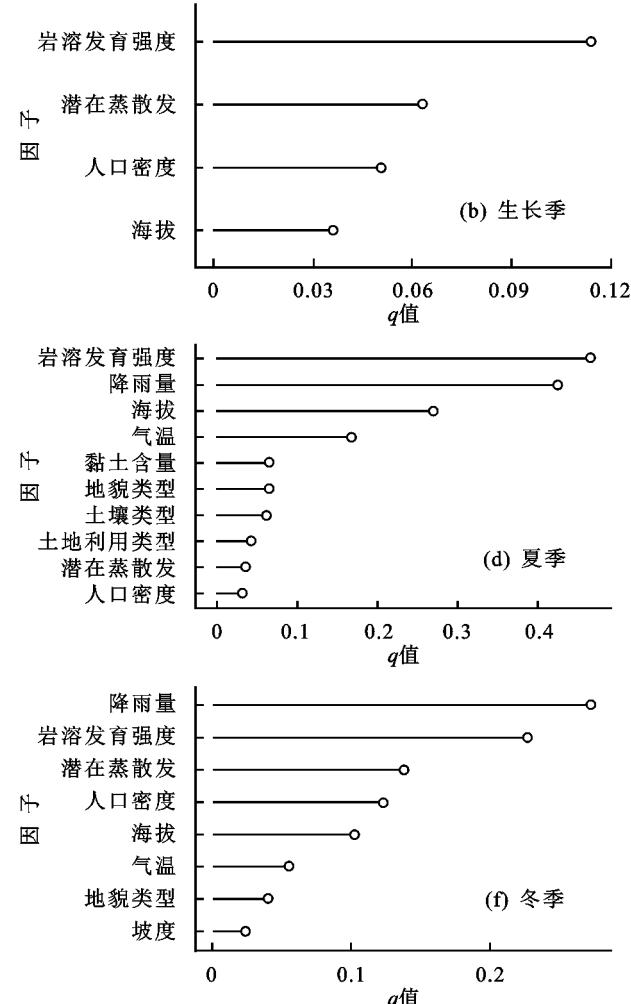


图7 各探测因子对SSI的解释力(q)

2.3.3 交互作用分析 交互探测显示不同因子两两交互均呈双因子增强和非线性增强(图8),即不同因子交互 q 值均大于单因子 q 值。年尺度降雨 \sqcap 岩溶发育强度(0.621)、气温 \sqcap 海拔(0.536)和潜在蒸散发 \sqcap 海拔(0.509)是干旱的主导交互组合,交互关系均为非线性增强。对干旱影响最小的单因子(土地利用类型),在与其他因子交互时, q 值均大于其单因子 q 值。与年尺度相比,生长季干旱解释力较弱,降雨 \sqcap 岩溶发育强度(0.365)、降雨 \sqcap 地貌类型(0.262)和潜在蒸散发 \sqcap 海拔(0.253)为主导交互组合,只有砂土含量 \sqcap 黏土含量和土地利用类型 \sqcap 岩溶发育强度2个组合为双因子增强,其他组合均为非线性增强。春季,降雨与其他13个因子交互作用 q 值均较大,主导交互组合为降雨 \sqcap 气温(0.454)、降雨 \sqcap 地貌类型(0.433)和降雨 \sqcap 潜在蒸散发(0.433),其次为潜在蒸散发 \sqcap 海拔(0.608)和气温 \sqcap 降雨(0.607)。夏季降

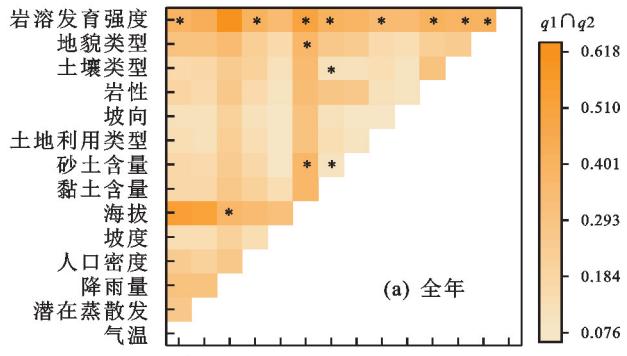
雨。降雨是地表主要水分来源,海拔影响山地降水分布,岩溶发育强度影响地表汇水,综上,岩溶发育强度、降雨和海拔是干旱的主导驱动因子,与农业干旱空间分布有较强的耦合关系;土地利用类型、人口密度和坡度对干旱影响不大。



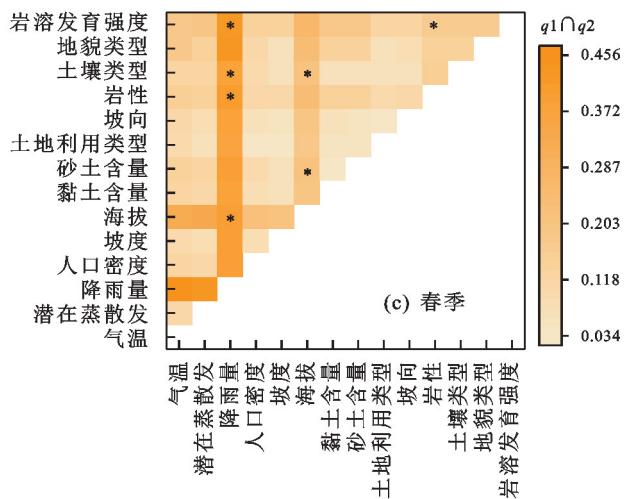
雨 \sqcap 岩溶发育强度(0.624)、降雨 \sqcap 海拔(0.599)和岩溶发育强度 \sqcap 海拔(0.599)为主导交互组合且均为双因子增强,说明这些因子协同与干旱的关系较紧密。秋季双因子增强组合较多,降雨 \sqcap 潜在蒸散发(0.697)、海拔 \sqcap 潜在蒸散发(0.608)和降雨 \sqcap 气温(0.607) q 值大。冬季交互 q 值大小与春季接近,降雨 \sqcap 岩溶发育强度(0.451)、气温 \sqcap 降雨(0.431)和潜在蒸散发 \sqcap 海拔(0.428)为主导交互组合。综上,不同时间尺度主导交互组合都为对应尺度的降雨、岩溶发育强度、海拔两两之间交互或与其他因子(气温、潜在蒸散发)交互。坡度、坡向和土地利用类型交互对干旱影响较低。

2.3.4 风险探测分析 利用风险探测器探讨干旱容易发生的因子范围或类型(表3)。年尺度气温升高到 $(14.9, 15.7^{\circ}\text{C}]$ 最容易发生干旱,然后SSI开始升高,干旱强度减弱,说明气温与干旱强度在一定范

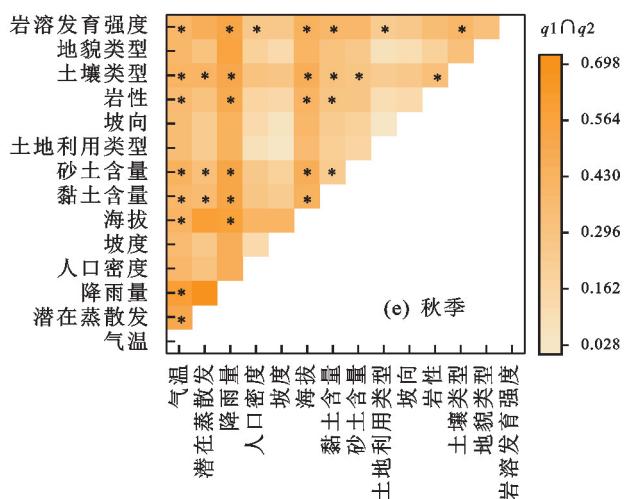
围内呈正相关；降雨量丰盈影响干旱的发生，但降雨量较多也导致 SSI 低；潜在蒸散发、人口密度、海拔低干旱强度较低。生长季与年尺度具有相似性。春季坡度达 14.9° 、降雨量达 235 mm 干旱强度开始减弱；气温、潜在蒸散发、人口密度高容易发生干旱。



(a) 全年

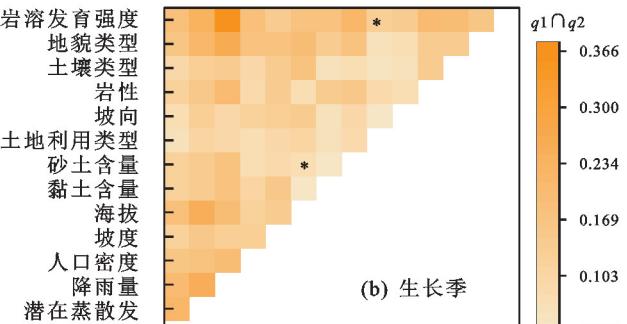


(c) 春季

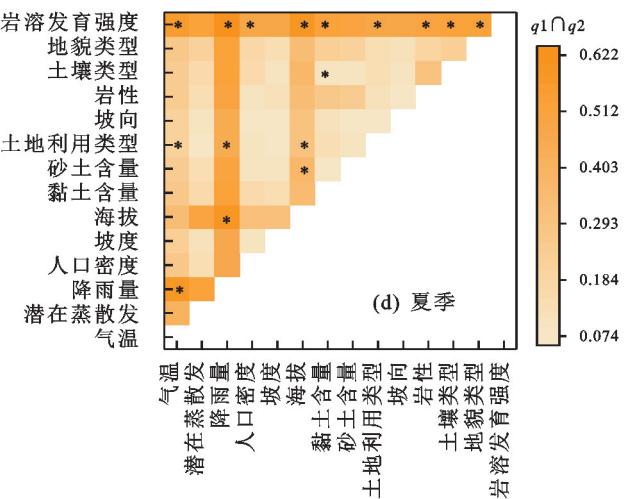


(e) 秋季

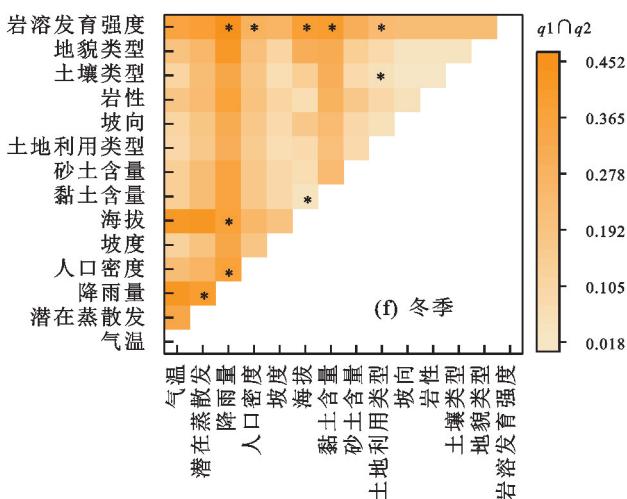
夏季降雨量超过 298 mm 、海拔超过 766 m 干旱强度开始减弱；坡度和气温高、潜在蒸散发低容易发生干旱。秋季坡度、海拔高，潜在蒸散发、降雨量、气温低容易发生干旱。冬季与秋季不同，冬季气温越高越容易发生干旱。



(b) 生长季



(d) 夏季



(f) 冬季

注：* 代表双因子增强，其他为非线性增强。

图 8 各探测因子交互探测解释力

2.3.5 生态探测分析 运用生态探测器探讨两因子之间对 SSI 的影响是否具有显著性差异(图 9)，进一步验证主导驱动因子对干旱的影响，有显著性差异记

为“Y”，否则记为“N”。年尺度岩性 \sqcap 潜在蒸散发、岩性 \sqcap 土壤类型、人口密度 \sqcap 黏土含量、黏土含量 \sqcap 气温、人口密度 \sqcap 气温无显著性差异，说明这些因子协

同对干旱的影响存在部分相同。岩溶发育强度、海拔、降雨分别与岩性、潜在蒸散发、土壤类型、人口密度之间存在显著性差异,进一步验证岩溶发育强度、海拔和降雨对SSI的影响大,岩性、人口密度、黏土含量对SSI影响小。生长季坡度、海拔、黏土含量、砂土含量两两之间无显著性差异,与因子探测结果相同(图7b),这些因子对干旱的影响较弱。春季土壤类型 \cap 潜在蒸散发、土壤类型 \cap 黏土含量、地貌类型 \cap

黏土含量无显著差异;夏季无显著差异的是地貌类型 \cap 黏土含量和地貌类型 \cap 土壤类型;秋季与春、夏季具有相似性,地貌类型 \cap 人口密度、岩溶发育强度 \cap 土壤类型无显著性差异;冬季与生长季相似,坡度 \cap 土地利用类型、砂土含量 \cap 黏土含量无显著性差异。综上,坡度、人口密度、地貌类型和黏土含量对SSI的影响较弱。不同时间尺度无显著性差异组合少,说明喀斯特地区农业干旱是不同因子协同产生的结果。

表3 各探测因子容易发生农业干旱的范围或类型

探测因子	全年	生长季	春季	夏季	秋季	冬季
坡度	(22,24.4]	(24.4,28.9]	(12.6,14.9]	(20.1,28.9]	(24.4,28.9]	(1.94,3.41]
黏土百分率	(36,41]	(36,41]	(35,43]	(26,29]	(25,26]	(43,48]
砂土百分率	(39,40]	(45,48]	(51,62]	(45,48]	(48,51]	(32,33]
人口密度	[6.94,36.6]	[6.94,46.3]	[358,13800]	[52.4,66.2]	[148,191]	(1080,2140]
潜在蒸散发	[853,922]	[672,723]	(334,366]	[352,373]	(177,188]	(163,171]
降雨量	(936,971]	(603,636]	(210,235]	(280,298]	[143,167]	(19.3,27.1]
气温	(14.9,15.7]	(17.6,18.5]	(20.1,21.9]	(26,27.3]	[10.2,12.4]	(11.4,12.6]
海拔	[202,595]	(569,695]	[1220,1420]	(616,766]	(2170,2630]	(1750,1940]
土壤类型	水稻土	风沙土	石质土	水稻土	黄棕壤	风沙土
地貌类型	深切低山	深切中山	峰丛谷地	浅切低山	峰丛洼地	低山谷地
岩溶发育强度	非岩溶区	中等发育区	弱发育区	非岩溶区	较强发育区	较强发育区
岩性	河流相	河流相	板岩和泥质岩	碎屑沉积岩	玄武岩	外露岩石
土地利用类型	水田	水田	水域	水田	建设用地	旱地
坡向	平地	平地	平地	平地	平地	南向

3 讨论

3.1 降尺度标准化土壤湿度指数的准确性分析

本文利用GWR对土壤水分进行空间降尺度得到1 km土壤水分,基于此计算SSI识别喀斯特农业干旱。结果表明,2001—2020年的年尺度、生长季尺度、季尺度(春、夏、秋、冬)SSI整体呈上升趋势,干旱强度呈减弱趋势(图2),其中2003年、2011年和2012年干旱较为严重,这可能与西太平洋副高异常和暖湿气流难以输送到云贵高原有一定关系^[24]。2010年特大夏、秋、冬、春连旱,同时西部和南部最为严重,SSI也监测到南部册亨、望谟和西部毕节、大方等地发生重旱。2011年出现特重夏、秋、冬、春连旱和2012年黔西南州大部具有旱情,这与本文监测结果基本吻合(图2、图3),SSI监测到2011年夏(-1.744)和2012年夏(-1.526)为重旱。喀斯特岩溶发育剧烈,地表不易储水同时降雨季节性分布不均,导致SSI分布格局具有区域性和季节性。前文已得到夏旱强度高,但面积不多(图6),说明两者不一定为正相关,这是因为降水亏损的程度影响强度的高低,降水亏损的区域范围才影响面积的多少。贵州省海拔呈西高东低格局,干旱频率特征呈相似分布格局(图5a),这说明海拔高加之地表破碎,透水性强易频繁发生农业干旱,且贵州省石漠化现象严重^[25],在坡度大的区域耕种

成为必然,但在坡度大的区域耕种使作物和土壤更容易受到干旱影响^[26]。除此之外,本文监测结果与其他学者^[27-28]研究结果基本一致。综上,利用GWR对喀斯特遥感土壤水分进行降尺度研究是可行的。

3.2 喀斯特农业干旱主导因子分析

降水是全球水循环的关键过程之一^[29],而干旱与水循环过程密不可分^[25]。贵州省地势起伏大导致降水分布具有区域性,且春季地表作物萌芽需水量多,降水亏缺区域植被生长受影响。夏季植被蒸腾增加,降水不能有效补给时,植被通过关闭叶片气孔和脱落老叶片减少叶面积来防止水分过度蒸发^[30]。与春季相比,秋季地表农作物成熟,需水量减少,但降雨量减少以及持续高温使水循环中水汽输送异常影响植被生长。冬季与其他季节不同的是降水少,相对湿润度大,但降雪天气导致河流补给少于其他季节从而引发农业干旱。本文已得到降雨为春季(q 值=0.342)、秋季(0.407)、冬季(0.275)干旱主导驱动因子,夏季则为岩溶发育强度(0.467);4个季节主导交互组合均为降雨与其他因子交互(q 值:春,降雨 \cap 气温为0.454;夏,降雨 \cap 岩溶发育强度为0.624;秋,降雨 \cap 潜在蒸散发为0.697;冬,降雨 \cap 岩溶发育强度为0.451),这说明降雨是农业干旱的主导驱动因子,该结论与其他学者^[31-32]研究结果相似。

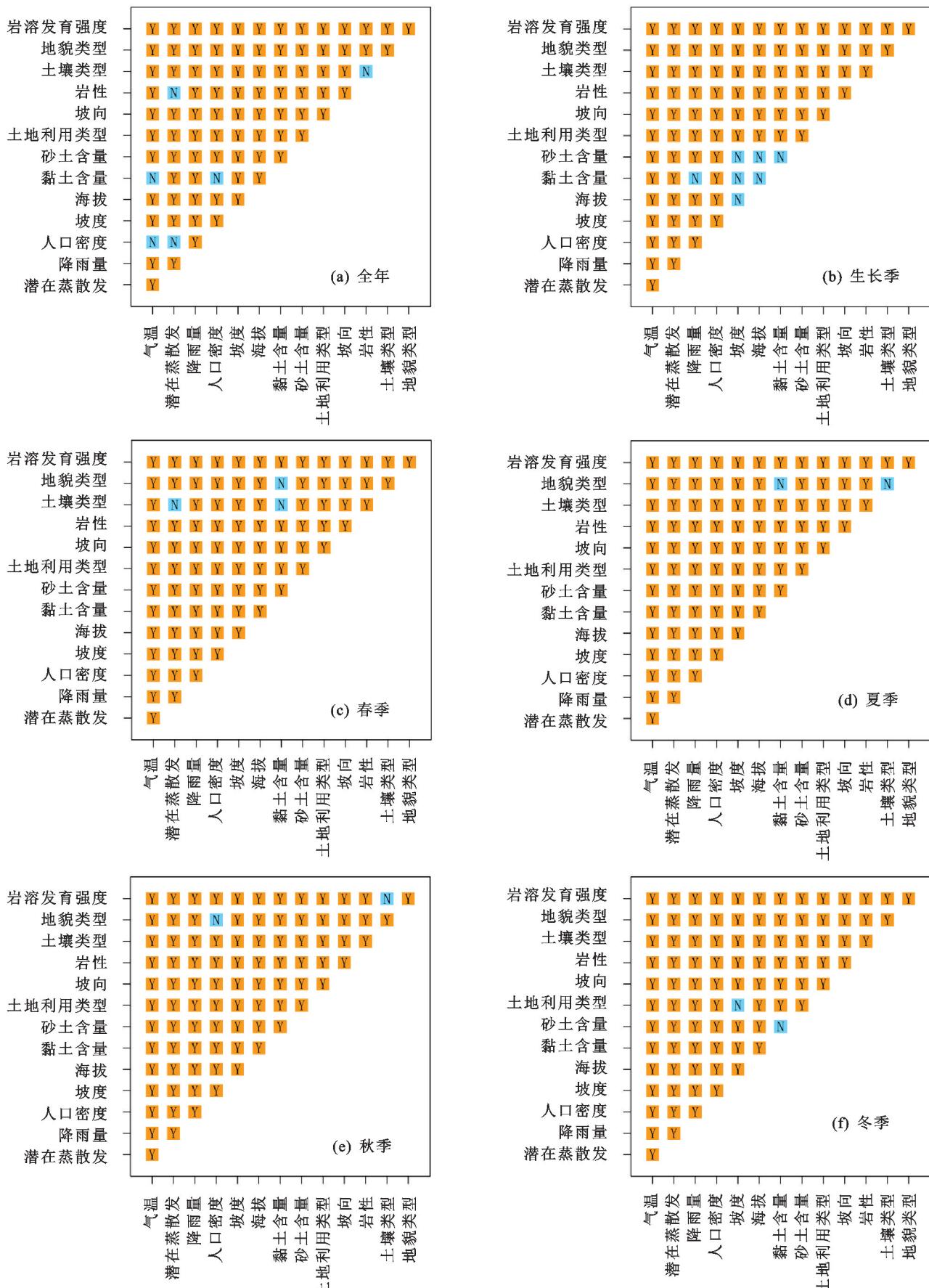


图 9 各探测因子生态探测结果

其次, 岩溶发育和海拔对干旱的影响也较大(图 7、图 8)。岩溶地貌独特的“地表—地下二元结构”与

非岩溶地区相比流域储水能力更强, 同时海拔也影响流域储水能力^[26]。海拔越高, 地表距流域溶蚀/侵蚀

基准面垂直距离越远,储水空间越多,储水能力越强^[33]。在降雨少的季节(春季、秋季、冬季)易发生高强度干旱的是岩溶发育剧烈以及高海拔地区,而在降雨多的夏季则是非岩溶区与低海拔地区(表4),这可能是由于岩溶发育与海拔为流域提供的储水空间为地下空间,而地表空间则较少,降雨少时地表植被(农作物)很难从地下补给水分,使高强度干旱更易发生;夏季降雨多时,地表水能满足地表植被(农作物)生长,非岩溶地区与低海拔地区地下储水能力较弱,从而影响夏旱,但夏旱强度与其他季节相比较低(图2)。

表4 不同干旱等级交互探测结果

干旱		主导交互探测				
等级	主导交互组合1	q值	主导交互组合2	q值	主导交互组合3	q值
轻旱	降雨 \cap 潜在蒸散发	0.121	降雨 \cap 地貌类型	0.119	降雨 \cap 气温	0.117
中旱	降雨 \cap 气温	0.196	降雨 \cap 地貌类型	0.181	降雨 \cap 岩溶发育强度	0.155
重旱	降雨 \cap 气温	0.232	降雨 \cap 地貌类型	0.229	降雨 \cap 潜在蒸散发	0.222
特旱	降雨 \cap 岩溶发育强度	0.382	降雨 \cap 地貌类型	0.299	气温 \cap 岩溶发育强度	0.294

3.3 研究的局限性

本研究采用GWR对土壤水分进行降尺度研究,虽然弥补了贵州省站点数据较少且时间序列不完整的不足,但没有与其他降尺度方法比较;同时本研究考虑计算量以及数据代表性以10 km的网格大小选取采样点,没有探讨空间尺度效应^[36],未来可比较不同降尺度方法和空间尺度对喀斯特土壤水分提升结果的精度,从而得到更准确的结果。喀斯特地貌影响降水产汇流机制^[37],因此本研究选取较多下垫面因子探讨喀斯特农业干旱驱动机制,但干旱是一种复杂的自然现象^[38],国家政策也影响着农业干旱,且近年来退耕还林、石漠化治理等政策使得喀斯特地区植被覆盖上升,这也是研究区干旱强度呈减弱趋势的原因之一(图2),所以未来可考虑社会经济、国家政策以及其他干旱等因素的影响,更准确地探讨喀斯特农业干旱驱动机制。

4 结论

(1)20年间,贵州省干旱强度和干旱面积整体上呈减少趋势,其中2011年、2012年为研究期内典型干旱年。不同时间尺度SSI空间分布有差异,总体上表现为西低东高,干旱程度呈西高东低分布格局。年尺度干旱频率呈西高东低分布格局;生长季和春季干旱频率具有相似的空间格局,由东北向西南增高;夏旱频率呈“两高两低”空间分布格局,“两高”分布在东北部和中部,“两低”分布在西部和西北部;秋旱频率空间分布与生长季相反,呈东北高西南低分布;冬旱频率总体上呈东北高西南低分布格局。

(2)在干旱强度和干旱面积的联合概率特征中,贵州省除夏季以外,其他时间尺度干旱联合特征总体相似,随着干旱强度和干旱面积的增大,区域内农业干旱特征联合值也增大;除秋季以外,其他时间尺度干旱联合特征值总体偏低。干旱联合特征值呈秋季>冬

最后,进一步探讨不同干旱等级SSI主导交互驱动因子(表4)发现,降雨 \cap 潜在蒸散发对轻旱影响最剧烈,首先降水不足,地表蒸散发增加导致植被需水量亏损触发农业干旱(轻旱);进一步高温导致植被叶片气孔关闭加剧旱情(中旱、重旱);岩溶地区提供一定地下储水空间,根系发达的植被可从地下补给水分,但研究区石漠化现象严重^[34],根系发达的植被较难生长;同时地表破碎影响地表储水能力,基岩裸露加剧地表蒸发^[35],降水不能有效补给地表植被,进一步加剧农业旱情(特旱)。

季>生长季>夏季>全年>春季规律,说明贵州省秋冬发生较高强度和较多面积的农业干旱概率较高。

(3)岩溶发育强度、降雨和海拔对年尺度、春季和夏季的农业干旱影响较大,同时q值大小也位于生长季、秋季和冬季前3,说明这3个因子与喀斯特农业干旱有较强的空间耦合关系。降雨 \cap 岩溶发育强度是影响年尺度($q=0.617$)、生长季($q=0.365$)、夏季($q=0.624$)、冬季($q=0.451$)干旱最剧烈的交互组合。春季最强交互组合为降雨 \cap 气温($q=0.454$);秋季潜在蒸散发 \cap 降雨对农业干旱的解释程度接近70%,为秋季最强交互组合,而坡度、坡向和土地利用类型两两协同对农业干旱的影响较低。不同时间尺度不同因子交互作用对SSI均呈现双因子增强和非线性增强,且无显著性差异组合很少,说明农业干旱是不同因子协同的结果。

参考文献:

- [1] 莫兴国,胡实,卢洪健,等.GCM预测情景下中国21世纪干旱演变趋势分析[J].自然资源学报,2018,33(7):1244-1256.
- [2] Cong D M, Zhao S H, Chen C, et al.Characterization of droughts during 2001—2014 based on remote sensing: A case study of Northeast China[J].Ecological Informatics,2017,39:56-67.
- [3] 温庆志,孙鹏,张强,等.基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用[J].生态学报,2019,39(20):7757-7770.
- [4] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [5] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts [J].Journal of Hydrology,2010,391(1/2):202-216.
- [6] 吴泽棉,邱建秀,刘苏峡,等.基于土壤水分的农业干旱监测研究进展[J].地理科学进展,2020,39(10):1758-1769.
- [7] 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(11): 264-274.
- [8] 虞美秀,董吴欣,张建云,等.基于大范围地面墒情监测的鄱阳湖流域农业干旱[J].水科学进展,2022,33(2):185-195.
- [9] Wei S G, Zhang R Q, Li L, et al. Assessment of agricultural drought based on reanalysis soil moisture in southern China[J]. Land, 2022, 11(4): e502.
- [10] 吴志勇,徐征光,肖恒,等.基于模拟土壤含水量的长江上游干旱事件时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):176-184.
- [11] 田晴,陆建忠,陈晓玲,等.基于长时序 CCI 土壤湿度数据的长江流域农业干旱时空演变[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):472-481.
- [12] Vergopolan N, Chaney N W, Beck H E, et al. Combining hyper-resolution land surface modeling with SMAP brightness temperatures to obtain 30-m soil moisture estimates [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 242: 11740-11755.
- [13] Chris B, Stewart-Fotheringham A, Martin E C. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [14] 张克新,王娟娟,彭娇婷,等.贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(2):10-18.
- [15] 韩至钧,金占省.贵州省水文地质志[M].1 版.北京:地震出版社,1996:50-57.
- [16] Hao Z C, Agha K A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model[J]. Advances in Water Resources, 2013, 57: 12-18.
- [17] Chen C, Zhao S H, Duan Z, et al. An Improved spatial downscaling procedure for TRMM 3B43 precipitation product using geographically weighted regression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(9): 4592-4604.
- [18] Song X L, Mi N, Mi W B, et al. Spatial non-stationary characteristics between grass yield and its influencing factors in the Ningxia temperate grasslands based on a mixed geographically weighted regression model[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(6): 1076-1102.
- [19] 文凤平,赵伟,胡路,等.耦合 MODIS 数据的 SMAP 被动微波土壤水分空间降尺度研究:以闪电河流域为例[J].遥感学报,2021,25(4):962-973.
- [20] Poulomi G, Janga R. Risk assessment of droughts in gujarat using bivariate copulas [J]. Water Resources Management, 2012, 26(11): 3301-3327.
- [21] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience and Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [23] 尹旭,王婧,李裕瑞,等.中国乡镇人口分布时空变化及其影响因素[J].2022,41(5):1245-1261.
- [24] Yan G X, Wu Z Y, Li D H. Comprehensive analysis of the persistent drought Events in Southwest China[J]. Disaster Advances, 2013, 6(3): 306-315.
- [25] Van-Loon A F, Van-Huijgevoort M H J, Van-Lanen H A J. Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 164(16): 4057-4078.
- [26] Quinton J N. Tilling soils on slopes makes crop production and soils more vulnerable to drought[J]. Nature Food, 2022, 3(7): 497-498.
- [27] 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.
- [28] 皮贵宁,贺中华,游漫,等.2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):160-167.
- [29] Olusola O A, Li Y, Song S B, et al. Spatial comparability of drought characteristics and related return periods in mainland China over 1961—2013[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 549-567.
- [30] Woodward F I, Lomas M R, Kelly C K. Global climate and the distribution of plant biomes[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2004, 359(1450): 1465-1476.
- [31] 陈学凯,雷宏军,徐建新,等.气候变化背景下贵州省农作物生长期干旱时空变化规律[J].自然资源学报,2015,30(10):1735-1749.
- [32] Wang Y Q, Yang J, Chen Y N, et al. Quantifying the effects of climate and vegetation on soil moisture in an arid area[J]. Water, 2019, 11(4): 767-783.
- [33] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.典型喀斯特岩性组合结构的流域水文干旱机制研究:以贵州省为例[J].地质科学,2015,50(1):340-353.
- [34] Guo F, Jiang G H, Yuan D X, et al. Evolution of major environmental geological problems in karst areas of Southwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 69(7): 2427-2435.
- [35] 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.
- [36] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993, 17/22: 179-184.
- [37] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.基于土壤系统结构的喀斯特流域水文干旱分析:以贵州省为例[J].自然资源学报,2013,28(10):1731-1742.
- [38] Han Z M, Huang Q, Huang S Z, et al. Spatial-temporal dynamics of agricultural drought in the Loess Plateau under a changing environment: Characteristics and potential influencing factors [J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106540-106552.