

# 基于 CWSI 的贵州省干旱时空变化特征及影响因素分析

梁任刚, 周旭, 李松, 杨大方, 陈大蓉, 裴宇

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018)

**摘要:**为了促进贵州省农业和生态环境可持续发展,基于作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI),结合气象、植被指数等数据,采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、变异系数和相关性分析等方法,对贵州省 2000—2019 年的干旱时空变化特征、趋势及影响因素进行了分析。研究表明:(1) 贵州省 CWSI 多年均值为 0.43,整体处于轻旱等级,空间分布为东南湿润,西北干旱,多年旱情变化呈缓解趋势;(2) 从地貌类型来看,非喀斯特地貌 CWSI 多年均值为 0.37,整体处于无旱等级,喀斯特地貌均值为 0.47,处于轻旱状态;(3) 从植被类型来看,除针叶林整体处于无旱状态外,其他植被类型都处于轻旱等级,且针叶林的变异系数(CV)值较其他林地高,说明其对气候因子的敏感性高,抗旱能力强;(4) 贵州省 CWSI 与降水和气温均呈负相关,负相关面积占比为 95% 和 54%,说明降水对 CWSI 的影响较大。综合分析得出,贵州省东南部湿润,西北地区干旱,全省干旱受喀斯特地貌、降水的影响较大。

**关键词:**干旱; 作物缺水指数(CWSI); 喀斯特地貌; 植被类型

中图分类号:S423

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0284-08

## Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Drought in Guizhou Province and Its Influencing Factors Based on CWSI

LIANG Rengang, ZHOU Xu, LI Song, YANG Dafang, CHEN Darong, PEI Yu

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** To promote the sustainable development of agriculture and ecological environment in Guizhou Province, based on the crop water stress index (CWSI), meteorological and vegetation index data, we used Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test, and coefficient of variation and correlation analysis to analyze the spatial and temporal variation characteristics of drought in Guizhou Province from 2000 to 2019. The analysis was conducted to provide a scientific basis for drought research and water resources management in Guizhou Province by analyzing the characteristics, trends and influencing factors of drought from 2000 to 2019. The results show that: (1) the multi-year average value of CWSI in Guizhou Province was 0.43, with an overall light drought level, and the spatial distribution was wet in the southeast and dry in the northwest, and the multi-year drought changes were in a relieving tendency; (2) in terms of landscape types, the multi-year average value of CWSI in non-karst landscapes was 0.37, with an overall drought-free level, while the average value of karst landscapes was 0.47, with a light drought status; (3) from the perspective of vegetation types, except for coniferous forests, all other vegetation types were in light drought status, and the coefficient of variation values of coniferous forests were higher than those of other woodlands, indicating their high sensitivity to climatic factors and strong drought resistance; (4) CWSI in Guizhou Province was negatively correlated with NDVI and precipitation, and the areas of negative correlation was 93% and 95%, respectively; it was both positively and negatively correlated with temperature, and the area of negative corre-

收稿日期:2021-04-21

修回日期:2021-05-08

资助项目:国家自然科学基金委员会—贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1812401);贵州省科学技术项目([2017]1131);贵州省科技支撑项目([2017]2855);贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2018]2776)

第一作者:梁任刚(1988—),男(侗族),贵州天柱人,硕士研究生,主要从事地理信息系统与遥感研究。E-mail:290822359@qq.com

通信作者:周旭(1981—),男,四川古蔺人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为遥感水文与流域管理。E-mail:zxzy8178@163.com

lation was 54%. The comprehensive analysis concluded that the southeastern part of Guizhou Province was wet and the northwestern part was dry, and the drought in the province was influenced by the karst landscape, precipitation and vegetation.

**Keywords:** drought; CWSI; karst landscapes; vegetation types

干旱是一种复杂的自然灾害,在世界范围内对环境、社会和经济造成严重损害<sup>[1]</sup>。就经济成本而言,干旱被认为是最具破坏性的自然灾害之一<sup>[2]</sup>。在全球气候暖干化的大背景下,近些年干旱频率加快,旱情程度加重<sup>[3]</sup>。由于站点分布稀少和不均匀等缺点,基于气象站数据估算的干旱指数在空间上不连续,不能很好体现干旱的空间分布特征<sup>[4]</sup>。随着遥感技术发展日趋成熟,拥有高时空分辨率产品,使得基于遥感数据的干旱指数逐渐成为干旱研究的热点<sup>[5]</sup>。

作物缺水指数(CWSI)综合了地面风速、日照时数、水汽压、气温等气候要素的作用,基于能量平衡原理理论为基础,具有较高的测量精度和明确的物理意义,在农业干旱研究中得到广泛应用<sup>[6]</sup>。在国内,申广荣等<sup>[7]</sup>利用作物缺水指数监测黄海平原旱情,结果表明 CWSI 基本达到了准确、实时监测旱情的目的;王玉娟等<sup>[8]</sup>基于 CWSI 对渭河流域进行干旱监测,结果表明模拟值与实测值相关系数达到 0.80。但是 CWSI 计算需要地面观测资料和常规气象数据,计算过程比较复杂,因此在使用上受到一定限制<sup>[9]</sup>。2011 年美国 NASA 团队发布了全球陆地蒸散数据集(MOD16),该数据集基于 Penman-Monteith 遥感模型和 MODIS 数据研发<sup>[10]</sup>,经过全球通量塔数据验证,模拟精度高达 86%<sup>[11]</sup>,为 CWSI 的计算提供了新思路 and 优质的数据源。近年来该数据集在我国得到广泛运用,如:温暖媛等<sup>[12]</sup>基于 MOD16 数据集与气象站点实测数据研究了山西省地表蒸散发和潜在蒸散发的空间分布特征、变化趋势及影响因素,结果证明 MOD16 蒸散产品与气象站点实测数据具有良好的空间相关性( $R^2=0.90$ );何慧娟等<sup>[4]</sup>基于 MOD16 产品,计算 CWSI 分析了陕西关中地区的干旱时空分布特征;汪左等<sup>[13]</sup>也通过 MOD16 数据集计算 CWSI,分析了安徽省干旱时候空特征及影响因素。

贵州省是世界喀斯特地貌面积最大的连片中心,长期强烈的岩溶作用致使其产生了地表、地下双层空间结构,土层浅薄、土壤分块分布且总量少,生态环境及其脆弱<sup>[14]</sup>。加上降水时空分布不均、下渗系数大、地下水位深等特点,干旱事件时常发生<sup>[15]</sup>。如 2009 年秋季至 2010 年春季以贵州为中心的 5 个省份严重旱灾<sup>[16]</sup>。前人针对贵州省干旱时空变化的研究大多基于气象站数据估算的干旱指数,这样的站

“点”干旱不能很好表现其在空间上的分布特征<sup>[17-20]</sup>。本研究基于中分辨率遥感产品 MOD16 数据集,计算作物缺水指数(CWSI),分析 2000—2019 年贵州省干旱的时空分布特征及影响因素,由“点”转“面”的研究,为贵州省干旱研究与水资源管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

贵州省地处我国西南腹地,介于东经 103°36′—109°35′、北纬 24°37′—29°13′,境内地势西高东低,平均海拔 1 100 m(图 1)。气候类型属亚热带高原季风湿润气候,由于地势差异性较大,导致其气温和降水在空间分布上不均匀,多年气温年均值 10~20℃,降水 1 100~1 300 mm,光照条件差,常年多云雨,相对湿度较大。境内约 73% 的国土面积都有碳酸岩露出,根据《岩溶地区水土流失综合治理技术标准 SL461-2009》和其他研究者的划分<sup>[21]</sup>,可分为岩溶槽谷、断陷盆地、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶高原和非喀斯特地区。贵州省主要粮食作物为水稻和玉米,虽然降水充沛,但由于其特殊的地形地貌原因,旱涝灾害时有发生,严重影响当地农业生产和生态环境可持续发展。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据获取与处理

2000—2019 年的实际蒸散发(Evapotranspiration, ET)、潜在蒸散发(Potential Evapotranspiration, PET)和归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)以及 2015 年土地利用数据都来源中分辨率遥感产品 MODIS 数据集,地址为: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>。其中年尺度的 ET 和 PET 取自 MOD16A3 产品,空间分辨率为 500 m,月尺度的采用 MOD16A2 产品合成,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d 每期。NDVI 为 MOD13A3 产品,该产品空间分辨率为 1 km,时间分辨为月每期。土地利用数据为 500 m 分辨率的 MCD12Q1,采用 IGBP 的全球植被分类方案。土壤相对湿度、气温和降水数据来源中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

运用 MRT 工具将 HDF 格式的 MODIS 数据转为 Geo TIFF,并对其重投影。剔除 MODIS 数据中

的填充值,采用最大值合成法,将月尺度的 NDVI 数据合成年尺度,ET,PET 按照期数日期合成月尺度。DEM 采用美国地质勘探局提供的 30 m 分辨率数

据,并采用 ANUSPLIN 软件薄盘光滑样条法以经度、纬度为自变量,对降水、气温进行插值,并重采样为 1 km。

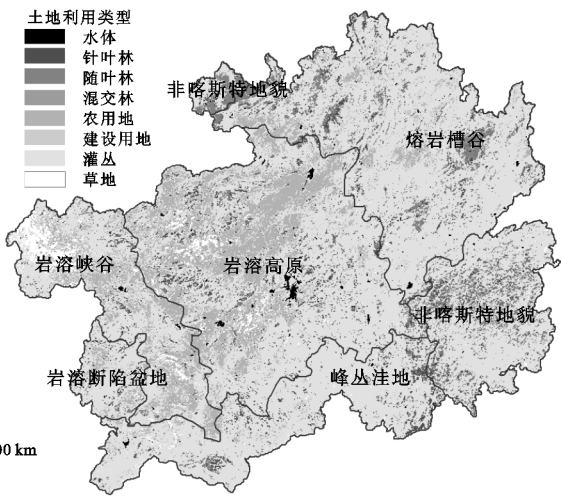
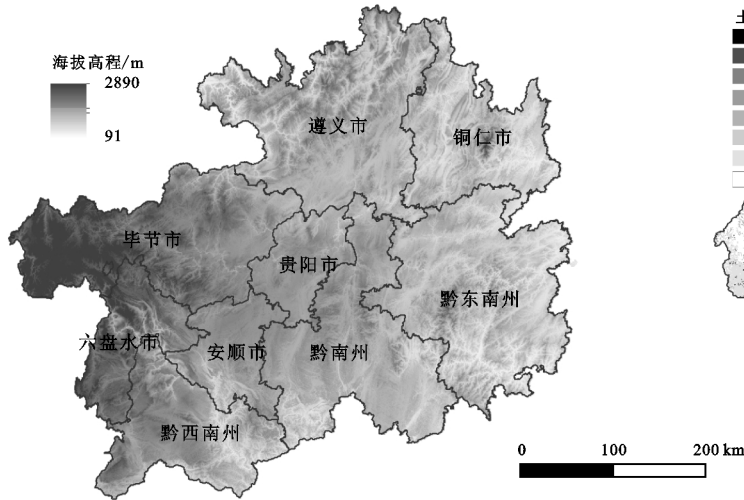


图 1 研究区地势及 2015 年土地利用现状

2.2 研究方法

2.2.1 作物缺水指数法 蒸散发是地球下垫面水汽输送的过程,潜在蒸散发是指区域内供水条件十分充足的条件下区域蒸散发的能力,区域内 ET 与 PET 的关系可作为该地区作物缺水及干旱的重要指标。Jackson 等<sup>[22]</sup>将作物缺水指数(CWSI)定义为:

$$CWSI=1-\frac{ET}{PET} \tag{1}$$

式中:ET 为实际蒸散量;PET 为潜在蒸散量;CWSI 为作物缺水指数。CWSI 的值在 0~1,值越小,表明越湿润,反之干旱。

2.2.2 分析方法 运用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验相结合的方法,此方法已经成功应用于水文、植被、气象等长时间序列分析中,在时序变化和趋势分析及趋势显著性检验方面取得了良好效果<sup>[23]</sup>,计算公式详见文献<sup>[24]</sup>。用 Theil-Sen Median 趋势分别计算 ET,PET 和 CWSI 的变化速率,当斜率小于 0 时表明要素呈减少趋势,反之则呈增加趋势。Mann-Kendall 检验统计量 Z 值用来判断趋势的显著性,当|Z|>1.65,1.96,2.58 时分别表示分别通过了 90%,95%和 99%的置信度显著性检验,统计量 p 值为变化趋势的显著性,p 值越低,表明变化趋势可信。

采用变异系数(Coefficient of Variation,CV)分析稳定性,它可以量化观测值的变异程度,能够准确表示单位均值的离散程度<sup>[13]</sup>。计算式为:

$$CV=\frac{\sigma}{\bar{X}} \tag{2}$$

式中:σ 和  $\bar{X}$  表示标准差和平均值;CV 为变异系数,

CV 值越大,表示数据波动大,数据分布越离散;反之则表示数据波动小,数据分布越集中。

相关系数计算公式为:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^n [(CWSI_i-\overline{CWSI})(X_i-\overline{X})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (CWSI_i-\overline{CWSI})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i-\overline{X})^2}} \tag{3}$$

式中:R 为相关系数,R<0 表示两要素呈为负相关,R>0 表示两要素呈正相关;CWSI<sub>i</sub>和 $\overline{CWSI}$ 分别表示第 i 年的 CWSI 值和多年平均值;X<sub>i</sub>表示第 i 年的影响因素值; $\overline{X}$  表示其多年均值。

3 结果与分析

3.1 CWSI 监测结果检验

为了检验 CWSI 在贵州省的适用性,依据国家气象局以 20 cm 土壤相对湿度作为旱情的分级标准<sup>[25]</sup>,将 CWSI 数据与 20 cm 土壤相对湿度数据做相关分析。由于贵州省农业气象站数据的大量缺失,经过比较筛选最终选取数据相对较全的 2010 年正安、赫章和水城 3 个站点(其中 8 月数据缺失)。由图 2 可见,CWSI 表示干旱的变化与土壤相对湿度的变化较为吻合,土壤相对湿度大时,CWSI 值低;土壤相对湿度小时,CWSI 值高。对 20 cm 土壤相对湿度与 CWSI 数据做 Pearson 相关性分析,结果 CWSI 与 3 个站点均呈负相关,且都通过了 0.05 的相关系数显著性检验,说明 CWSI 可用于贵州省干旱监测。为了定量比较 CWSI 和土壤相对湿度表达的干旱严重程度,依据国家气象局采用农业干旱等级标准<sup>[26]</sup>,划分等级(表 1)。



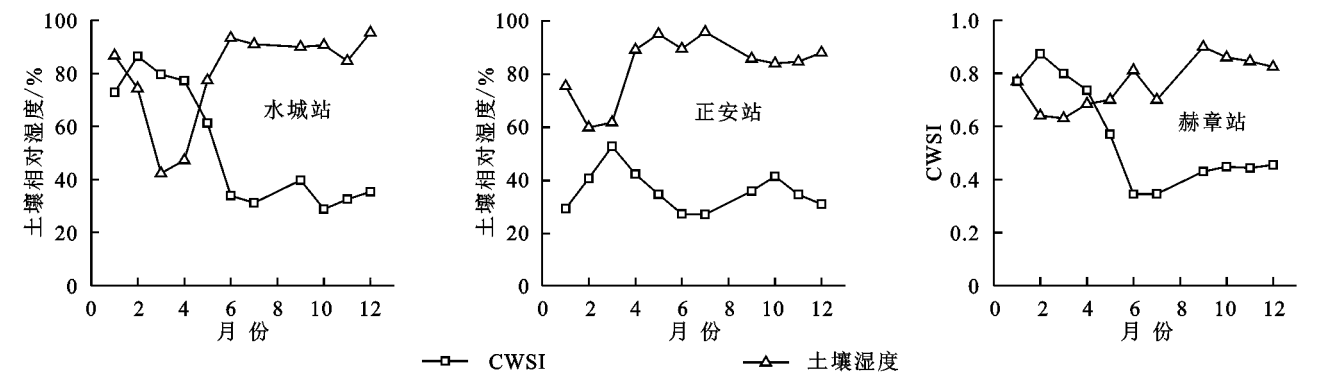


图 2 2010 年作物缺水指数与土壤相对湿度的对比

表 1 干旱等级划分			
等级	土壤相对湿度/%	作物缺水指数 CWSI	类型
1	>60	0~0.4	无旱
2	50~60	0.4~0.6	轻旱
3	40~50	0.6~0.7	中旱
4	30~40	0.7~0.8	重旱
5	<30	0.8~1.0	特旱

3.2 ET,PET 和 CWSI 时间变化特征

由图 3 可看出,研究期间贵州省 ET,PET 和 CWSI 年际波动不大,ET,PET 均呈增加趋势,CWSI

呈减少趋势,ET 的增长速率明显高于 PET,根据 CWSI 的计算公式可进一步验证 CWSI 呈减少趋势,表明研究期间贵州省旱情得到缓解。经统计,ET,PET 多年均值分别为 761.25 mm 和 1348.14 mm,CWSI 年均值为 0.43,整体处于轻旱等级。2000—2013 年处于轻旱等级,2014—2019 年处于无旱状态,2004 年,CWSI 值最高(0.51),是降水量偏低,实际蒸散量高而潜在蒸散作用较弱的原因,据以往研究,我国南方在 2004 年出现了 53 a 来最为严重的干旱灾害<sup>[27]</sup>;2014 年 CWSI 值最低(0.38),是因为 ET 相对较高,而 PET 相对较低。

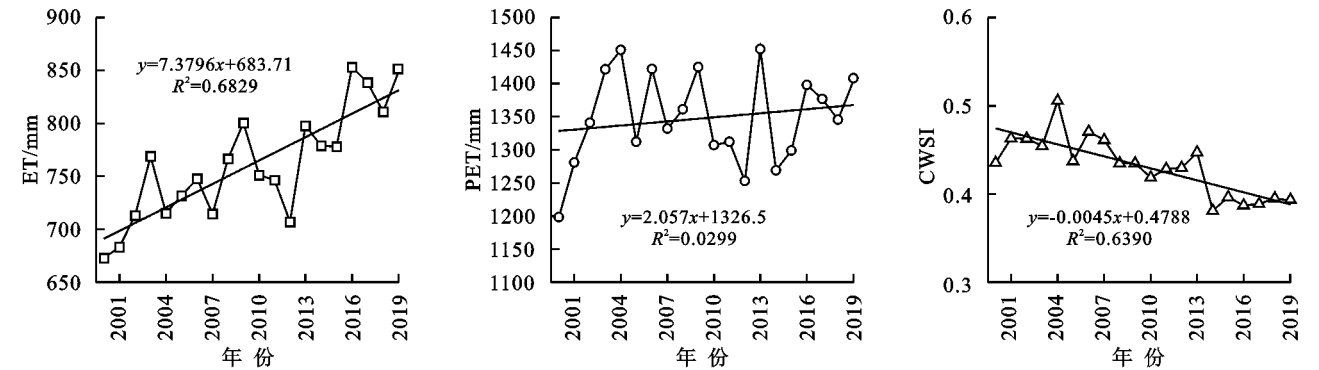


图 3 2000—2019 年贵州省 ET,PET 和 CWSI 年际变化

CWSI 年内变化具有明显的季节性,呈先增加后减弱的趋势(图 4)。2—5 月值较高,最大值在 4 月,为 0.53;6—9 月 CWSI 值较低,最小值在 6 月,为 0.33。干旱主要发生在春、秋和冬季,以轻旱为主。究其原因,贵州省主要粮食作物为水稻和玉米,水稻和玉米种植时间在 3 月、4 月份,春季气温回升,降水少,加上农作物的生长需要大量水分,因此在春季 CWSI 达到最大值,即最为干旱;夏季气温和降水都达到全年最大值,加之农作物也正值生长旺盛期,因此实际蒸散量达到最大值,CWSI 全年最低,即最为湿润;9 月、10 月份为水稻和玉米的收获季节,气温与降水也逐渐降低,实际蒸散量降低,CWSI 也逐渐升高,即干旱呈增加趋势。

3.3 ET,PET 和 CWSI 空间分布特征

由图 5 可以看出,研究期间贵州省 ET 均值呈东

南高、西北低的分布,而 PET 呈东北低、西南高的分布特征。20 a 间 ET 的变化趋势主要呈东西两侧减少南北部增加,其中黔东南州减小的速率最快,PET 的变化趋势主要为中部减少四周增加。CWSI 年均值分布受到 ET 和 PET 共同影响,在空间上呈东南低,西北高分布趋势(图 6)。结合图 5—6 发现,在 ET 高值 PET 低值地区,CWSI 值低,为湿润地区;ET 值低 PET 值高的地区,CWSI 值高,属于干旱地区。CWSI 多年均值为 0.43,处于轻旱等级,其中:处于无旱等级的面积占全省国土面积的 44%,主要分布在东部;轻旱地区面积占贵州省总面积的 55%,主要分布于西部;中旱面积占 1%,主要集中在西北部。贵州省干旱区主要分布在毕节市和六盘水,此地为贵州省平均海拔最高处,植被稀疏、气温低、气压高,降

水量相对较少,导致其实际蒸散量低,陆面和大气在下垫面水分不足时相互作用更剧烈而导致 PET 增大<sup>[15]</sup>,因此 CWSI 值更高;湿润区集中在黔东南州,当地有大面积植被覆盖,地势低气温高,降雨量较大,因此 ET 值偏高而 PET 较低。通过对贵州省各州市的 CWSI 值统计,由小到大依次为:黔东南州(0.36)<铜仁市(0.38)<遵义市(0.40)<贵阳市(0.42)<安顺市(0.46)<毕节市(0.51)<六盘水(0.55)。整体上黔东南

南州、铜仁市和黔东南州处于无旱状态,是由于这三地地势较低,植被覆盖度高降水多的原因。遵义市、贵阳市、安顺市、毕节市和六盘水处于轻旱状态,是因为地势相对较高,植被盖度低降水少。CWSI 趋势越小与  $p$  值越小的空间大体一致(图 6),说明其减小的变化趋势可信度高。CWSI 的波动状态可由 CV 值来衡量,贵州省 CWSI 的平均 CV 值为 0.1,大部分地区的 CV 值小于 0.1,表明研究期间贵州省干旱变异程度非常稳定。

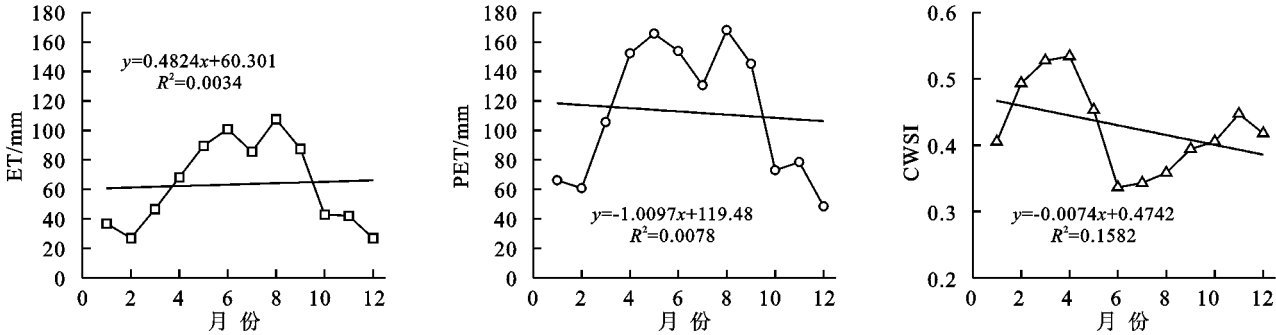


图 4 贵州省 ET,PET 和 CWSI 年内变化

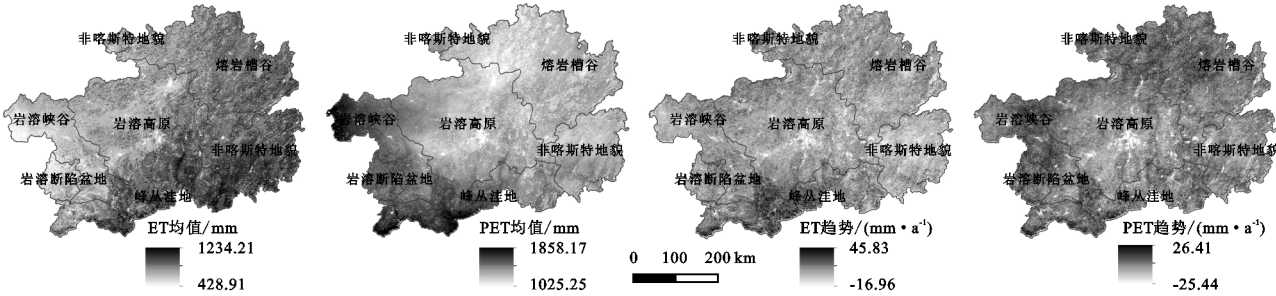


图 5 2000—2019 年贵州省 ET,PET 年均值及 ET,PET 变化趋势空间分布

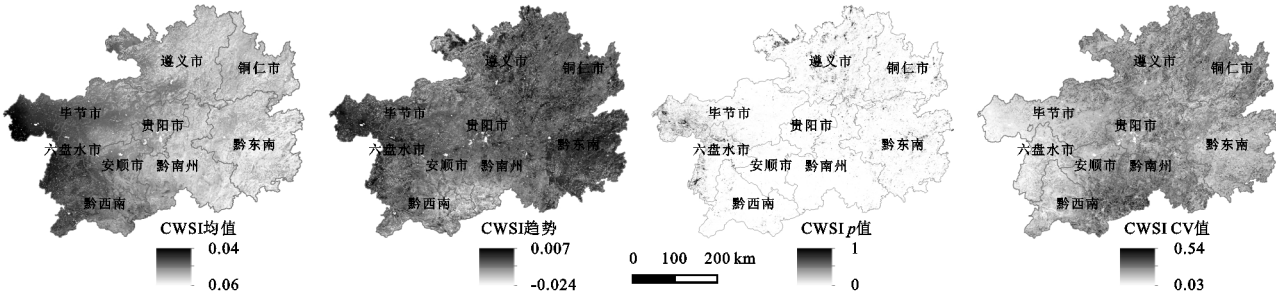


图 6 2000—2019 年 CWSI 年均值、变化趋势、趋势的显著性  $p$  值和 CV 值空间分布

3.4 不同地貌区的 CWSI 变化

贵州省喀斯特岩溶地貌广布,不同岩溶地貌类型区域的岩性、土壤和水分等因素直接影响当地植被的生长状况,CWSI 也在不同地貌区存在显著的差异性,因此,非常有必要对不同岩溶地貌对 CWSI 的影响作对比分析。与喀斯特地貌相比,非喀斯特地貌植被覆盖度较喀斯特地貌区高,因此非喀斯特地貌区 ET 值较喀斯特地貌值略高。在喀斯特地貌中,峰丛洼地的 ET 值最高,因为 ET 除了受到下垫环境面影响外,还与气候条件有关,峰丛洼地位于贵州省南部,较靠近赤道和海岸线,因此气温和降水较高。岩溶峡

谷位于西北地区,地势偏高、降水少、气温低、植被覆盖度低,因此 ET 值偏低。

通过对不同岩溶地貌多年 CWSI 均值统计结果显示(表 2),多年各岩溶地貌的 CWSI 均值差别较大,由小到大依次为:非喀斯特地貌(0.36)<岩溶槽谷(0.39)<岩溶高原(0.43)<峰丛洼地(0.44)<岩溶峡谷(0.55)<断陷盆地(0.57)。整体上除了非喀斯特地貌外,其他岩溶地貌均处于轻旱等级。结合 ET 与 PET 分布来看,非喀斯特地貌 ET 值大,PET 值偏小,因此 CWSI 值较小,即气候湿润;断陷盆地 ET 值偏低,而 PET 较高,因此 CWSI 值较高,即气候干燥。

与喀斯特地貌相比,非喀斯特地貌有更适合植被生长的下垫面条件,植被覆盖度高,保水能力强,且地势较低,气温高,实际蒸散量大,因此 CWSI 值较低,即较喀斯特地貌湿润。喀斯特地貌地区都伴随着不同程度的石漠化,不利于植被的生长,加上喀斯特岩溶地貌的地表和地下通常有溶洞,容易造成水分的流失,保水能力弱,且海拔较高,气温低,实际蒸散量小,因此易发生干旱。说明在相同地区,喀斯特地貌较非喀斯特地貌更易发生干旱。

通过 Mann-Kendall 检验计算每个像元的 Z 值,用来进一步分析不同地貌 CWSI 的动态变化。由图 7 可看出,贵州全省不同地貌 CWSI 动态变化基本分为显著性减少和不显著性减少两部分,进一步说明贵州省在 2000—2019 年,干旱呈现减缓的趋势。其不明显减少主要集中在西北部分地区,即干旱较严重地区。经统计,不同岩溶地貌的 Z 均值分别为:峰丛洼地(−3.43)<岩溶高原(−2.92)<非喀斯特地区(−2.69)<断陷盆地(−2.63)<岩溶槽谷(−2.49)<岩溶峡谷(−2.47)。峰丛洼地减少最为显著,说明其旱情的缓解趋势速率最快。

地貌类型区	ET	PET	NDVI	降水	气温	CWSI
岩溶高原区	740.93	1 305.06	0.79	1 108.77	14.58	0.43
岩溶槽谷区	776.06	1 268.4	0.81	1 109.75	14.97	0.39
非喀斯特区	833.88	1 310.7	0.83	1 265.49	15.74	0.36
峰丛洼地区	832.00	1 482.49	0.80	1 236.25	17.14	0.45
岩溶断陷区	638.23	1 489.50	0.79	1 164.77	13.91	0.57
岩溶峡谷区	600.05	1 491.78	0.78	1 032.81	13.50	0.55

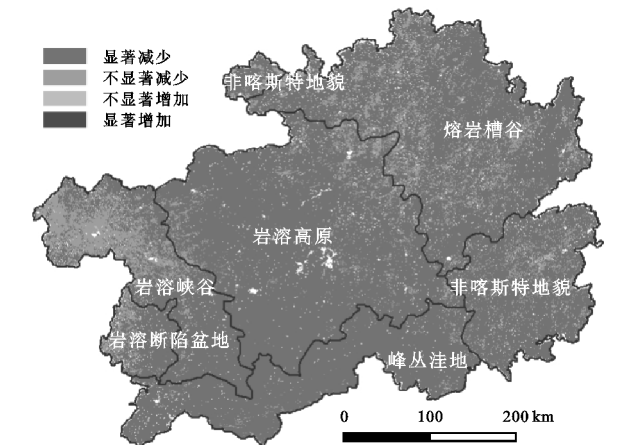


图 7 CWSI 年际变化趋势类型空间分布

3.5 不同植被类型 CWSI 变化

将土地利用类型经过合并和剔除不需要像元,重新分类为针叶林、阔叶林、混交林、灌丛、草地、耕地。经统计得到 2000—2019 年不同植被类型 ET,PET 和 CWSI 年均值(图 8)。多年 ET 均值排序为:混交

林(499.26 mm)<草地(644.41 mm)<耕地(681.75 mm)<阔叶林(717.05 mm)<灌丛(782.42 mm)<针叶林(795.35 mm)。混交林较之其他林地,林内的气温、地温变幅小,风速降低,导致 ET 较少<sup>[28]</sup>;针叶林叶面积小,单位面积光合作用都小于其他林地,ET 值理应较小,但也正是叶面积小,冠层对光照的阻挡减小,相同光照条件下地表收到的热量更多,因此 ET 值更大;灌丛地表枯落物层较薄,土壤水蒸发迅速<sup>[28]</sup>,因此 ET 值要高于阔叶林;草地由于其地表覆盖,减少了土壤水分的蒸发,因此 ET 值低于阔叶林地。不同植被类型 CWSI 多年均值由小到大依次排序为:针叶林(0.38)<灌丛(0.41)<阔叶林(0.42)<耕地(0.46)<草地(0.48)<混交林(0.61)。CWSI 排序与 ET 保持一致,说明实际蒸散量对不同植被类型的干旱影响较大。

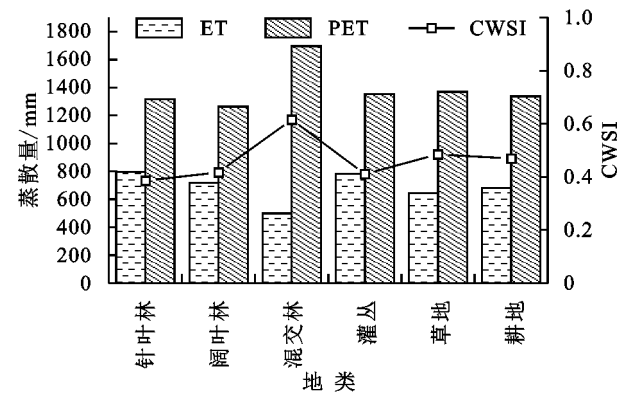


图 8 不同植被类型多年 ET,PET,CWSI 均值

再结合变异系数 CV 值来分析不同植被 CWSI 年际变化的稳定性,经统计得出:混交林(0.03)<草地=耕地(0.06)<阔叶林(0.08)<针叶林(0.09)<灌丛(0.1)。干旱的发生主要与气象因子相关,不同植被类型 CWSI 值的波动差异与其对气象因子的敏感性响应有关。灌丛与针叶林的 CV 值较高,表明灌丛与针叶林对气象因子的敏感性高,即抗旱能力越强。

3.6 CWSI 变化的影响因素分析

综上新研究得出 ET 是影响 CWSI 的主要因素,影响 ET 的因素主要又为植被、降水和气温,由于植被的长势是受降水和气温共同影响的结果,因此本文着重分析降水和气温对贵州省 CWSI 的影响。为了更好的分析降水和气温对 CWSI 的影响,利用气象站点收集的降水和气温数据,先采用在复杂地形条件下效果较好的薄盘光滑样条函数(Anusplin)插值法对气象数据进行空间插值,然后逐像元计算 2000—2019 年 CWSI 与降水和气温的相关系数。由图可以看出降水与 CWSI 呈负相关,在降水量大的东南地区,



CWSI 值较小,在降水小的西北地区,CWSI 值较大。统计得出,降水与 CWSI 呈负相关关系,呈负相关关系的面积占总面积的 95%,表明降水量越大,CWSI 值越小,呈正相关关系区域主要集中在黔西南,这主要是因为干旱是受综合因素影响的,除了降水还受到气温、植被、地形、人类活动等因素影响。CWSI 与气温正负关系并存,但主要为负相关,负相关面积占总

面积的 54%,主要集中在黔东南州和安顺市,究其原因,在原本湿润区气温升高,会促进 ET 的增长,从而使得 CWSI 值变小。呈正相关的地区主要分布在降水较少、植被指数较低的西部、中部和北部地区。综合分析得出,在贵州 CWSI 受降水的影响较大,降水多的东南方地区,CWSI 值低;在降水少的西北地区,CWSI 值较高(图 9)。

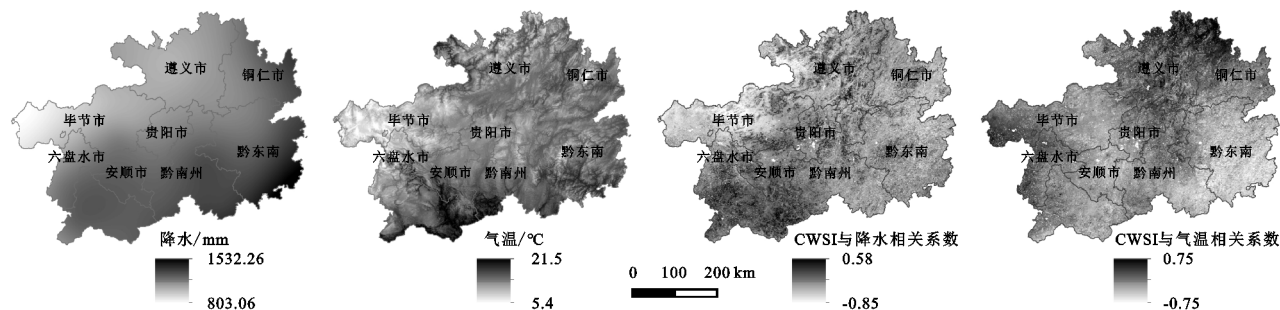


图9 2000—2019年贵州省降水、气温均值及其与CWSI相关系数空间分布

## 4 讨论与结论

干旱指数众多,不同指数的计算方法、所需数据和适用区域各有不一。在已有研究中,MOD16 数据集在实际蒸散量估算和干湿模式监测等领域已经取得了显著性成效<sup>[29-31]</sup>,因此本文采用 MOD16 数据集进行 CWSI 估算,并对计算结果进行了适用性验证,从而减少了结果的不确定性。从时空分布和变化趋势上较基于站点数据计算的干旱指数更为精准。

本文基于 CWSI 分析了贵州省 2000—2019 年干旱的时空特征,且分析了气候和下垫面环境对其干旱的影响情况,为贵州省的干旱研究提供了更多参考。但影响干旱的主要因素除气候、下垫面条件外,人类活动的影响也不容忽视,未来需要进一步研究人类活动对贵州省的干旱影响和各影响因子对干旱影响的贡献率等。

本研究基于作物缺水指数(CWSI)、气温和降水等数据,采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验相结合、变异系数和相关性分析法,对贵州省 2000—2019 年作物缺水指数的时空分布特征及影响因素分析,得出以下结论:

(1) 研究期间贵州省 CWSI 年均值分布受到 ET 和 PET 共同影响,在空间上呈东南低,西北高的分布特征;多年均值为 0.43,整体上处于轻旱等级;整体呈减小趋势,表明贵州省旱情得到缓解。各州市 CWSI 多年均值排序为:黔东南州(0.36) < 铜仁市、黔南州(0.38) < 遵义市(0.40) < 贵阳市(0.42) < 安顺市(0.46) < 毕节市(0.51) < 六盘水(0.55)。

(2) CWSI 年内变化具有明显的季节性,整体上呈先增加后减弱的趋势;最大值在 4 月,为 0.53;最小值在 6 月,为 0.33。除夏季外,其他季节均处于轻旱等级。

(3) 多年 CWSI 均值在不同地貌的分布为:非喀斯特地貌(0.36) < 岩溶槽谷(0.39) < 岩溶高原(0.43) < 峰丛洼地(0.44) < 岩溶峡谷(0.55) < 断陷盆地(0.57),说明在贵州省,喀斯特岩溶地貌对干旱的影响较大;在不同植被类型的排序为:针叶林(0.38) < 灌丛(0.41) < 阔叶林(0.42) < 耕地(0.46) < 草地(0.48) < 混交林(0.61),其中针叶林与灌丛的 CV 值较其他林地高,说明其对气候因子的敏感性高,抗旱能力强。

(4) 在贵州省,CWSI 与降水、气温均呈负相关关系,面积占比分别为 95%和 54%,说明降水对贵州省干旱的影响较大。

### 参考文献:

- [1] Ji L, Peters A J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,87(1):85-98.
- [2] Van Loon A F, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2015,526:3-14.
- [3] 黄梦杰,贺新光,卢希安,等.长江流域的非平稳 SPI 干旱时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1597-1611.
- [4] 何慧娟,卓静,李红梅,等.基于 MOD16 产品的陕西关中地区干旱时空分布特征[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):236-241.

- [5] West H, Quinn N, Horswell M. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111291, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111291>.
- [6] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6264-6277.
- [7] 申广荣, 田国良. 作物缺水指数监测旱情方法研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 123-128.
- [8] 王玉娟, 王树东, 曾红娟, 等. 基于作物缺水指数法的渭河流域干旱特征[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 118-124.
- [9] 王小平, 郭锐. 遥感监测干旱的方法及研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21(4): 76-81.
- [10] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [11] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [12] 温媛媛, 赵军, 王炎强, 等. 基于 MOD16 的山西省地表蒸散发时空变化特征分析[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 255-264.
- [13] 汪左, 王芳, 张运. 基于 CWSI 的安徽省干旱时空特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 853-866.
- [14] 曾晓燕, 许顺国, 牟瑞芳. 岩溶生态脆弱性的成因[J]. *地质灾害与环境*, 2006, 17(1): 5-8.
- [15] 陈国富. 岩溶石山区地表蒸散发及水文过程定量研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [16] 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. *大气科学*, 2012, 36(3): 443-457.
- [17] 冯禹, 崔宁博, 徐燕梅, 等. 贵州省干旱时空分布特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 82-86.
- [18] 陈学凯, 徐建新, 雷宏军, 等. 贵州省干旱时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(8): 72-81.
- [19] 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.
- [20] 王盈盈, 王志良, 张泽中, 等. 基于 SPEI 的贵州省分区干旱时空演变特征[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 119-128.
- [21] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. *山地学报*, 2013, 31(1): 18-24.
- [22] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index[J]. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [23] 刘海, 黄跃飞, 郑粮, 等. 长时序丹江口水源区 NDVI 数据集构建及其时空动态变化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1780-1789.
- [24] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [25] 张强, 邹旭凯, 肖风劲, 等. GB/T20481-2006. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 王纯枝, 毛留喜, 吕厚荃, 等. 基于作物缺水指数的区域旱情遥感监测[A]. 中国气象学会, 中国气象学会 2007 年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集[C]. 中国气象学会: 中国气象学会, 2007: 10.
- [27] 牛宁, 李建平. 2004 年中国长江以南地区严重秋旱特征及其同期大气环流异常[J]. *大气科学*, 2007(2): 254-264.
- [28] 张继, 周旭, 蒋啸, 等. 贵州高原不同地貌区和植被类型水分利用效率的时空分异特征[J]. *山地学报*, 2019, 37(2): 173-185.
- [29] Liaqat U W, Choi M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 155(1): 93-104.
- [30] Zhang T, Peng J, Liang W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 105-122.
- [31] Zolotokrylin A N, Titkova T B, Brito-Castillo L. Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from, 2000—2015[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 134: 21-32.