doi: 10.6046/zrzyyg.2021191
引用格式: 覃纹,黄秋燕,覃志豪,等. 广西糖料蔗种植区干旱遥感时空分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(2):261 - 270. (Qin W, Huang Q Y, Qin Z H, et al. Spatiotemporal analysis of drought in sugarcane planting areas of Guangxi by remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2):261 - 270.)

广西糖料蔗种植区干旱遥感时空分析

覃 纹[1,2], 黄秋燕[1,3], 覃志豪[4], 刘剑洪[1], 韦高杨[1]
(1. 南宁师范大学地理科学与规划学院,南宁 530001; 2. 广西壮族自治区环境保护科学研究院,南宁 530022; 3. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用重点实验室,南宁 530001; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要: 广西是我国最重要的糖料蔗产区,开展蔗区干旱遥感监测具有重要的现实意义。本研究利用 MODIS 遥感数据产品 MOD16/MYD16 计算 2002—2018 年间广西糖料蔗种植区干旱严重程度指数(drought severity index, DSI)空间分布,分析揭示广西糖料蔗种植区不同干旱等级时空演变特征,然后利用一元线性回归、Mann - Kendall 趋势检验和 Hurst 指数等 3 种方法分析广西糖料蔗种植区干旱变化趋势。结果表明,2002—2018 年间广西糖料蔗种植区干旱主要集中在桂中蔗区、桂东南蔗区、桂西南蔗区及桂西北蔗区; DSI 年均值为 - 0.59,最大值出现在 2010 年和 2002 年,最小值出现在 2016 年; 2002—2018 年间广西糖料蔗种植区 DSI 总体上显现微弱下降趋势,年降速为 0.07%; 从干旱空间重心来看,不同生育期的干旱面积重心呈现出由中部向西北方向扩张趋势,重心迁移轨迹为桂中蔗区 > 桂西南蔗区 > 桂西北蔗区; 从各年度来看,广西糖料蔗种植区 DSI 年际波动明显,存在显著上升和下降的突变年份,表明干旱在各年度之间显现出易变性。在未来气候变化背景下,广西蔗区干旱变化趋于严峻。因此,加强蔗区抗旱减灾防御,仍然是减轻重大干旱对糖料蔗生产影响的重要措施。

关键词: DSI; 重心迁移; 干旱时空演变; 甘蔗
中图法分类号: TP 701　**文献标志码:** A　**文章编号:** 2097 - 034X(2022)02 - 0261 - 10

0 引言

糖料蔗是生产食糖的主要原料,也是广西壮族自治区经济支柱及贫困地区蔗农主要收入来源。广西是中国最大的糖料蔗生产大省,广西糖料蔗种植面积、蔗糖产量已连续 26 个榨季居全国第一位,种植面积和产糖量均占全国的 60% 左右[1],为增加财政收入、促进农民增收、确保国家食糖供应及食糖安全起到了重要作用。但是,与先进的蔗糖生产国相比,单产低、宿根年限短等不足成为影响广西糖料蔗生产发展的瓶颈问题[2]。其中,干旱对糖料蔗产量的制约是导致糖料蔗单产低的重要原因之一[3]。有研究表明,糖料蔗生长关键期遭遇干旱,将导致糖料蔗减产 18% 以上[4],极端干旱甚至绝收。2009—2010 年广西糖料蔗主产区崇左市遭遇特大干旱,2009 年该区糖料蔗平均单产比前 5 a 峰值的 2007 年偏少 8.33%[3]。干旱的发生主要受自然因素及人类活动等多重因素的影响[5]。近年来,随着全球气候变暖加速,干旱的频次、强度以及影响程度也呈上升趋势[6-7],人类活动强度的加剧,干旱的程度和分布格局可能发生变化[8]。因此,掌握广西糖料蔗主产区干旱时空演变特征及演化规律,对于科学制定干旱缓解措施至关重要。

糖料蔗干旱本质上是土壤水分匮乏,不能满足糖料蔗对水分的要求,遭遇严重干旱往往会造成大面积的减产。糖料蔗干旱成因比较复杂,与基因品种、土壤水分、大气环流、灌溉条件及地形地貌及栽培管理等均有关系。因此,开展糖料蔗干旱监测方法研究,及时掌握糖料蔗的生产状况,已成为糖料蔗

收稿日期: 2021 - 06 - 18; **修订日期:** 2021 - 10 - 19
基金项目: 国家重点研发计划项目"全球农业干旱监测研究"(编号: 2019YFE0127600)、国家自然科学基金地区项目"广西甘蔗干旱灾变机理与遥感监测预警方法研究"(编号: 41661090)、广西研究生教育创新计划资助项目"新一代静止气象卫星与极轨卫星耦合的甘蔗蒸散发日尺度转换模型研究"(编号: YCSW2020192)和广西重点研发计划项目"广西甘蔗秸秆焚烧对大气环境质量影响及肥料化利用研究与示范"(编号: 桂科 AB20238014)共同资助。
第一作者: 覃 纹(1996 -),女,硕士研究生,主要从事资源环境遥感方面的研究。Email: qinw0717@foxmail.com。
通信作者: 黄秋燕(1973 -),女,教授,主要从事甘蔗遥感监测、资源环境遥感和农业灾害遥感等方面的研究。Email: hqy@nnnu.edu.cn。

田间管理的重要内容。目前相关部门主要采用气象干旱监测方法,开展了糖料蔗干旱监测业务化作业[9-10],并出台了气象行业标准《糖料蔗干旱灾害等级》(GB/T 34809—2017)作为糖料蔗气象干旱定量化评价依据[11]。此外,有学者[11-12]采用气象数据提取气象干旱指数如标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)[13]进行糖料蔗干旱监测,也有一些学者采用水分亏缺指数[14]或土壤水分相对湿度[15]开展糖料蔗干旱监测研究,但这些研究主要是采用气象观测数据或陆面数据同化系统 CLDAS 数据为主,受气象站点空间分布不均的影响较大,很难对大面积蔗区旱情作出快速准确的评价。

遥感干旱监测方法具有客观、及时、覆盖范围广、数据连续等特点,已成为农业干旱监测中最具有前景的技术手段[16]。匡昭敏等[17]采用植被温度旱情指数监测 2004 年和 2005 年的秋季糖料蔗旱情监测,其指标分级的合理性及模型的适用性都还需通过更长时间的检验。另外,植被温度旱情指数只适用于植被全覆盖地表[18],不适用于裸土和植被的混合地表,因而该指数是否适用糖料蔗苗期或分蘖期旱情监测尚待检验。蒸散发(evapotranspiration, ET)与潜在蒸散发(potential evapotranspiration, PET)的比值(ET/PET)在一定程度上能反映农作物的水分胁迫信息[19],基于 ET/PET 与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)构建的干旱严重程度指数(drought severity index, DSI)[20]可有效监测农业干旱状况[21],已被应用于新疆[22]、山东[23]及西南地区[24]的区域干旱事件研究,以及我国北方冬小麦干旱监测[25]。但利用长时间序列 DSI 干旱指数分析广西蔗区干旱时空演变特征,揭示糖料蔗各生育期受旱胁迫演变规律的研究,还鲜见文献报道。

本研究利用 2002—2018 年间 MOD16A2 和 MOD09A1 数据集,计算 DSI,获取了年尺度的 500 m 空间分辨率广西糖料蔗干旱时空分布,并分析糖料蔗种植区各生育期干旱特征,明确广西糖料蔗生育期干旱时间演化趋势,以期为广西糖料蔗防旱减灾工作提供参考。

1 数据来源

本文选取覆盖广西 6 个糖料蔗主产区(图 1)的 MOD16A2, MYD16A2 及 MOD09A1, MYD09A1 作为基础数据源,计算 DSI 指数。数据可在美国国家航空航天局官网(https://www.nasa.gov/)免费下载,数据时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500 m,时间跨度为 2002—2018 年。研究中采用最大合成法对下载的数据源进行同一天最大合成,以降低云污染像元的影响。

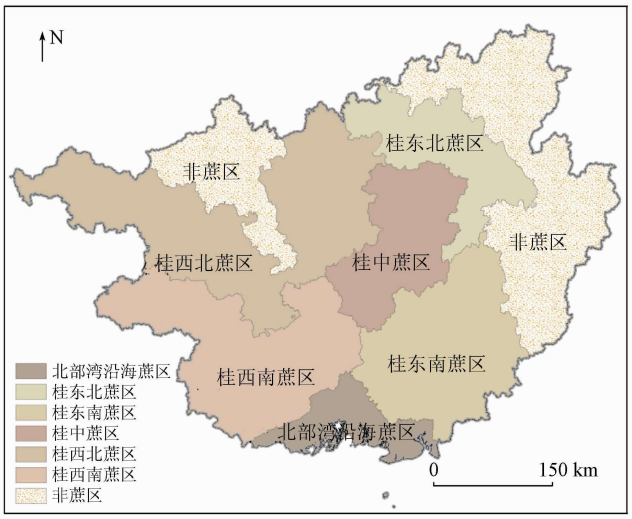


图 1 广西糖料蔗种植区分布

Fig. 1 Distribution of sugarcane in Guangxi

糖料蔗生育期数据以当地糖料蔗物候确定。广西糖料蔗一般于 3 月开始播种,5 月进入分蘖期,6—10 月为茎伸长期,11 月进入成熟期[26]。研究中分别选用第 57—113 天、121—145 天、153—297 天以及 305—361 天数据作为糖料蔗 4 个生育期的研究数据。

2 研究方法

2.1 DSI 干旱等级

DSI 干旱指数采用 NDVI 和 ET/PET 蒸散比指数计算,NDVI 主要反映红光波段、近红外波段反射率与土壤背景之间的差异,可定量说明作物的生长状况[27],而 ET 和 PET 是地表水热平衡的重要成分,可反映作物水分胁迫状况[28]。因此,DSI 能够综合地反馈作物受旱胁迫信息,其取值范围在负无穷到正无穷之间,具体计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \tag{1}$$

$$Z_{\mathrm{ET/PET}} = \frac{R_{\mathrm{ET/PET}} - \overline{R}_{\mathrm{ET/PET}}}{\sigma_{\mathrm{ET/PET}}}, \tag{2}$$

$$Z_{\mathrm{NDVI}} = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma_{\mathrm{NDVI}}}, \tag{3}$$

$$Z = Z_{\mathrm{ET/PET}} + Z_{\mathrm{NDVI}}, \tag{4}$$

$$DSI = \frac{Z - \overline{Z}}{\sigma_{Z}}, \tag{5}$$

式中: Red 和 NIR 分别为红光和近红外波段反射率; $Z_{ET/PET}$ 为将 MOD16A2 数据 ET 和 PET 的比值进行标准化后的数值; $\overline{R}_{ET/PET}$ 和 $\sigma_{ET/PET}$ 分别为 ET/PET 的平均值和方差; Z_{NDVI} 为 MOD09A1 数据计算的 NDVI 标准化后得到的数值; $\overline{NDVI}$ 和 σ_{NDVI} 分别为 NDVI 的平均值和方差; $\overline{Z}$和 σ_Z 分别为 Z 的平均值和方差。为避免引入误差,本文采用的 DSI 分析数据皆剔除非蔗区及非干旱数值的影响。

根据文献[25],划定干旱 DSI 指数等级标准(表 1)。可见,DSI 越小,干旱程度越强; DSI 越大,干旱程度越弱[23]。

表 1　DSI 干旱等级标准

Tab. 1　DSI drought grade standard

数值	等级	数值	等级
≤ -1.50	极度干旱	(0.30,0.60]	初始湿润
(-1.50, -1.20]	重度干旱	(0.60,0.90]	轻度湿润
(-1.20, -0.90]	中度干旱	(0.90,1.20]	中度湿润
(-0.90, -0.60]	轻度干旱	(1.20,1.50)	重度湿润
(-0.60, -0.30]	初始干旱	≥1.50	极度湿润
(-0.30,0.30]	正常		

2.2　干旱面积重心模型

重心又称加权平均中心,通过重心的移动可以直观反映区域内某些属性的变化轨迹及其空间差异性[29]。其计算公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i}, \tag{6}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i}, \tag{7}$$

式中: X 和 Y 分别为重心坐标; n 为 i 变量的总数; M_i 为空间变量 i 处的权重; X_i 和 Y_i 分别为 i 变量的坐标。

加权标准差椭圆能够有效识别各类地理要素的空间分布特征[30]。其原理可简述为计算重心迁移[31],具体表达式为:

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{X}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{Y}_i^2\right) + \sqrt{4\sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{X}_i^2 \tilde{Y}_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{X}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{Y}_i^2\right)^2}}{2\sum_{i=1}^{n} M_i^2 \tilde{X}_i \tilde{Y}_i}, \tag{8}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i \tilde{X}_i \cos\theta - M_i \tilde{Y}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n} M_i^2}}, \tag{9}$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i \tilde{X}_i \sin\theta - M_i \tilde{Y}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n} M_i^2}}, \tag{10}$$

式中: θ 为椭圆的方位角,即正北方向通过顺时针方向旋转至椭圆长轴所形成的夹角; $\tilde{X}_i$ 和 $\tilde{Y}_i$ 分别为 i 变量区位到重心坐标的坐标偏差; σ_X 和 σ_Y 分别为沿 X 轴和 Y 轴的标准差。

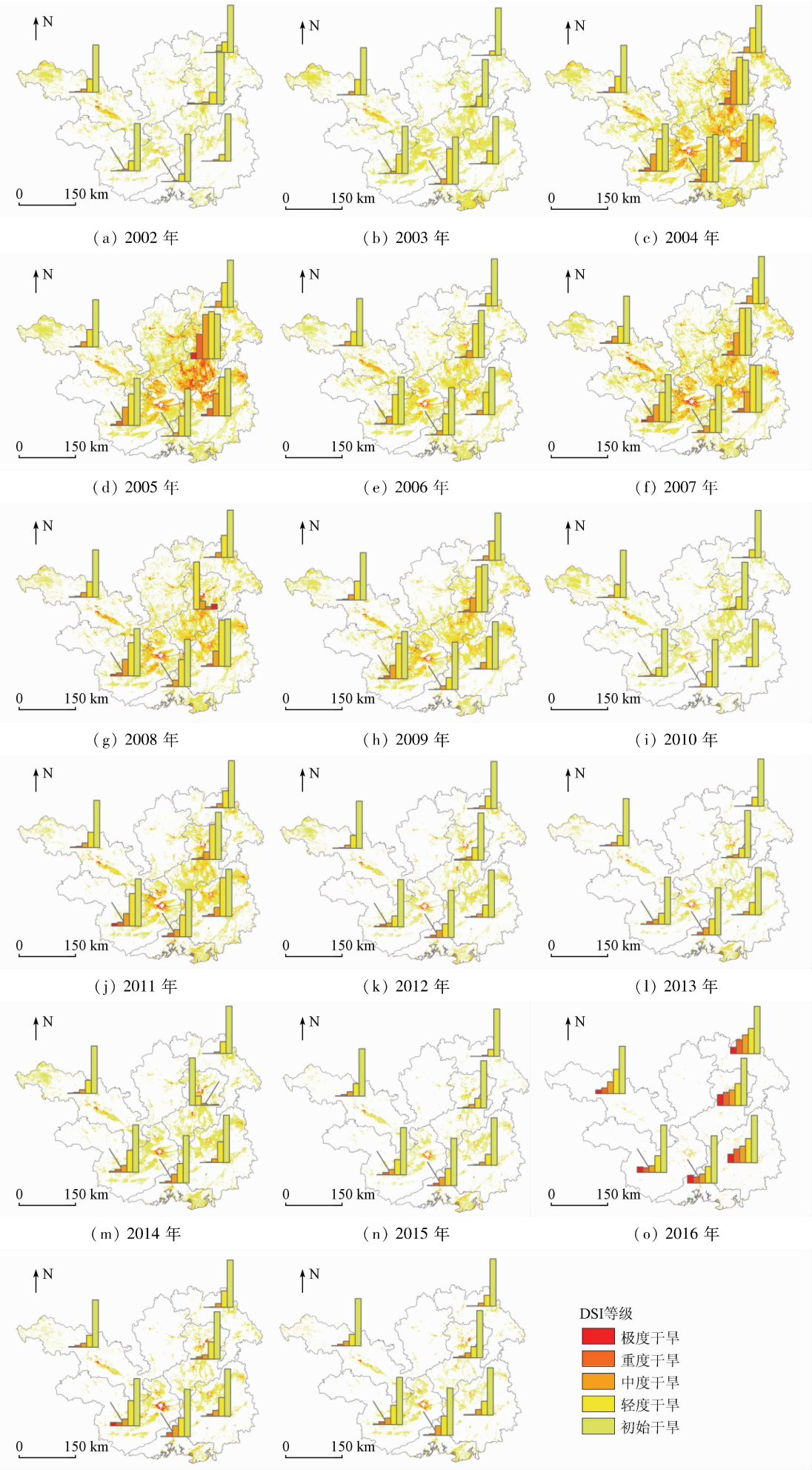
2.3　干旱变化趋势分析

同比增长率、一元线性回归法和 Mann - Kendall 趋势检验法[32]可分析 DSI 指数干旱长时序变化趋势。Mann - Kendall 趋势检验法中, $UF > 0$ 表示干旱长时序变化为上升趋势, $UF < 0$ 则表示干旱长时序变化为下降趋势; 当 UF 超过临界线(±1.96,给定显著水平 $a = 0.05$)时,表明上升或下降的趋势显著; UF 曲线和 UB 曲线出现交点,且交点在临界线之间,则交点对应的时刻便是干旱发生突变开始的时间[33]。变异系数 C_v 可以对 DSI 指数进行干旱长时序稳定性评价[34]。Hurst 指数法可以定量描述 DSI 指数干旱长时序的未来变化趋势[35],当 $0 < H < 0.5$ 时,则干旱的未来时序变化趋势与过去的变化趋势相反; 当 $0.5 < H < 1$ 时,表明干旱未来时序变化与过去的变化趋势一致,即二者存在正相关关系; 当 $H = 0.5$ 时,表明干旱在未来时序上不存在趋势性[36]。

3　结果与分析

3.1　广西蔗区干旱事件的时空分布特征

图 2 为 2002—2018 年广西蔗区 DSI 指数空间分布情况及不同干旱等级面积比重柱状图。可以看出,时序上,随着年份的累积,广西各蔗区干旱呈现出逐渐加重,再逐渐减弱的趋势。空间上,近 17 a 间广西蔗区干旱集中分布于桂中蔗区、桂东南蔗区、桂西南蔗区及桂西北蔗区; 其中,极度干旱、重度干旱及中度干旱主要发生在桂中蔗区、桂西南蔗区东北角及桂东南蔗区西北角,而轻度干旱分布范围最广,各蔗区均有分布; 相比之下,北部湾沿海蔗区及桂东北蔗区干旱等级及干旱范围相对较低。总体上,中度及以上干旱相对集中于广西中部区域,但不同蔗区不同年份干旱面积及干旱程度差别较明显; 其中,2004—2005 年、2007—2009 年及 2011 年干旱



(a) 2002 年　(b) 2003 年　(c) 2004 年
(d) 2005 年　(e) 2006 年　(f) 2007 年
(g) 2008 年　(h) 2009 年　(i) 2010 年
(j) 2011 年　(k) 2012 年　(l) 2013 年
(m) 2014 年　(n) 2015 年　(o) 2016 年
(p) 2017 年　(q) 2018 年

图 2　蔗区 DSI 干旱时空分布

Fig. 2　Spatio – temporal distribution of DSI drought in sugarcane planting area

面积分布最广,与文献[12]和[14]记载的 2004—2005 年、2006 年、2009—2011 年广西的干旱范围大致相吻合。建议未来加强中度干旱等级蔗区的防旱措施,必要时可通过人工灌溉缓解干旱。

图 3 为 DSI 年均值增长率及线性趋势。2002—2018 年蔗区 DSI 年均值为 –0.59,最大值出现在 2010 年和 2002 年,最小值出现在 2016 年,一元线性下降趋势不明显,年降速为 0.07%。DSI 指数同比增长率年降速为 31%,2004 年、2011 年和 2016 年 DSI 同比增长率超 25%,但 2006 年、2010 年和 2017 年相比前一年同比增长率低于 –15%。

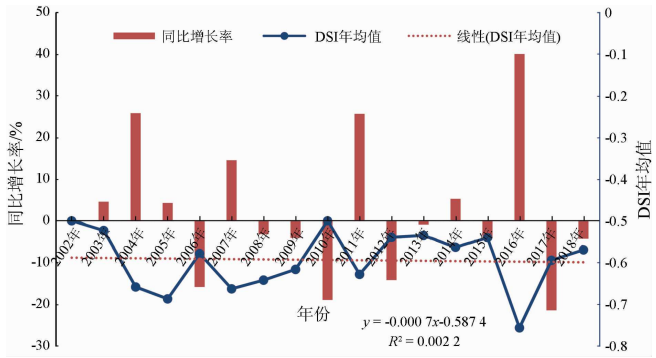


图 3　DSI 年均值增长率及线性趋势

Fig. 3　DSI annual average growth rate and linear trend

3.2　糖料蔗全生育期的干旱特征分析

3.2.1　糖料蔗干旱面积重心迁移规律

2002—2018 年广西蔗区糖料蔗全生育干旱面积集中分布于桂中蔗区、桂西南蔗区及桂西北蔗区,如图 4 所示,各年度的标准差椭圆大体上以圆形为主,局部年份标准差椭圆延长轴向两端扩散,并且向西北方向移动,表明蔗区干旱的空间分布仍是集中分布为主。其中,苗期干旱面积重心向西北方向扩张,重心迁移轨迹多集中于桂中和桂西南蔗区,特旱年份 2009 年和 2010 年糖料蔗干旱面积分别向西北和北部扩张,重心分布于桂西南蔗区及桂中蔗区,其分布频率依次为 41% 和 53%。分蘖期干旱面积呈现出向西北方向蔓延,重心迁移轨迹较为分散,主要分布于桂西南蔗区和桂西北蔗区,其分布频率依次为 35% 和 53%。伸长期干旱面积重心向东部和东北方向扩张,重心迁移轨迹多集中于桂中蔗区其分布频率为 76%,2002 年、2010 年和 2016 年干旱面积重心分布于桂西北蔗区。蔗区成熟期干旱面积集中于桂中蔗区、桂西南蔗区、桂东南蔗区及桂西部蔗区中部,重心迁移轨迹集中于桂中蔗区,其分布频率为 59%。

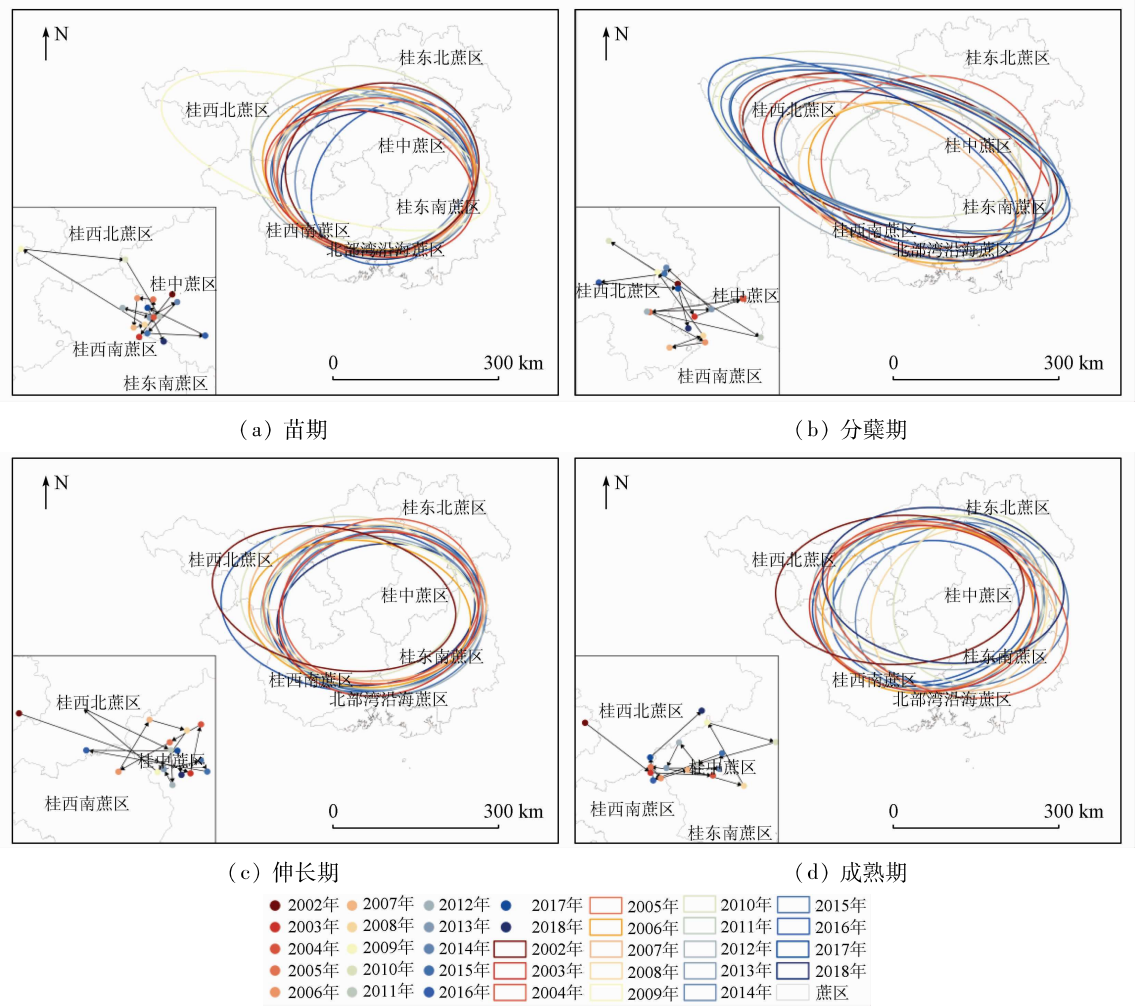
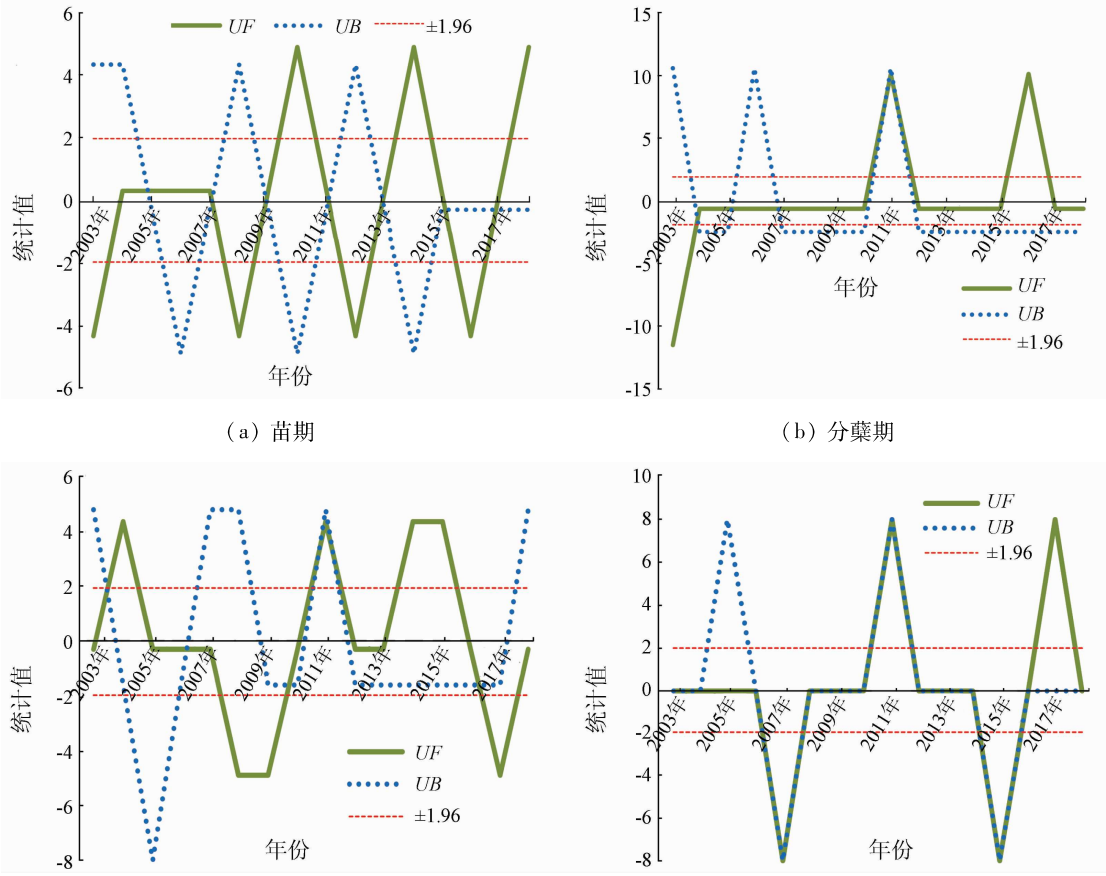


图 4　2002—2018 年糖料蔗干旱面积标准差椭圆及重心迁移

Fig. 4　Standard deviation ellipse and center of gravity shift of sugarcane drought area during 2002—2018

3.2.2　糖料蔗干旱变化趋势分析

突变是指突变检测因子从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)的过程[32]。图 5 为糖料蔗 4 个生育期 DSI 指数年均值 Mann - Kendall 突变分析结果。从图 5 中可以看出,苗期存在 7 个干旱突变点,其中 2009 年、2013 年和 2017 年突变点的上升趋势显著,2007 年、2011 年和 2015 年突变点的下降趋势显著,均超过 0.05 显著性检验边界线。分蘖期存在 3 个干旱突变点。伸长期存在 4 个干旱突变点,其中 2016 年为显著下降突变点,2003 年和 2010 年为显著上升突变点。成熟期的干旱突变时间点最多,包括 2003 年、2004 年、2006 年(下降)、2008 年、2009 年、2010 年(上升)、2012 年、2013 年、2014 年(下降)、2016 年(上升)和 2018 年共 11 个突变点。由此可见,2002—2018 年近 17 a 间糖料蔗 4 个生育期的 DSI 均值均存在显著上升或下降突变,表明蔗区 4 个生育期的 DSI 指数随年份的递增呈现出波动的变化趋势。



(a) 苗期　　(b) 分蘖期

(c) 伸长期　　(d) 成熟期

图 5　糖料蔗生育期 DSI 均值突变特征

Fig. 5　Mutation characteristics of the mean DSI during the growth period of sugarcane

表 2 为 Hurst 指数和变异系数 C_v 对 DSI 指数的未来变化趋势进行预测的结果。表 2 表明,17 a 间糖料蔗年际及 4 个生育期 DSI 的 H 及 C_v 均大于 0,表明干旱事件时间序列前后具有持续性;H 均介于(0,0.5)之间,且较接近于 0,表明蔗区年际及 4 个生育期未来干旱的变化趋势与过去干旱的变化趋势显著相反,即未来广西蔗区年际及 4 个生育期会呈现出干旱程度较重且面积扩增的变化趋势。文献[37]也表示,全球气候的变暖将在未来加速全球干旱或半干旱地区干旱的增长。因此,建议建立糖料蔗 4 个生育期干旱预警方案,防御干旱胁迫影响糖料蔗的产量与品质。

表 2　DSI 干旱未来趋势

Tab. 2　DSI drought future trend

指标	年际	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期
H	0.002 8	0.004 3	0.005 3	0.000 4	0.002 9
C_v	0.032 4	0.040 1	0.043 3	0.003 3	0.058 7

4　结论与讨论

1)本文利用 2002—2018 年 MODIS 的 500 m × 500 m 分辨率 NDVI 和 ET/PET 数据集,计算年尺度的广西蔗区 DSI 指数。研究表明,DSI 指数综合了

长时间序列作物长势信息及水分胁迫信息,能较好反映糖料蔗干旱的空间差异及时间演变特征。DSI 指数可有效监测广西蔗区及糖料蔗 4 个生育期的干旱状况,干旱监测结果与实际一致,DSI 指数可应用于糖料蔗旱情监测。

2)空间上,近 17 a 间广西蔗区干旱集中分布于桂中蔗区、桂东南蔗区、桂西南蔗区及桂西北蔗区。其中,极度干旱、重度干旱及中度干旱主要发生在桂中蔗区、桂西南蔗区及桂东南蔗区。但各蔗区各年份干旱面积及干旱程度差别较明显。时间上,2002—2018 年蔗区 DSI 年均值为 -0.59,最大值出现在 2010 年和 2002 年,最小值出现在 2016 年,一元线性下降趋势不明显,年降速为 0.07%。

3)加权标准差椭圆模型结果显示,不同生育期的糖料蔗干旱面积重心呈现出由中部向西北方向扩张趋势,重心迁移轨迹为桂中蔗区 > 桂西南蔗区 > 桂西北蔗区。

4)糖料蔗全生育期 DSI 年均值 Mann - Kendall 突变分析结果表明,蔗区 4 个生育期均存在显著上升或下降的突变时间节点,干旱指标随年份增长呈现出复杂的波动变化; 年际及 4 个生育期的 DSI 指数长时间序列前后具有持续性,H 在(0,0.5)之间,预示未来干旱的变化趋势与过去干旱的变化趋势显著相反。

5)随着全球气候变暖、人类活动加剧及 ENSO 等恶劣天气的影响,广西蔗区的干旱形势将会愈加严峻。建议根据蔗区自然条件,建设糖料蔗不同生育期的干旱预警方案,防御干旱胁迫影响糖料蔗的产量与品质。如苗期时可通过加盖地膜或架设微喷灌等节约能源的方式防旱,分蘖期及伸长期时引水管灌溉,成熟期时及时收割。

ET/PET 的计算精度是影响 DSI 精度的主要因素。本研究中采用 MOD/MYD16 ET 产品计算 DSI 指数,由于 MOD/MYD16 ET 计算中采用了分辨率较粗的 MERRA GMAO 气象再生数据,降低了 MOD/MYD16 ET 产品的区域尺度精度,因而该指数在区域尺度干旱监测能力受到影响。未来可结合高空间分辨率的多源遥感数据及气象站点数据,获得高时空分辨率的 ET 产品,提高 DSI 指数的区域尺度干旱监测能力。其次,本研究 ET,PET 与 NDVI 采用等权重参与 DSI 计算,未来可考虑地形因子及土壤类型等因素影响,重新确定 ET,PET 与 NDVI 的权重分配。另外,本文仅分析了广西蔗区年尺度及糖料蔗生育期尺度 DSI 指数的干旱时空特征,旬、月、16 d 和 8 d 尺度还有待于扩展,未来可进一步研究不同尺度下蔗区不同干旱等级及季节性干旱对糖料蔗产量造成的影响。

参考文献(References):

[1] 区颖刚. 我国甘蔗生产全程机械化现状与对策[J]. 现代农业装备,2019,40(2):3 - 8,42.
Ou Y G. Present situation and countermeasure of whole - process mechanization of sugarcane production in China[J]. Modern Agricultural Equipment,2019,40(2):3 - 8,42.

[2] 罗晟昇,廖韦卫,韦海球,等. 干旱胁迫对甘蔗生长研究进展[J]. 中国热带农业,2020(5):70 - 73.
Luo S S,Liao W W,Wei H Q,et al. Research progress of drought stress on sugarcane growth[J]. China Tropical Agriculture,2020(5):70 - 73.

[3] 农 钢,农明哲,王 达. 广西崇左甘蔗气象条件精细化分析初探[J]. 甘蔗糖业,2019(1):10 - 15.
Nong G,Nong M Z,Wang D. Preliminary refinement analysis of meteorological conditions of Chongzuo sugarcane in Guangxi[J]. Sugar Cane Sugar Industry,2019(1):10 - 15.

[4] 廖东声,覃思静. 广西甘蔗产业生产成本核算及控制问题分析[J]. 学术论坛,2013,36(8):83 - 87,92.
Liao D S,Qin S J. Analysis of production cost accounting and control of Guangxi sugarcane industry[J]. Academic Forum,2013,36(8):83 - 87,92.

[5] 王俊霞,朱秀芳,刘宪锋,等. 基于多源遥感数据的旱情评价研究——以河南省为例[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):180 - 186. doi:10.6046/gtzyyg.2018.01.25.
Wang J X,Zhu X F,Liu X F,et al. Research on agriculture drought monitoring method of Henan Province with multi - sources data[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(1):180 - 186. doi:10.6046/gtzyyg.2018.01.25.

[6] 屈艳萍,吕 娟,张伟兵,等. 中国历史极端干旱研究进展[J]. 水科学进展,2018,29(2):283 - 292.
Qu Y P,Lyu J,Zhang W B,et al. Progress in research on historical extreme drought in China[J]. Progress in Water Science,2018,29(2):283 - 292.

[7] 任立良,沈鸿仁,袁 飞,等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展,2016,27(4):492 - 500.
Ren L L,Shen H R,Yuan F,et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment[J]. Progress in Water Science,2016,27(4):492 - 500.

[8] 李新周,刘晓东,马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究,2004(2):97 - 103.
Li X Z,Liu X D,Ma Z G. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred - odd years[J]. Arid Zone Research,2004(2):97 - 103.

[9] 莫建飞,钟仕全,陈燕丽,等. 广西主要农业气象灾害监测预警系统的开发与应用[J]. 自然灾害学报,2013,22(2):150 - 157.
Mo J F,Zhong S Q,Chen Y L,et al. Development and application of a monitoring and early warning system for main agro - meteorological disasters in Guangxi Province[J]. Journal of Natural Disasters,2013,22(2):150 - 157.

[10] 匡昭敏. 广西农业干旱监测预报与农情分析业务系统 V1.0[Z]. 广西壮族自治区,广西壮族自治区气象减灾研究所,

2013.
Kuang Z M. Guangxi agricultural drought monitoring and forecasting and agricultural condition analysis business system V1.0[Z]. Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guangxi Institute of Meteorological Disaster Reduction, 2013.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局与中国国家标准化管理委员会. GB/T 34809—2017 糖料蔗干旱灾害等级[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and the National Standardization Administration of China. GB/T 34809—2017 Sugarcane drought disaster grade[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.

[12] 莫建飞,钟仕全,陈燕丽,等. 基于 GIS 的广西甘蔗萌芽分蘖期干旱等级空间分布[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):113 – 115.
Mo J F, Zhong S Q, Chen Y L, et al. GIS – based spatial distribution of drought grades of sugarcane during germination and tillering stage in Guangxi[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 113 – 115.

[13] 陈燕丽,蒙良莉,黄肖寒,等. 基于 SPEI 的广西甘蔗生育期干旱时空演变特征分析[J]. 农业工程学报,2019,35(14):149 – 158.
Chen Y L, Meng L L, Huang X H, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of drought in Guangxi during sugarcane growth period based on SPEI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 149 – 158.

[14] 李家文,黄 维,吴炫柯,等. 柳州市甘蔗干旱风险区划——基于作物水分亏缺指数[J]. 中国农学通报,2019,35(22):96 – 105.
Li J W, Huang W, Wu X K, et al. Drought risk zone of sugarcane in Liuzhou based on crop water deficit index[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(22): 96 – 105.

[15] 陈燕丽,黄思琦,莫建飞,等. 基于 CLDAS 数据的甘蔗干旱监测评估标准对比——以 2011 年广西干旱为例[J]. 干旱气象,2020,38(2):188 – 194.
Chen Y L, Huang S Q, Mo J F, et al. Comparison of drought monitoring standards of sugarcane based on CLDAS data: A case of drought in Guangxi in 2011[J]. Arid Meteorology, 2020, 38(2): 188 – 194.

[16] 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.
Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1835 – 1848.

[17] 匡昭敏,朱伟军,丁美花,等. 多源卫星数据在甘蔗干旱遥感监测中的应用[J]. 中国农业气象,2007(1):93 – 96.
Kuang Z M, Zhu W J, Ding M H, et al. Application of multi – sources satellite data in monitoring sugarcane droughts[J]. China Agricultural Meteorology, 2007(1): 93 – 96.

[18] Wang P, Gong J, Li X W. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2001.

[19] 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.
Wen Y Y, Zhao J, Wang Y Q, et al. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16[J]. Progress in Geographical Sciences, 2020, 39(2): 255 – 264.

[20] Mu Q, Zhao M, Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(1): 83 – 98.

[21] Haroon M A, Zhang J, Yao F. Drought monitoring and performance evaluation of MODIS – based drought severity index (DSI) over Pakistan[J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1349 – 1366.

[22] 张喜成,徐长春,宋 佳,等. 基于遥感 DSI 的新疆干旱特征分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(2):239 – 246.
Zhang X C, Xu C C, Song J, et al. Analysis of Xinjiang drought characteristics based on remote sensing DSI[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 239 – 246.

[23] 童德明,白 雲,张 莎,等. 干旱严重程度指数(DSI)在山东省干旱遥感监测中的适用性[J]. 中国农业气象,2020,41(2):102 – 112.
Tong D M, Bai Y, Zhang S, et al. Analysis of drought characteristics in Xinjiang area based on remote sensing DSI index[J]. Chinese Agricultural Meteorology, 2020, 41(2): 102 – 112.

[24] 张小强,冯 彬,王云燕. 运用 MODIS 对我国西南地区极端干旱情况监测与评估研究——以 2009—2010 年遥感数据为例[J]. 环境保护科学,2020,46(1):135 – 141.
Zhang X Q, Feng B, Wang Y Y. Monitoring and evaluation of extreme drought in southwest China based the MODIS: A case study based on 2009—2010 remote sensing data[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(1): 135 – 141.

[25] 余慧倩,张 强,孙 鹏,等. 干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响[J]. 地理学报,2019,74(1):87 – 102.
Yu H Q, Zhang Q, Sun P, et al. Impacts of drought intensity and drought duration on winter wheat yield in five provinces of north China plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 87 – 102.

[26] 陈燕丽,丁美花,冯利平,等. 广西宿根蔗生育期气象条件变化特征及其影响[J]. 气象,2016,42(12):1554 – 1559.
Chen Y L, Ding M H, Feng L P, et al. Characteristics of meteorological condition and its effects on ratoon sugarcane in different stages in Guangxi[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(12): 1554 – 1559.

[27] 李 霞,刘廷玺,段利民,等. 半干旱区沙丘、草甸作物系数模拟及蒸散发估算[J]. 干旱区研究,2020,37(5):1246 – 1255.
Li X, Liu T X, Duan L M, et al. Crop coefficient simulation and evapotranspiration estimation of dune and meadow in semiarid area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1246 – 1255.

[28] Wu X, Wang P J, Huo Z G, et al. Crop drought identification index for winter wheat based on evapotranspiration in the Huang – Huai – Hai Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 263: 18 – 30.

[29] 刘 清,杨永春,刘海洋. 中国 366 个城市空气污染综合程度的时空演变特征分析[J]. 干旱区地理,2020,43(3):820 – 830.
Liu Q, Yang Y C, Liu H Y. Spatiotemporal evolution characteristics of air pollution degree in 366 cities of China[J]. Arid Land Geog-

raphy,2020,43(3):820 – 830.

[30] 赵 璐,赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. 地理科学,2014(8):1280 – 1285.
Zhao L, Zhao Z Q. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China[J]. Geographical Sciences, 2014(8):1280 – 1285.

[31] 魏 凌,张 杨,李 强,等. 基于标准差椭圆的我国国土生态空间分异研究[J]. 生态经济,2020,36(7):176 – 181.
Wei L,Zhang Y,Li Q,et al. Study on spatial variation of China's territorial ecological space based on standard deviation ellipse[J]. Ecological Economy,2020,36(7):176 – 181.

[32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.
Wei F Y. Modern climate statistics diagnosis and prediction technology[M]. Beijing:Meteorological Press,1999.

[33] 赵锐锋,苏 丽,祝 稳. 1961—2012 年西北干旱区极端温度事件季节性时空分析[J]. 中国农学通报,2017,33(12):63 – 73.
Zhao R F,Su L,Zhu W. Extreme temperature events in arid region of northwest China during 1961—2012:Seasonal spatio – temporal analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(12):63 – 73.

[34] 岳 辉,刘 英. 近 15 a 陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. 干旱区地理,2019,42(2):314 – 323.
Yue H,Liu Y. Vegetation spatiotemporal variation and its driving factors of Shaanxi Province in recent 15 years[J]. Arid Land Geography,2019,42(2):314 – 323.

[35] 张 华,安慧敏. 基于 GEE 的 1987—2019 年民勤绿洲 NDVI 变化特征及趋势分析[J]. 中国沙漠,2021,41(1):28 – 36.
Zhang H,An H M. Analysis of NDVI variation characteristics and trend in Minqin oasis from 1987 to 2019 based on GEE[J]. Chinese Desert,2021,41(1):28 – 36.

[36] 张志高,耿益新,蔡茂堂,等. 1978—2017 年河南省气候生产潜力时空演变及趋势分析[J]. 水土保持研究,2020,27(6):247 – 253.
Zhang Z G,Geng Y X,Cai M T,et al. Spatial – temporal evolution and trend analysis of climatic potential productivity in Henan Province during 1978—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(6):247 – 253.

[37] Ji M,Huang J. Global semi – arid climate change over last 60 years[C]//EGU General Assembly Conference,2016.

Spatiotemporal analysis of drought in sugarcane planting areas of Guangxi by remote sensing

QIN Wen[1,2], HUANG Qiuyan[1,3], QIN Zhihao[4], LIU Jianhong[1], WEI Gaoyang[1]

(1. *School of Geography Science and Planning*, *Nanning Normal University*, *Nanning* 530001, *China*; 2. *Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection*, *Nanning* 530022, *China*; 3. *Key Laboratory of Environmental Evolution and Resource Utilization of Beibu Gulf*, *Nanning Normal University*, *Nanning* 530001, *China*; 4. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Guangxi is the most important sugarcane producing area in China. Remote sensing of drought in sugarcane planting areas is of great practical significance to decision – making for the anti – drought campaign in Guangxi where sugarcane planting is mainly on the farmland without irrigation guarantee. This study intends to examine the issue of remote sensing monitoring of drought in sugarcane planning areas in Guangxi. MODIS data product MOD16/MYD16 was used to calculate the drought intensity index (DSI) in Guangxi sugarcane planting areas for a period from 2002 to 2018. On the basis of this calculation, the spatiotemporal characteristics of different drought grades in Guangxi sugarcane planting areas were analyzed. In order to reveal the changing trend of the drought severity in the sugarcane planning areas, three methods, i. e. unary linear regression, Mann – Kendall trend test and Hurst index, were used in the study to analyze the change trend of drought in the sugarcane planting areas of Guangxi. The results showed that the drought in Guangxi during the period from 2002 to 2018 mainly happened in the center, the southeast, the southwest, and the northwest sugarcane areas. The annual average of DSI was –0.59 during the period. Very high DSI was observed in two years, i. e. 2010 and 2002, implying that sugarcane planting in Guangxi experienced the most severe drought in the two years. Very low DSI was seen in 2016, indicating the minimal impact of drought on the planting areas this year. The change of DSI in the sugarcane planting areas of Guangxi showed a trend of a slight decrease from 2002 to 2018, with an annual rate of –0.07%. In terms of the spatial center of gravity of drought, the center of gravity of drought areas in different growth periods showed a trend of expansion from the center to the northwest, and the path of gravity center shift was as follows:

central planting area > southwest planting area > northwest planting area. From the perspective of years, DSI in each year revealed a remarkable fluctuation during the period in question. Sharp changes in DSI might also be seen in some years, implying that drought had variability among years in Guangxi. The spatiotemporal variation of drought in Guangxi is obviously related to the climate change in the areas. Therefore we believe that sugarcane planting in Guangxi might continuously face the challenges from the frequent occurrence of the drought of various grades as a result of future climate change. Remote sensing monitoring of the drought can provide useful information on drought events and their dynamics for anti – drought campaigns to reduce the impact of drought on sugarcane planting in Guangxi.

Keywords: DSI; shift of the center of gravity; spatiotemporal evolution of drought; sugarcane

（责任编辑：陈 理）