

贵州省农业与气象干旱特征及其响应关系

游漫¹, 贺中华^{1,2,3}, 张浪¹, 杨铭珂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)

摘要: 利用贵州省 1980—2020 年逐月降水与土壤水分计算标准化降水指数(SPI)和标准化土壤水分指数(SSSI), 基于游程理论、传播响应率(R_r)、状态转移概率矩阵等方法探究气象与农业干旱特征变化, 以及两者之间的响应关系。结果表明: (1) 贵州省农业干旱较气象干旱持续时间长、烈度大, 干旱历空间变化较气象干旱显著, 干旱烈度则较单一。 (2) 季尺度上, 春季农业干旱对气象干旱响应最为敏感, 夏、秋季次之, 冬季较弱; 不同地貌类型下, 春、冬季在半喀斯特低中山响应程度较高, 夏季在峰丛谷地, 秋季在非喀斯特地区; 不同切割深度下, 地表切割, 越深春季 R_r 越高, 夏、秋和冬季 R_r 则越低。 (3) 在 20 世纪 80s 转至 21 世纪 10s 状态间, 不同地貌类型下均发生不同程度的概率转移, 其中春、冬季节转移活跃、概率较低, 夏、秋季主要呈“低转高”现象, 夏季转移概率偏低, 秋季转移概率普遍偏高; 在不同切割深度下, 各季节浅切割与最深切割深度转移活跃度低, 概率高, 其他切割深度下转移活跃, 但概率低。

关键词: 传播响应率; 转移概率; 下垫面条件; 气象干旱; 农业干旱

中图分类号: P429 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)05-0255-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.032

Characteristics of Agricultural and Meteorological Drought in Guizhou Province and Their Response Relationship

YOU Man¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, ZHANG Lang¹, YANG Mingke¹, PI Guining¹

(1.School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 2.National Karst Rocky Desertification Prevention Engineering Technology Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 3.Guizhou Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001)

Abstract: The standardized precipitation index (SPI) and standardized soil moisture index (SSI) were used to calculate monthly precipitation and soil moisture in Guizhou Province from 1980 to 2020. Based on the run-length theory, transmission response rate (R_r) and state transition probability matrix, the changes of agricultural and meteorological drought characteristics and their response relationship were investigated. The results showed that: (1) The duration and intensity of agricultural drought in Guizhou Province were longer than that of meteorological drought, and the spatial variation of drought duration was more significant than that of meteorological drought, but the intensity of drought was single. (2) At the seasonal scale, the response of agricultural drought to meteorological drought was most sensitive in spring, followed by summer and autumn, and weak in winter. Under different geomorphic types, the response degree was higher in semi-karst low mountain in spring and winter, in peak cluster valley in summer, and in non-karst area in autumn. Under different cutting depths, R_r was higher with the deeper surface cutting in spring and autumn. The opposite was true in summer and winter. (3) During 1980s—2010s, different geomorphic types had different degrees of probability transition, in which the seasonal transition was active and low in spring and winter, and the transition was mainly “low to high” in summer and autumn. The transition probability was low in summer and high in autumn. At different cutting depths, the shallow cutting depth and the deepest cutting depth had low transfer activity and high probability in each season, while the other cutting depths had active transfer but low probability.

收稿日期: 2022-01-20
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); 贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目
第一作者: 游漫(1995—), 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: youman95@163.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

Keywords: propagation response rate; transition probability; underlying surface conditions; meteorological drought; agricultural drought

干旱是全球常见且最具破坏性的自然灾害,具有干旱历时长、干旱烈度大、发生频率高以及范围广等特点,是威胁着人类生命安全及财产安全的自然灾害^[1]。干旱阻碍农作物生长和发展,农作物收成降低^[2]。气象干旱是其他干旱发生的基础,是农业干旱的外在驱动力,可见气象干旱与农业干旱具有较强的相关性^[3]。贵州地处南方喀斯特分布区,虽然受西南季风影响,降水丰富,但是却受喀斯特作用的影响,常年缺水,干旱现象严重。因此,对贵州省气象、农业干旱特征及其二者之间的响应关系进行研究是十分必要的,可为农业防旱抗旱工作提供参考。

干旱包括气象、水文、农业和社会经济干旱 4 种,分别用降水、径流、土壤水分以及社会发展用水的不足表示^[4]。已有研究^[4-5]表明,由于大气降水、地表水和地下水在水循环中相互联系,且气象、水文和农业干旱密切相关,因此,长期降水不足将引起土壤水分和径流的异常,从而导致农业干旱和水文干旱的发生。Xu 等^[6]利用标准化降水指数(standardized precipitation index)和标准化土壤水指数(standardized soil moisture index)对气象干旱和农业干旱进行表征,通过相关分析发现,农业干旱的发生与气象干旱的严重程度同步增加,在夏季农业干旱对气象干旱的响应程度较高。罗纲等^[7]利用水分盈亏指数(crop water deficit index,CWDI)和相对湿度指数(relative moisture index,MI)研究淮河蚌埠闸以上地区农业干旱与气象干旱关联性发现,农业干旱较气象干旱周期更长,频率及强度更大,气象干旱加剧农业干旱旱情。Yao 等^[2]利用小波分析研究农业、水文和气象干旱的周期性特征发现,农业干旱与气象干旱的联系性更强。赖力等^[3]利用最大相关系数法分析农业干旱对不同时间尺度气象干旱的响应,结果表明农业干旱对 3 个月尺度的气象干旱响应最灵敏。国内外学者多利用标准化降水指数(SPI)^[8]、标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index)^[9]等指标表征气象干旱;利用标准化土壤水分指数(SSi)^[10]、植被状态指数(VCI)^[11]、水分盈亏指数(CWDI)^[12]等指标表征农业干旱。基于相关性分析^[9]、小波分析^[2]、构建 Copula 模型^[6]等对不同地区进行定性和定量,以此来判别农业干旱对气象干旱的响应。以上研究往往只注重响应时间,而忽略响应的严重程度,很少利用指标来定量表征农业干旱对气象干旱的响应严重程度,且对 2 种干旱在不同下垫面之

间的转移概率研究较少。

贵州省作为喀斯特大省,流域介质空间结构复杂,因二元结构地下存在特殊储水空间,尽管降水丰富,农业干旱现象仍较为严重。因此,本文以贵州省为研究对象,利用降水数据和土壤水分数据从季节的时空角度分析农业干旱对气象干旱的响应,同时结合下垫面因子探讨两者的时空干旱特征以及转移概率特征。主要研究目标有:(1)研究气象、农业干旱季节性的时空演变特征;(2)研究下垫面条件下农业干旱对气象干旱的响应特征;(3)分析下垫面条件下农业干旱对气象干旱的响应转移概率关系。

1 研究区概况

贵州是中国南方锥状喀斯特类型的典型分布区,地处云贵高原向东部低山丘陵过渡的斜坡地带,为四川盆地和广西盆地之间一个强烈岩溶化的高原山区^[13](图 1)。地貌深受地质构造控制,切割强烈、高差明显、以盆地、洼地和山谷为主,地形复杂,地表破碎,岩石裸露程度高^[14]。喀斯特地貌发育广,占贵州省面积的 73%^[15]。位于副热带东亚大陆季风区,受西南季风的影响,降水充足,年均降水量达 1 100~1 300 mm,雨热同期。由于地下二元结构复杂,降雨在地表停留时间短,绝大部分渗入地下,地下溶洞、溶沟、地下河等发育,地下排水流畅,保水和持水能力弱。同时,贵州农业生产主要受制于“地”,因此研究贵州省气象干旱对农业干旱的影响是至关重要的。

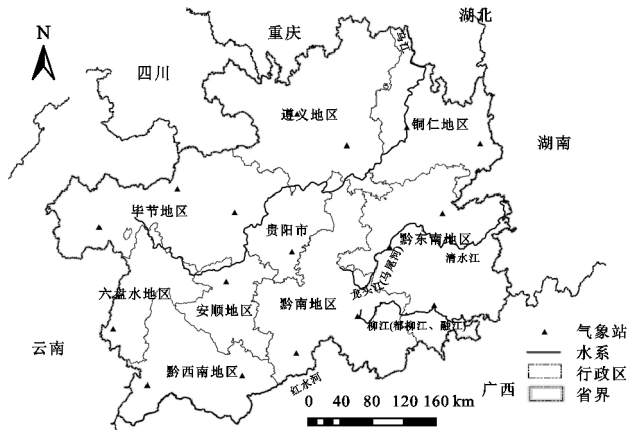


图 1 研究区概况

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文所使用的逐月数据资料为 1980—2020 年 17 个气象站点的降水观测数据与 17 个站点的地下土壤水分提取数据,共 34 个样本站点数据。其中,气

象数据来源于中国气象数据共享网 (<http://data.cma.cn>),土壤水分数据来源于 NASA 全球陆地同化系统 (GLDAS, Global Land Data Assimilation System) (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) 的 GLDAS_NOAH025_M 陆地表面模型数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 1 个月。考虑到土壤水分数据比固定深度的根系土壤水分数据更适合于农业干旱模拟,便选取土壤中 0—100 cm 土层最有效的部分植被根区水分^[10]。利用贵州省 17 个气象站点借助 ArcGIS 软件技术手段提取 1980—2020 年逐月土壤水分数据资料并进行数据预处理;其他数据包括贵州省地貌类型数据和地表切割深度数据等。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱指数选取 标准化降水指数 (SPI) 计算方法是由 mc Kee 等^[16]提出,被广泛用于气象干旱监测和分析指标,由不同时间尺度内累积的降水数据计算得出,被世界气象组织 (WMO) 接受为标准的干旱监测指数,用于量化和预测全球干旱。SPI 具体计算方法参照 Mc Kee 等^[16]和孙智辉等^[17]的方法。

标准化土壤水分指数 (SSI) 用于农业干旱监测与评估分析^[18],其计算方法与 SPI 相似,符合伽马分布,采用双参数伽马概率密度函数描述降水和土壤水分的频率分布,计算公式^[6]为:

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

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为 gamma 函数; x 为降水(土壤水分)累计,其中 α 和 β 为 gamma 的形状和尺度参数。并根据国家气象干旱等级标准 (GB/T 20481—2206)^[2,19],根据 SPI、SSI 值对干旱程度进行分级,见表 1。

表 1 SPI 与 SSI 干旱程度等级划分

SPI/SSI	干旱程度
$-0.5\leq \text{SPI/SSI}<0.5$	无旱
$-1.0\leq \text{SPI/SSI}<-0.5$	轻旱
$-1.5\leq \text{SPI/SSI}<-1.0$	中旱
$-2.0\leq \text{SPI/SSI}<-1.5$	重旱
$\text{SPI/SSI}<-2.0$	特旱

2.2.2 干旱事件识别 本文通过游程理论^[20]识别干旱事件,主要用其来定量评估干旱烈度和干旱历时 2 个特征变量,以此达到对贵州省农业、气象干旱特征选取。以计算出逐月的 SPI 和 SSI 值为基础,根据干旱判别指标^[16],当 $\text{SPI/SSI}<-0.5$ 时,则判定发生干旱,干旱历时即干旱持续时间,表示干旱从发生到结束的时间,干旱烈度为干旱历时过程中 SPI/SSI 的累计值。本文参考相关研究^[21],利用游程理论从 SPI/SSI 的时间序列中提取干旱历时和干旱烈度 2 个干旱特征变量,并将时间序列中的小干旱事件进行合并和删除。

2.2.3 传播响应率 农业干旱与气象干旱之间的传播

百分比表示为响应率 (Rr , response rate index)^[22],传播百分比越高,农业干旱对气象干旱更为敏感,两者间的响应越高,较低的百分比表示农业干旱对气象干旱的响应关系弱(表 2)。响应率计算公式为:

$$Rr=\frac{N}{M}\times 100\% \tag{2}$$

式中: Rr 为响应率的百分比(%); N 为响应气象干旱事件的农业干旱事件的次数; M 为记录期间发生的气象干旱事件次数。

表 2 传播响应率与下垫面条件分级标准

等级	$Rr/\%$	地形地貌	地表切割深度/m
1	0~20	非喀斯特地貌	无地表切割
2	20~40	半喀斯特地貌	浅切割(<200)
3	40~60	峰丛谷地	中切割(200~500)
4	60~80	峰丛洼地	深切割(500~700)
5	80~100	峰林谷地	极深切割(700~1000)
6	—	峰林溶原	最深切割(>1000)

2.2.4 状态转移概率矩阵^[23] 状态转移概率矩阵又称马尔科夫链,农业、气象系列可以看作是马尔科夫过程,一个离散时间的马尔科夫链, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, 其随机过程具有马尔科夫性质,即将到来的状态只取决于当前的状态,不依赖于之前的状态 $X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_1$ 。设随机序列 $\{X_n, n=0, 1, 2, \dots, n\}$, X_n 的条件分布函数与在 $X_{n+1}=x_{n+1}$ 条件下的条件分布函数相等,即:

$$\begin{aligned} Pr(X_{n+1}=x_{n+1} | X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_n=x_n) \\ = Pr(X_{n+1}=x_{n+1} | X_n=x_n) \end{aligned} \tag{3}$$

设 $Pr(X_1=s_j | X_0=s_i) = P_{ij}$ 为 s_i 状态到 s_j 状态的转移概率,则 p_{ij} 表示为转移概率矩阵形式 P 。

$$P=[p_{ij}]=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1s} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2s} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{s1} & p_{s2} & p_{s3} & \cdots & p_{ss} \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中, $0<p_{ij}<1, \sum_{j=1}^s p_{ij}=1, i=1, 2, \dots, s$ s 是状态数; i 为区域下垫面分区; j 为 Rr 。

3 结果与分析

3.1 农业、气象干旱特征分析

3.1.1 干旱特征时间分析 本文利用游程理论选取干旱历时和干旱烈度 2 个变量特征,分析农业、气象干旱的年际和季节性干旱特征变化趋势。图 2 和图 3 为 1980—2020 年农业、气象干旱年际及不同季节下干旱特征的变化。结果表明,在年际尺度上, SPI 干旱历时的年际变化短于 SSI, SPI 和 SSI 干旱历时最长分别为 7 个月 (2009 年、2011 年) 和 12 个月 (2005 年), SPI 干旱烈度值小于 SSI, 值越小, 则越干旱, 两者干旱烈度最小值分别为 -7.68 (2011 年) 和 -19.03 (2011 年)。

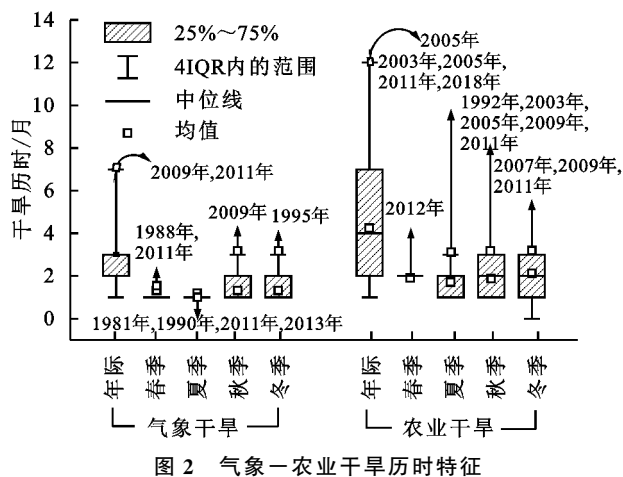


图 2 气象—农业干旱历时特征

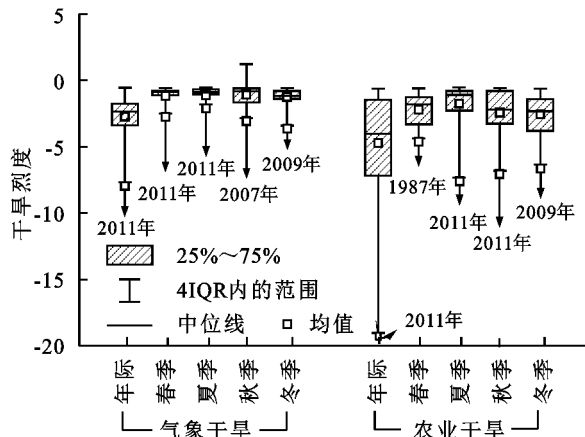


图 3 气象—农业干旱烈度特征

在季尺度上,由图 2 可知,2011 年 SPI 春、夏季干旱历时均达到 3 个月,而秋、冬季节分别在 2009 年,1995 年发生 3 个月持续干旱。春季 SSI 在 2012 年干旱历时达 3 个月,夏季(2003 年、2005 年、2011 年、2018 年)、秋季(1992 年、2003 年、2005 年、2009 年、

2011 年)和冬季(2007 年、2009 年、2011 年)均在以上年份干旱历时长于其他年。由图 3 可知,SSI 季节性干旱烈度变化比 SPI 显著,SPI 干旱烈度最大发生于 2009 年冬季,为 -3.41;SSI 干旱烈度最大发生在 1987 年夏季,为 -7.32,达特旱等级,SSI 季节性干旱烈度均大于 SPI。综上,贵州省在 2000 年后,干旱历时长,干旱烈度增强^[24-25]。农业干旱持续时间长于气象干旱,干旱烈度也呈上升趋势。这是由于贵州省具有特殊的喀斯特地貌,且贵州农业干旱主要受制于“地”,降雨在地表流速快,滞留时间短,地下排水流畅,地下水不能补给土壤水;且贵州技术落后,经济条件差,对水资源开发利用少。因此,一旦发生气象干旱,便会引发更大的农业干旱。

3.1.2 干旱特征空间分析 为探究 1980—2020 年气象、农业干旱的干旱历时空变化特征,根据选取的 17 个站点,计算其年际和季节的干旱历时,并利用 ArcGIS 软件中的样条函数插值法绘制 SPI 和 SSI 干旱历时空分布(图 4 和图 5)。从气象干旱年际和季节空间分布来看(图 4),干旱历时空分布无显著差异且变化比较单一。春、夏及秋季变化趋势与年际变化(91.79~174.16 个月)较一致,呈北部低而其他区域高的变化趋势,且干旱历时较长区域均处于黔西一带。冬季干旱历时分布差异较明显,干旱历时较长的区域位于贵阳、遵义地区西北部一带。夏季(15.73~51.39 个月)和冬季(17.63~50.21 个月)干旱历时相较于春季(12.52~46.13 个月)和秋季(23.13~47.31 个月)历时较长。干旱历时变化与降水季节性 & 贵州省特殊喀斯特地貌有关^[26]。

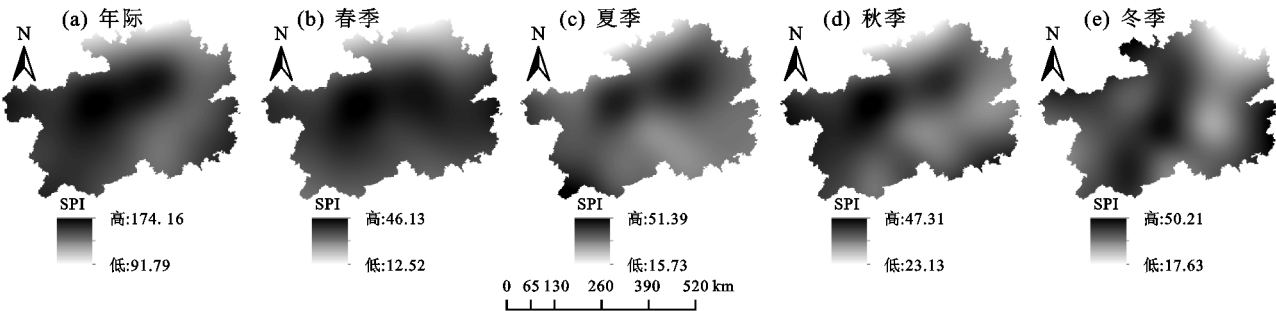


图 4 SPI 干旱历时空分布

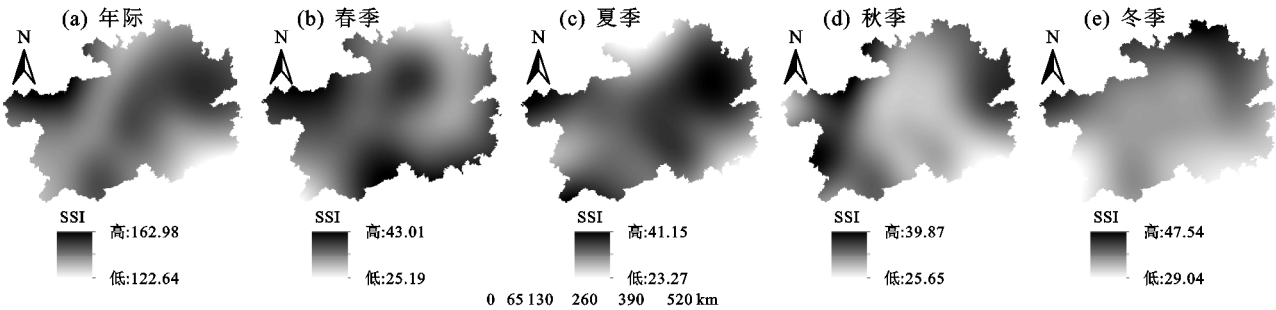


图 5 SSI 干旱历时空分布

从图 5a 可以看出,贵州省农业干旱历时从西北向东南变化趋势呈“高一低一高一低”条带状分布,年际发生干旱的总历时约为 122.64~162.98 个月,毕节与威宁是研究区内干旱历时最长的区域,而榕江、桐梓、盘县、兴义等区域干旱历时相对较短^[27]。春季(图 5b)干旱历时以西北部(毕节、威宁)、南部(望谟、罗甸)最长,中部(黔西、安顺、贵阳等)次之,东北部(思南、三穗等)、西南部(兴义)最短的空间变化特征,干旱历时为 25.19~43.01 个月。夏季(图 5c)以北部(桐梓)、西部(盘县)和东南部(榕江)干旱历时较短,其他区域历时长,变化特征,干旱历时为 23.27~41.15 个月。秋、冬季节(图 5d、图 5e)干旱历时分别为 25.65~39.87 个月和 29.04~47.54 个月,秋季呈自西向东“低—高一低—高”条带状变化趋势、冬季呈“北高南低”变化趋势。结果表明,农业干旱冬季干旱历时相较于其他季节,干旱期较长,秋季干旱历时较短。

干旱烈度即表示为在一定程度上反映干旱强弱^[26]。从图 6 可以看出,SPI 干旱烈度空间差异性相较于 SSI 较为明显且复杂,年际干旱烈度在空间上无显著差异,干旱烈度为-0.97~0.157,其中毕节地区未发生明显气象干旱,其他地区发生轻度干旱。春季和夏季干旱烈度分别为-1.128~-0.204,-1.161~-0.671,显然,春季独山、夏季湄潭地区达中旱等级。秋季自西北向东南呈“增强—减弱—增强”演变特征,其中威宁、独山、榕江、三穗等区域干旱化态势较强,干旱烈度为-1.159~-0.643,以轻旱为主。冬季干旱烈度自西南向东北呈递减趋势,为-1.267~-0.421,在盘县达中旱等级,其他地区干旱化态势较

弱。从图 7 可以看出,贵州省农业干旱年际和季节干旱烈度空间分布特征无显著差异。由年际(图 7a)变化来看,农业干旱表现为东北部干旱化态势强,其余地区态势弱的变化特征,干旱烈度为-1.721~-0.726,以轻中旱为主。从季节上看,春季干旱烈度为-1.721~-0.725,干旱显著发生在西南部的兴义地区,干旱等级达重旱,而在桐梓、贵阳、望谟、罗甸、凯里等地区干旱化态势较弱。夏季干旱化态势自北向南呈“增强—减弱—增强”变化趋势,干旱烈度为-1.908~-0.961,北部和东南部以重旱为主,其余地区以轻中旱为主。秋季和冬季空间演变趋势较其他季节更为显著,干旱烈度均呈自东北向西南迁移,干旱化态势变强,以中旱为主。

结果表明,在干旱历时空间分布特征上,农业干旱空间差异性较气象干旱更为显著,气象干旱总历时长于农业干旱。在干旱烈度空间分布格局上,气象干旱空间变化格局较农业干旱更为显著,但 SSI 干旱烈度强于 SPI;在空间变化上,气象干旱发生历时长,烈度小,农业干旱发生历时较短,但烈度大。贵州省农作物主要以玉米、水稻等为主,其生长期主要在 4—9 月^[28],因此从空间上看,气象干旱总历时长于农业干旱,由于土壤水分对降水相对敏感,农业干旱历时空差异性则较为显著。贵州省地貌类型复杂、降水、气温等气象要素在空间上表现出显著的地域性、多样性及不稳定性,导致气象干旱在不同地域上表现出较大的差异,因为土壤水分直接受降雨影响,农业干旱出现滞后性,导致持续无降水的情况下,农业干旱加剧,烈度增强。

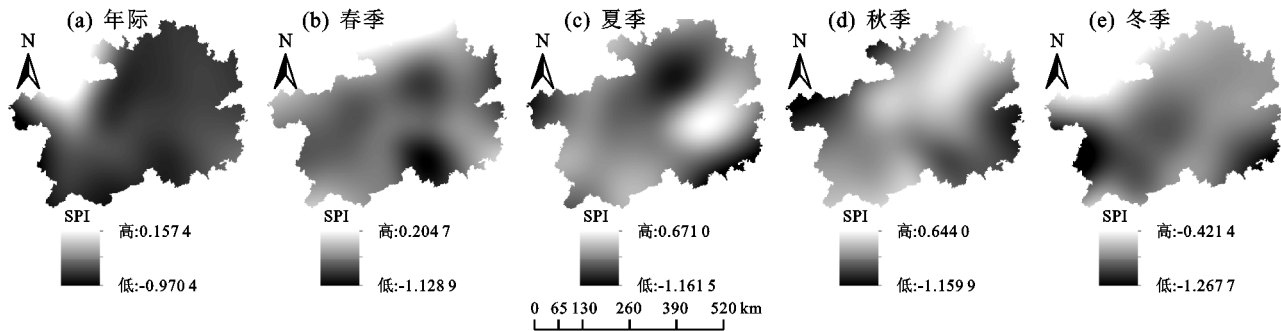


图 6 SPI 干旱烈度空间分布

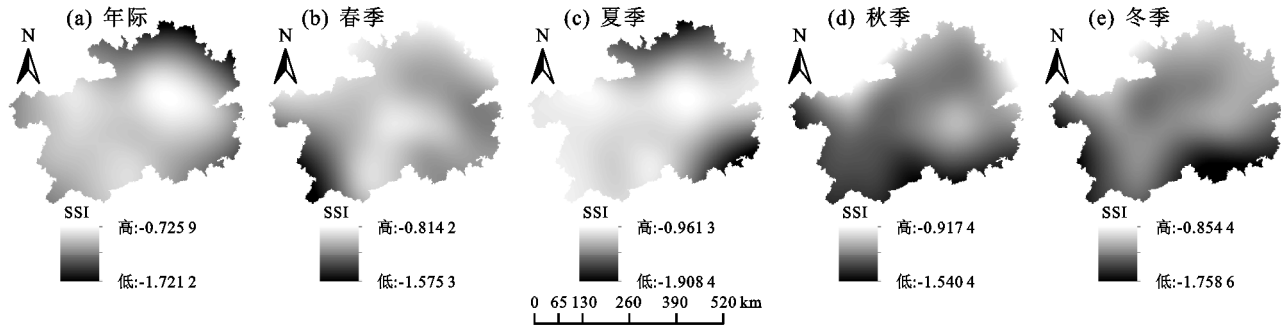


图 7 SSI 干旱烈度空间分布

3.2 不同下垫面条件下农业干旱对气象干旱的响应特征分析

3.2.1 不同地貌类型下农业—气象干旱响应特征

气象、农业干旱之间关系主要包括一场气象干旱引发一场农业干旱、一场气象干旱引发多场农业干旱、多场气象干旱引发一场农业干旱^[29]。气象、农业干旱的发生与下垫面有密切联系,本文拟选取地貌类型和地表切割深度 2 个自然因素在空间上对气象干旱向农业干旱传播响应程度进行分析,根据贵州省综合地貌图,将地貌类型划分为 6 类(表 2)。在不同地貌类型下,季节性的传播响应程度的空间变化特征中春季(图 8a)农业干旱对气象干旱响应较高的区域在威宁西部地区,传播响应率为 80%~90%,地貌类型主要以半喀斯特低中山地貌为主,因半喀斯特低中山地区溶蚀—侵蚀作用强烈,其裂隙、孔隙大,易导致水资源枯竭,并且春季作物需水量大,导致土壤水分对降水增减非常敏感,尤其在海拔较高、坡度较大的区域,因此响应程度高。夏季(图 8b)传

播响应率呈自西向东递增的变化趋势,气象干旱向农业干旱传播响应率最高的区域在贵阳、凯里一带,其地貌类型以峰丛谷地为主,响应率为 80%~90%,峰丛谷地以溶蚀作用为主,夏季虽降水充足,但地下溶洞、溶沟、地下河、节理裂隙发育,保水能力弱,农业干旱对气象干旱的响应程度较高。秋季(图 8c)和冬季(图 8d)传播响应率空间变化显著且复杂,秋季响应高的区域位于望漠和独山南部区域一带,地貌类型以非喀斯特地貌为主,响应率为 80%~90%,望漠、独山一带石漠化严重,土层薄,持水能力弱,秋季降水少,因而气象干旱对农业干旱传播响应程度高。冬季响应高的区域位于东部三穗、铜仁、思南以及西部安顺一带,地貌类型以半喀斯特低中山地貌为主,响应率为 60%~70%。综上,在春季和冬季响应率较高的区域,均以半喀斯特低中山地貌为主,夏季以峰丛谷地为主,秋季以非喀斯特地貌为主。冬季气象干旱对农业干旱的响应程度明显低于其他季节,春季响应范围广且程度大。

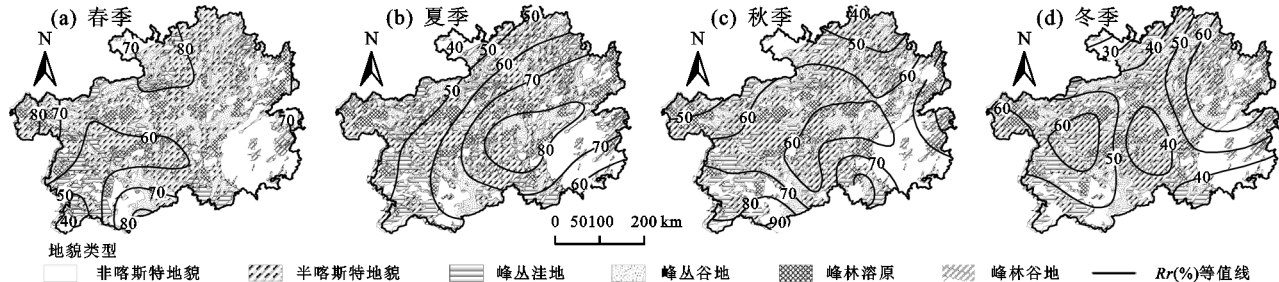


图 8 不同地貌类型下季节响应率的空间变化

3.2.2 不同切割深度下农业—气象干旱响应特征

在分析不同地貌类型下农业干旱对气象干旱响应的空间变化特征的基础上,进一步深入探讨在不同切割深度下 2 种干旱类型间的传播响应特征,根据贵州省综合地貌图,将贵州省切割深度划分为 6 种类型,即无地表切割(I)、浅切割(II)、中切割(III)、深切切割(IV)、极深切切割(V)和最深切割(VI)。在不同地表切割深度下,季节性的传播响应程度空间演变特征中春季(图 9a)气象干旱向农业干旱传播响应率为 80%~90%,以最深切割深度为主,位于威宁一带。响应率为 70%~80%,以深切切割为主,位于桐梓和望漠一带,响应程度较低的地区位于兴义一带,以无地表切割深度为主,传播响应率为 40%~50%。夏季(图 9b)传播响应高发区以中切割深度为主,位于贵

阳、凯里一带,响应率为 80%~90%,传播响应低发区位于桐梓西北部一带,以极深切切割为主,响应率为 30%~40%。秋季(图 9c)农业干旱对气象干旱传播响应程度较强的区域以无地表切割深度为主,主要发生在西南地区望漠,响应率为 80%~90%,响应程度较低的区域位于遵义地区的东北部和威宁西北部一带,以深切切割深度为主,响应率为 40%~50%。冬季(图 9d)2 种干旱类型间传播响应率高的区域以深切切割深度为主,在安顺一带以及思南、铜仁、三穗等区域,响应率为 60%~70%,传播响应率低的区域在桐梓西北部,以极深切切割深度为主,响应率为 20%~30%。综上,在春季传播响应率与地表切割深度呈正相关关系,在夏季、秋季和冬季传播响应率与地表切割深度呈负相关关系。

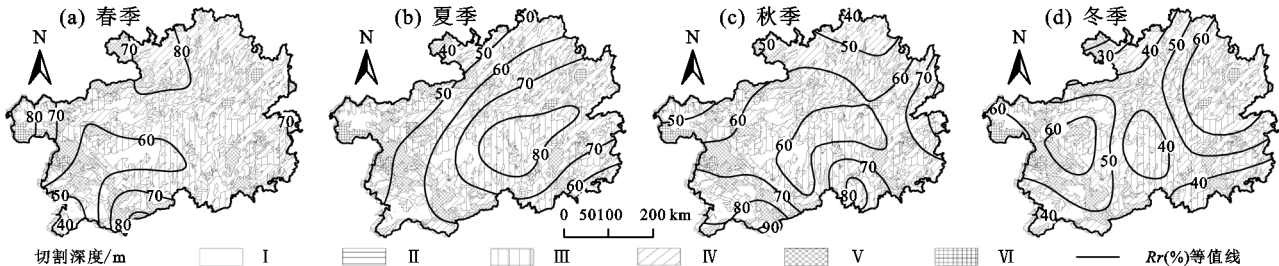


图 9 不同切割深度下季节响应率空间变化

3.3 下垫面条件下农业干旱对气象干旱的响应转移概率

3.3.1 不同地貌类型下农业—气象干旱的响应转移概率 为深入分析基于下垫面条件下干旱传播响应率在不同等级之间的转移概率特征,选取 20 世纪 80s 至 21 世纪 10s 2 个状态,在季尺度下,探讨在不同地貌类型下,农业干旱对气象干旱响应程度的转移概率特征。在非喀斯特地貌、半喀斯特地貌、峰丛谷地、峰丛洼地、峰林谷地、峰林溶原地貌类型下(图 10),传播响应率均发生了不同程度的概率转变。春季(图 10a)转移概率为 0~0.72,在各地貌类型中,各等级间均发生了概率性转移,主要呈现 1~5 级 R_r 转向 3~5 级 R_r ,转移较活跃,概率较低。夏季(图 10b)各级响应率在不同地貌类型下转移概率分布大体相似,干旱传播响应率在 20 世纪 80s

转向 21 世纪 10s 时,均呈现 1~5 级 R_r 转向 4~5 级 R_r ,呈现出由“低转高”的现象,转移概率为 0~0.55,显然,夏季农业干旱对气象干旱响应发生转移的概率偏低。秋季(图 10c)各地貌类型下,20 世纪 80s 的 1 级响应率向 21 世纪 10s 的 2~4 级响应率发生转移的概率较大,转移概率为 0~0.97,即“低转高”现象。冬季(图 10d)在不同地貌类型下,明显可见 20 世纪 80s 中不同等级 R_r 均转移在 21 世纪 10s 各等级 R_r 上,转移较为活跃,转移概率为 0~0.69。综上,在春季和冬季转移较活跃,概率较低,在夏、秋季主要发生“低转高”的现象,其中,秋季干旱传播响应在 4 个季节中发生转移的概率最显著。同时,在不同季节上,各地貌类型下,干旱响应率转移活跃程度较高,同时也说明干旱响应率的高低与地貌类型相关较弱。

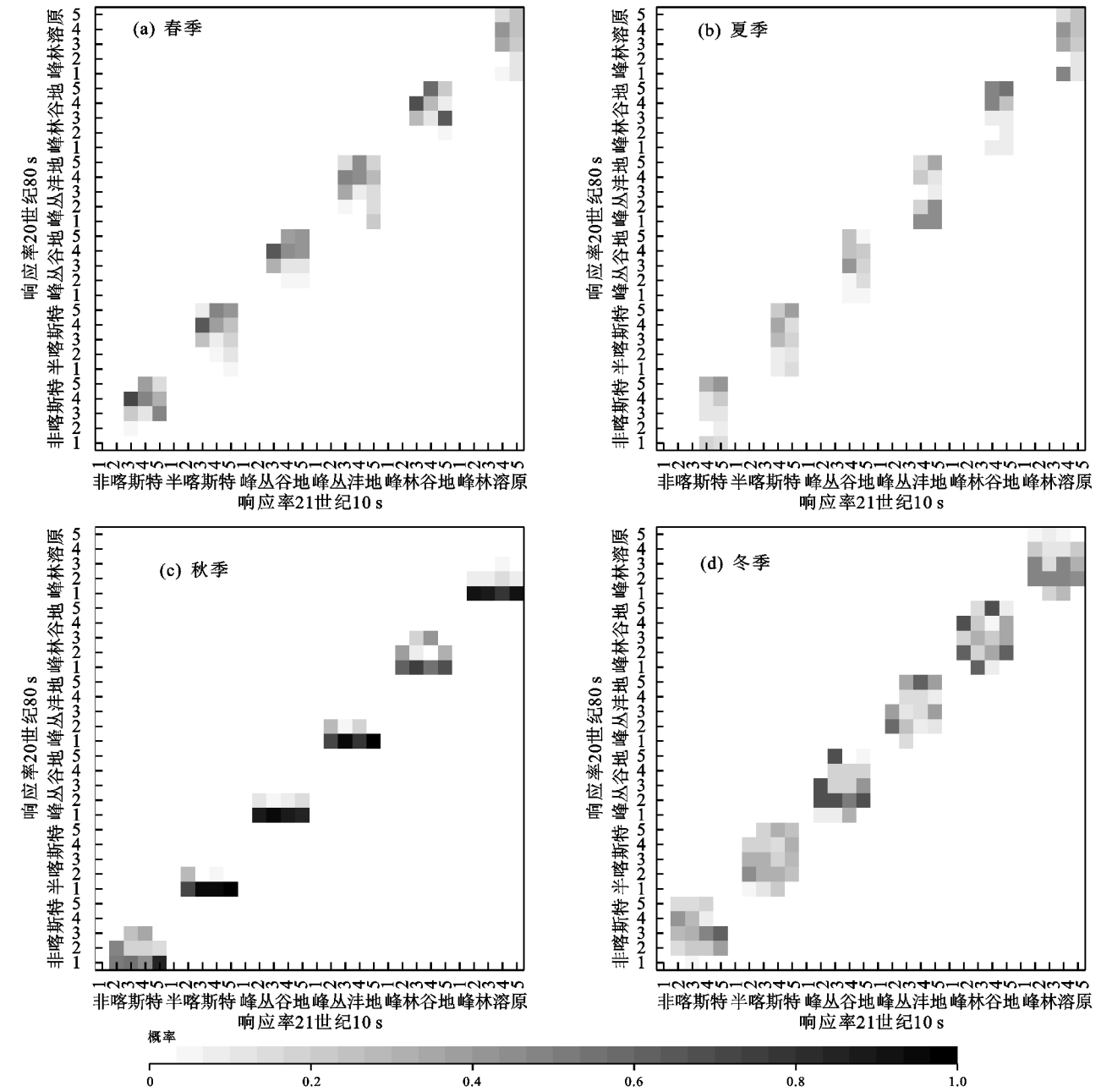


图 10 不同地貌类型下转移概率特征

3.3.2 不同切割深度下农业—气象干旱的响应转移概率 地表切割深度是影响气象干旱向农业干旱传播的重要影响因素,因此,将 2 种干旱类型的传播响应率并结合贵州省地表切割深度,探讨在不同的切割深度下,20 世纪 80s 干旱响应率等级向 21 世纪 10s 干旱响应率等级转移的概率特征(图 11)。春季(图 11a)在不同切割深度下,其转移概率有所不同,在无地表切割、中切割、深切割和极深切割深度下, R_r 转移较为活跃,概率较低,在浅切割和最深切割深度下,转移活跃度下降,但概率较高。夏季(图 11b)干旱响应率 20 世纪 80s 转向 21 世纪 10s 时,呈 4~5 级 R_r 转向 1~5 级的“高转低”现象,其中在 10s 浅切割深度的 4 级干旱响应和最深切割深度的 1 级响应

率的转移概率较高。秋季(图 11c)20 世纪 80s 各切割深度下皆出现了 1 级 R_r 转向 21 世纪 10s 的 2~5 级 R_r ,概率偏高,在中切割深度、深切割深度和极深切割深度中,转移较活跃,在浅切割和最深切割深度下转移概率偏高。冬季(图 11d)明显看出,在浅切割和最深切割深度下,干旱转移概率较高,其他切割深度下,干旱转移较活跃,概率较低。因此,季节尺度上,在浅切割和最深切割深度下,均呈现干旱传播响应率转移活跃度低,概率高,而在其他切割深度上,转移活跃,概率较低的规律。其中,秋季 20 世纪 80s 干旱传播响应率向 21 世纪 10s 转移的概率整体明显高于其他季节,冬季干旱传播响应率的转移活跃度明显高于其他季节。

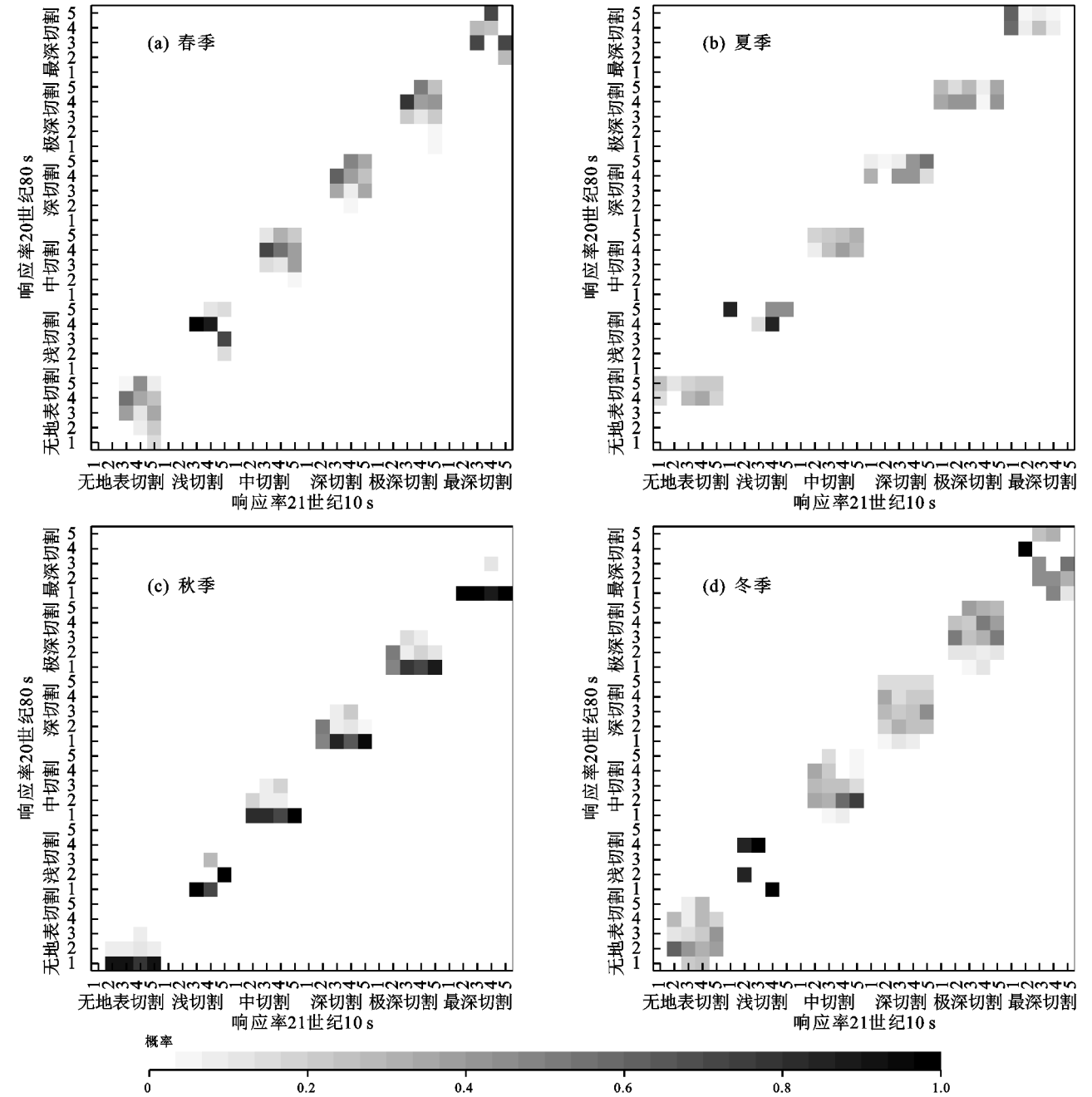


图 11 不同切割深度下转移概率特征

3.3.3 干旱传播响应率与下垫面条件相关分析 下垫面是影响干旱传播的重要因素,而地表切割深度与地貌类型是下垫面主要因子。表 3 为干旱传播响应率与区域下垫面在各季节上的相关系数。由表 3 可知,干旱传播特征与地貌和切割深度均有相关关系。春、秋季响应率在地形地貌条件下呈负相关,夏、冬季呈正相关,且相关性较弱,表明农业干旱对气象干旱的响应受地貌的影响较小。春季响应率在地表切割深度下呈正相关,夏季呈显著负相关,秋、冬季呈负相关。地表切割深度越深,春季传播响应率越高,说明气象干旱加剧农业干旱,地表切割深的区域以旱坡地为主,春季作物需水量大,对气象干旱的响应强。地表切割深度越深,夏、秋与冬季传播响应率越低,因夏季降水丰富,地表切割深度区域地表水易汇集,农作物需水量能够得到及时补给;秋季作物进入成熟期,需水量下降;区域冬季作物少,日照时间少,温度低,有少量雨雪对其进行补给,地表蒸发量较弱;表明农业干旱对气象干旱的响应低。由表 3 可知,气象干旱与农业干旱的传播响应率与地形地貌的相关性较弱,与地表切割深度联系较密切。

下垫面条件	响应率			
	春季	夏季	秋季	冬季
地貌	-0.488	0.414	-0.621	0.488
地表切割深度	0.393	-0.845*	-0.393	-0.497

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。

4 讨论

本文利用游程理论方法提取干旱特征,分析 1980—2020 年干旱特征时空变化趋势,同时计算干旱传播响应率,利用其表征农业干旱对气象干旱的响应程度,结合下垫面条件,分析季节时间尺度上传播响应率的空间变化特征。本研究发现,季节上贵州省农业干旱历时与干旱烈度的变化趋势与气象干旱变化较为一致,农业干旱持续时间均长于气象干旱,干旱烈度上升趋势较气象干旱而言更快。农业干旱历时空间格局较气象干旱变化显著,干旱历时短于气象干旱,气象干旱烈度空间变化较农业干旱复杂,干旱烈度低于农业干旱。本研究结果与 Xu 等^[6]和罗纲等^[7]的研究结果总体上基本一致。但是各区域地形地貌、水热条件和气候特征等分布特征存在差异,从而 2 种干旱空间分布存在差异。由于贵州下垫面复杂,旱坡地多、坡度大,透水强,排水快,土层薄,土壤保水蓄水能力弱,农业灌溉面积少,是典型的山地农业,地下水不能有效补给土壤水分,降水分布不均,导致气象干旱一旦发生且持续发生,农业干旱随之发

生,且持续时间长,烈度大。

在不同地貌类型下,春季干旱传播响应率最高,且覆盖范围广,其中春、冬季响应率最高的地区以半喀斯特低中山为主,夏季以峰丛谷地为主,秋季以非喀斯特地貌为主,这种差异是由喀斯特特殊地质构造以及流域岩性导致。在不同切割深度下,切割越深春季传播响应率越高,夏、秋和冬季节传播响应越弱。据资料显示,贵州省以山地农业为主,春季为播种季节,作物需水量大,同时由于地表切割深度大,坡陡,土壤水侧流,农业活动对土壤不断翻松,土壤紧密程度改变,受降雨影响,易形成坡面土壤侵蚀,则土壤保水能力弱,抗旱能力降低^[27];秋季作物需水量小,降水少,日照时数长,地表切割深度越大,温度高,土壤水蒸发越快。夏季降水充足,地表切割深度越小,土壤含水量受降水的影响越敏感;冬季降水少,且贵州冬季作物少。因此,在春秋季节,地表切割深度越大,干旱传播响应率越高;在夏冬季节,地表切割深度越小,更能直接表现气象干旱向农业干旱转移的程度。

本文仅从自然条件的角度分析农业干旱对气象干旱的响应,但在实际的干旱传播响应过程中,人类活动、土地利用、社会经济发展均对流域空间结构产生重大影响,甚至是破坏流域下垫面的主要因素,从而影响气象干旱向农业干旱的传播。影响干旱传播的因素较多且复杂,结合贵州省的实际情况,下一步需要全面分析在自然条件与社会经济条件相结合的基础上研究气象干旱向农业干旱传播的影响因素。

5 结论

- (1)在 2000 年后,贵州省气象、农业干旱历时长,干旱烈度大,气象干旱加剧农业干旱旱情,农业干旱持续时间比气象干旱更长,干旱烈度大。气象干旱历时空间格局较农业干旱而言更为复杂,干旱烈度空间变化却较农业干旱单一。
- (2)干旱传播响应特征明显,贵州省春季农业干旱对气象干旱响应较敏感,气象干旱与农业干旱传播响应程度高且范围广,冬季干旱传播响应率较其他季节低,春、冬季节传播响应率高的地区均在半喀斯特低中山地貌区;夏季主要发生在峰丛谷地地貌区;秋季以非喀斯特地貌为主。同时,本研究发现,地表切割越深,春季 R_r 较高,而夏、秋和冬季节 R_r 较低。可见,干旱传播响应程度与地貌差异的相关性弱,但是与地表切割深度关系密切。
- (3)从下垫面条件分析干旱传播转移概率特征发现,从 20 世纪 80s 转向 21 世纪 10s 间,各地貌类型下,均发生了不同程度的概率转移,春、冬季节转移活跃,概率低,夏、秋季主要呈“低转高”现象,夏季转移概率偏低,秋季转移概率普遍偏高。不同切割深度

下,各季节浅切割与最深切割深度转移活跃度低,概率高,其他切割深度下转移活跃,但概率低。

参考文献:

- [1] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [2] Yao N, Zhao H C, Li Y, et al. National-scale variation and propagation characteristics of meteorological, agricultural, and hydrological droughts in China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): e3407.
- [3] 赖力, 栗晓玲, 冯凯. 甘肃省农业干旱对多尺度气象干旱的响应[J]. *节水灌溉*, 2020(2): 102-108.
- [4] Dracup J A, Lee K S, Paulson E G. On the definition of droughts [J]. *Water Research*, 1980, 16(2): 297-302.
- [5] Gui H, Zhang J H, Yao F M, et al. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2015, 35: 270-283.
- [6] Xu Y, Zhang X, Hao Z C, et al. Characterization of agricultural drought propagation over China based on bivariate probabilistic quantification [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598(4): e126194.
- [7] 罗纲, 阮甜, 陈财, 等. 农业干旱与气象干旱关联性: 以淮河流域以上地区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 977-991.
- [8] Zhao P P, Lü H S, Wang W C, et al. From meteorological droughts to hydrological droughts: A case study of the Weihe River Basin, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(11): 1-13.
- [9] 唐敏, 张勃, 张耀宗, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的青海省东部农业区春夏气象干旱特征的评估[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 1029-1042.
- [10] 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: e106540.
- [11] 李明, 葛晨昊, 邓宇莹, 等. 黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(12): 2105-2114.
- [12] 周浩, 金平, 夏卫生, 等. 三江平原挠力河流域主要作物水分盈亏时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 159-166.
- [13] 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(01): 340-353.
- [14] 王兴富, 曹人升, 吴先亮, 等. 喀斯特山地废弃矿区土壤重金属污染评价[J]. *贵州师范大学学报*, 2021, 39(5): 29-35.
- [15] 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.
- [16] Mc Kee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, California, USA: American Meteorological Society, 1993.
- [17] 孙智辉, 王治亮, 曹雪梅, 等. 基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区 1971—2010 年干旱变化特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1560-1567.
- [18] Hao Z, AghaKouchak A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 57: 12-18.
- [19] 张强, 邹旭凯, 肖风劲, 等. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级 (GB/T 20481—2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [20] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 50-56.
- [21] 杨铭珂, 贺中华, 张浪, 等. 不同时间尺度下气象干旱向水文干旱传播过程[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 350-360.
- [22] Sattar M N, Lee J Y, Shin J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(7): 2439-2452.
- [23] Chen Y D, Zhang Q, Xiao M, et al. Transition probability behaviors of drought events in the Pearl River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(1): 159-170.
- [24] 张浪, 贺中华, 夏传花, 等. 基于时变 Copula 模型的多尺度气象干旱, 水文干旱特征及其概率分析: 以黔中水利工程区为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 115-125, 130.
- [25] 慎东方, 商崇菊, 方小宇, 等. 贵州省干旱历时和干旱烈度的时空特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 138-143.
- [26] 毛春艳, 戴丽, 杨广斌, 等. 1960—2016 年贵州喀斯特山区干旱时空动态分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(3): 64-72, 79.
- [27] 朱军, 帅士章, 王星, 等. 基于 GIS 的贵州省农业干旱灾害危险性评价[J]. *中低纬山地气象*, 2021, 45(1): 9-16.
- [28] 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.
- [29] 冯凯, 栗晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. *农业工程报*, 2020, 36(8): 103-113.