

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.038.

张彦, 王来刚, 黎世民, 等. 基于植被状态指数的县域冬小麦干旱时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 423-430.

ZHANG Yan, WANG Laigang, LI Shimin, et al. Temporal and Spatial Analysis of Winter Wheat Drought on County Scale Based on Vegetation Condition Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 423-430.

基于植被状态指数的县域冬小麦干旱 时空变化特征分析

张彦^{1,2,3}, 王来刚^{1,2,3}, 黎世民^{1,3}, 贺佳^{1,2,3},

郭燕^{1,2,3}, 杨秀忠^{1,2,3}, 张红利^{1,2,3}, 刘婷^{1,2,3}

(1.河南省农业科学院 农业经济与信息研究所, 郑州 450002; 2.农业农村部黄淮海智慧农业技术重点实验室, 郑州 450002; 3.河南省农作物种植监测与预警工程研究中心, 郑州 450002)

摘要: [目的] 分析县域冬小麦干旱的时空异质性, 为抗旱减灾提供辅助决策支持。 [方法] 基于 GF1, Landsat, Sentinel-2 等中高分辨率遥感数据, 选取植被状态指数 (Vegetation Condition Index, VCI) 作为干旱监测指标, 计算 2011—2021 年禹州市冬小麦 VCI, 逐年分析禹州市冬小麦干旱分布情况, 并通过变异系数、线性趋势法、重心迁移和标准差椭圆等方法, 对禹州市冬小麦干旱的稳定性、变化趋势、时空变化等特征进行了多维度分析。 [结果] (1) 空间上, 2011—2021 年禹州市冬小麦干旱主要分布在北部和西部的山岗丘陵区, 干旱面积和干旱强度由平原区向山岗区逐渐延展扩大; 变异系数与变化百分率均值分别为 0.62, 13.12%, 冬小麦干旱稳定性与变化趋势空间分布一致性高; 重心迁移轨迹总距离和标准差椭圆扁率从无旱到重旱逐渐变小, 标准差椭圆面积逐渐变大, 表明干旱空间分布由集中趋于分散; (2) 时间上, 禹州市冬小麦每年都有轻旱发生, 中旱和重旱平均 2~4 年发生一次, 2012—2014 年连续 3 年旱情较重, 中旱和重旱总占比均超过 35%, 其次为 2016 年和 2018 年。 [结论] 近 11 年来禹州市冬小麦干旱总体上呈现向好的发展态势, 大部分区域冬小麦旱情改善较为明显, 对于旱情严重且不稳定区域需加强防控力度。

关键词: 冬小麦; 干旱; 植被状态指数; 县域

中图分类号: S423; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0423-08

Temporal and Spatial Analysis of Winter Wheat Drought on County Scale Based on Vegetation Condition Index

ZHANG Yan^{1,2,3}, WANG Laigang^{1,2,3}, LI Shimin^{1,3}, HE Jia^{1,2,3}, GUO Yan^{1,2,3},

YANG Xiuzhong^{1,2,3}, ZHANG Hongli^{1,2,3}, LIU Ting^{1,2,3}

(1. Institute of Agricultural Economic and Information, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Key Laboratory of Huang-Huai-Hai Smart Agricultural Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Province Engineering Research Center for Crop Planting Monitoring and Early Warning, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: [Objective] By the spatial and temporal heterogeneity of winter wheat drought in the county was analyzed to provide auxiliary decision support for drought resistance and disaster reduction. [Methods] The vegetation condition index (VCI) was selected as the drought monitoring index. Based on GF1, Landsat, Sentinel-2 and other high resolution remote sensing data, the VCI of winter wheat in Yuzhou City from 2011 to 2021 was calculated. The variation coefficient, linear trend method, center of gravity migration and standard deviation ellipse were used to analyze the drought characteristics of winter wheat in Yuzhou City, such as

收稿日期: 2022-05-24

修回日期: 2022-06-15

资助项目: 河南省重点研发专项 (221111321400); 河南省科技攻关 (222102110086); 河南省农业科学院自主创新项目 (2022ZC53)

第一作者: 张彦 (1989—), 女, 山东临沂人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业遥感应用与研究。E-mail: zy12032016@163.com

通信作者: 黎世民 (1978—), 男, 河南许昌人, 博士, 副研究员, 主要从事农业遥感与信息技术研究。E-mail: mbalsm@126.com

<http://stbcj.paperonice.org>

stability, change trend, spatial and temporal changes. [Results] (1) From the spatial point of view, the drought of winter wheat in Yuzhou City mainly distributed in the northern and western hillock areas from 2011 to 2021, and the drought area and drought intensity gradually expanded from plain area to hillock area. (2) The mean value of variation coefficient and variation percentage were 0.62 and 13.12%, respectively. The spatial distribution of drought stability and variation trend of winter wheat was highly consistent. (3) The total distance of the center of gravity migration trajectory and the standard deviation ellipse flat rate gradually decreased from no drought to severe drought, and the standard deviation ellipse area gradually increased, indicating that the spatial distribution of drought tended to scatter from concentration. (4) In terms of time, mild droughts occurred every year in period of winter wheat growth in Yuzhou City, with moderate and severe droughts occurring in an average of 2 to 4 years. Droughts were severe for three consecutive years in 2012—2014, with moderate and severe droughts accounting for more than 35 percent, followed by 2016 and 2018. [Conclusion] During the 11 years, the drought of winter wheat in Yuzhou City generally showed a good development trend, and the drought in the period of winter wheat growth in most regions was improved significantly, for severe drought and unstable areas, prevention and control should be strengthened.

Keywords: winter wheat; drought; vegetation condition index; county scale

干旱是对农业生产影响最严重的自然灾害之一,具有影响广、频率高、持续时间长的特点^[1]。全球变暖加剧了干旱发生频率和强度,中国每年受干旱影响的农作物面积达到 30% 左右^[2]。河南省是中国冬小麦主产区之一,冬小麦总产量约占全国冬小麦总产量的 28%^[3],直接关乎国家粮食安全和社会稳定^[4]。然而受季风气候影响,河南省冬小麦生育期内旱灾频发^[5],对冬小麦产量形成造成严重不利影响。因此,加强河南省冬小麦干旱特征研究,对于冬小麦生产的防灾减灾及保障区域粮食安全具有重要意义。

遥感技术具有空间连续、观测范围大的优点,在农业干旱监测研究中已有广泛应用。目前,国内外学者利用遥感植被指数作为干旱监测指标对河南省冬小麦干旱开展了系列研究,如 Yan^[6]、王来刚等^[7]分别基于 MODIS 和 HJ 卫星数据计算改进型垂直干旱指数(modified perpendicular drought index, MPDI)和植被供水指数(vegetation supplication water index, VSWI)对河南冬小麦主产区 2009 年和 2011 年的冬小麦干旱进行了监测研究;刘英^[8]、Huang^[9]等则基于 MODIS 时间序列产品归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表温度(land surface temperature, LST)数据构建温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI),进行长时间序列的河南省冬小麦干旱时空变化特征研究。Kogan^[10]基于 NDVI 的思想提出了植被状态指数(vegetation condition index, VCI),VCI 对植被状态变化敏感,减弱了地形和土壤因素对 NDVI 的影响,与作物产量呈现很好的相关性^[11],在大范围农业干旱监测和长时间跨度的干旱

时空特征研究中得到良好的应用效果^[12-20]。如沙莎等^[21]利用 AVHRR 数据计算并分析了 VCI 对气象干旱的滞后效应,发现气象条件对河南冬小麦长势的影响滞后期为 1~3 个月;刘高鸣等^[22]基于 MODIS 数据计算 VCI 作为植被状态表征指标,联合气象及土壤多个致旱因子构建综合农业干旱监测模型,分析了 2001—2011 年河南省冬小麦干旱时空演变情况。何厚军等^[23]基于 MODIS 数据对比分析了 VCI 和垂直干旱指数(perpendicular drought index, PDI)、TVDI, VSWI 对人民胜利渠灌区冬小麦拔节至成熟期干旱的监测效果。

综上所述,已有研究虽然从多个角度分析了 VCI 对河南省冬小麦干旱监测的影响,但仍存在一些不足之处,主要表现为:一是所用遥感数据多为 MODIS, NOAA/AVHRR, HJ 等卫星数据,空间分辨率较低,其干旱监测精度不足;二是研究范围多集中在省域或区域尺度,关于县域冬小麦干旱变化的研究相对缺乏,难以直接分析与评价县域冬小麦干旱的异质性。因此,本研究以禹州市冬小麦为例,基于 GF-1 WFV, Landsat8 OLI 及 Sentinel-2 等卫星数据,通过计算年 VCI 为干旱监测指标,研究 2011—2021 年禹州市冬小麦干旱,从稳定性、变化趋势、重心迁移等角度分析冬小麦干旱时空变化特征,为县域冬小麦抗旱减灾提供辅助决策支持。

1 研究区概况

禹州市为河南省直辖县级市,位于河南省中部,地理位置在 33°59′—34°24′N, 113°03′—113°39′E, 总面积为 1 461 km², 下辖 4 个街道办事处, 22 个乡镇(镇)。属暖温带季风气候区, 年均气温 14.4℃, 年均

降水量 650 mm, 平均海拔为 225.7 m, 区域内自然地理差异明显, 地貌类型多样, 平原占 40.8%, 岗地占 30.6%, 丘陵占 14.7%, 山地占 13.9%。地势西北高、东南低, 呈阶梯状分布且分界明显。耕地面积 $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 农作物以冬小麦、玉米为主, 冬小麦种植面积约 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究选取 GF-1 WFV, Landsat8 OLI 及 Sentinel-2 等中高分辨率卫星数据, 用于冬小麦种植面积识别和冬小麦全生育期干旱监测, 时间跨度为 2011—2021 年。GF-1 WFV 数据由中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com/>) 获取, 空间分辨率为 16 m; Landsat8 OLI 数据由美国地质勘探局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 获取, 影像空间分辨率为 30 m。Sentinel-2 数据由欧空局哥白尼数据中心 (<https://scihub.copernicus.eu/>) 获取, 融合后影像空间分辨率为 10 m。对获取到的数据进行大气校正、几何校正等预处理, 经重采样为 30 m 后使用红光波段、近红外波段计算得到植被状态指数。

2.2 研究方法

2.2.1 植被状态指数 利用遥感数据得到 2011—2021 年冬小麦生育期内逐月植被状态指数 (VCI), 计算公式如下:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

式中: VCI_i 为某一年 i 月的植被状态指数; $NDVI_i$ 为某一年 i 月的 NDVI 值; $NDVI_{\min}$ 为 2011—2021 年 i 月的 NDVI 最小值; $NDVI_{\max}$ 为 2011—2021 年 i 月的 NDVI 最大值。VCI 的取值范围为 $[0, 1]$, VCI 值越小, 表明植被生长状态越差, 干旱越严重; 反之, 干旱越轻。

为消除云、大气等因素的影响, 本研究在月 VCI 的基础上, 采用最大值合成法得到年 VCI。根据 Kogan 等^[24]提出的 VCI 对农业干旱判别标准, 将禹州市冬小麦干旱划分为 4 个等级, 分别为: 无旱 ($VCI > 0.35$)、轻旱 ($0.25 < VCI \leq 0.35$)、中旱 ($0.15 < VCI \leq 0.25$)、重旱 ($VCI \leq 0.15$)。

2.2.2 变异系数 本研究运用变异系数法来衡量 VCI 的空间稳定性^[25], 进一步分析禹州市 2011—2021 年冬小麦干旱发展的稳定程度。CV 值越大, 表示 2011—2021 年干旱越不稳定; 反之, 干旱越稳定。CV 计算公式如下:

$$CV = \frac{VCI_{\sigma}}{\overline{VCI}} \quad (2)$$

式中: CV 为 2011—2021 年 VCI 的变异系数; VCI_{σ} 为 2011—2021 年 VCI 标准差; \overline{VCI} 为 2011—2021 年 VCI 平均值。为了直观评价冬小麦干旱发展变化情况, 本研究选择自然间断点分级法把 CV 划分为 4 个等级, 分别为: 非常稳定 ($CV \leq 0.50$)、稳定 ($0.50 < CV \leq 0.65$)、不稳定 ($0.65 < CV \leq 0.80$)、很不稳定 ($CV > 0.80$)。

2.2.3 线性趋势法 本研究运用线性趋势法计算 2011—2021 年禹州市冬小麦种植区逐年逐像元的 VCI 变化趋势来研究冬小麦干旱空间分布的变化特征^[26]。线性趋势法计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times VCI_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n VCI_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

$$VCI_c = n \times \frac{\text{slope}}{\overline{VCI}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: VCI_c 为变化率; \overline{VCI} 为 2011—2021 年 VCI 的平均值; slope 为线性倾向值; VCI_i 为第 i 年的 VCI 的平均值; n 为研究数据的累积年数 ($n = 11$)。slope > 0 表示该像元 VCI 随时间为增加趋势; slope $= 0$ 表示该像元 VCI 基本不变; slope < 0 表示该像元 VCI 为减少趋势。采用自然间断点分级法将变化率 VCI_c 的结果划分为 5 个等级, 分别为: 显著改善 ($VCI_c > 50\%$)、轻微改善 ($30\% < VCI_c \leq 50\%$)、基本不变 ($10\% < VCI_c \leq 30\%$)、轻微恶化 ($0 < VCI_c \leq 10\%$)、严重恶化 ($VCI_c \leq 0$)。

2.2.4 重心迁移模型及标准差椭圆 本研究采用重心迁移模型计算冬小麦种植区不同干旱等级的重心经纬度坐标, 并通过重心迁移的方向、速度和距离解释研究区冬小麦种植区不同干旱等级的重心变化趋势和空间分布变化情况^[27]。重心迁移模型中的重心经纬度计算公式如下:

$$x_j = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ij} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n M_{ij}}, \quad y_j = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ij} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n M_{ij}} \quad (5)$$

式中: x_j 和 y_j 为第 j 年某一干旱强度的重心经纬度; n 为第 j 年该干旱强度的图斑数; M_{ij} 为第 j 年该干旱强度的占比情况; X_i 和 Y_i 为变量 i 的经纬度; $P_j(x_j, y_j)$ 为第 j 年干旱重心坐标。

设第 $(j+m)$ 年干旱的重心坐标为 $P_{j+m}(x_{j+m}, y_{j+m})$, 那么第 j 年至第 $(j+m)$ 年的干旱重心移动方向 (θ_m) 的计算公式为:

$$\theta_m = \arctan[(y_{j+m} - y_j) / (x_{j+m} - x_j)] \quad (6)$$

干旱重心移动距离(d_m)的计算公式为:

$$d_m = \sqrt{(x_{j+m} - x_j)^2 + (y_{j+m} - y_j)^2} \tag{7}$$

在重心模型的基础上,构建标准差椭圆来反映研究区冬小麦不同干旱等级的重心变化及迁移方向,直观展示干旱空间分布整体特征与时空变化过程^[28-29]。具体计算公式如下:

$$\tan\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^2)^2 + 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^2 y_i^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i y_i} \tag{8}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i \cos\theta - w_i y_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x_i \sin\theta + w_i y_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \tag{9}$$

式中: θ 为标准差椭圆相对于正北方向所偏移的角

度,其大小可以在整体上解释研究区冬小麦干旱的空间分布情况; w_i 为权重; x_i, y_i 为每个图斑中心到研究区中心的距离; σ_x, σ_y 为沿 x 轴、 y 轴的标准差。

3 结果与分析

3.1 冬小麦干旱时空分布变化特征

研究以乡镇为统计单元,对年 VCI 进行分区统计,得到 2011—2021 年禹州市各乡镇冬小麦 VCI 年际变化情况(表 1)。由表 1 可知,禹州市 VCI 多年均值为 0.46,最大值和最小值分别为 0.54(2017 年)和 0.24(2014 年)。2012—2014 年 VCI 值呈减小趋势,在其他年份波动较小。各乡镇冬小麦 VCI 年际变化趋势与禹州市整体一致,2012 年各乡镇 VCI 差别较大,最大值和最小值分别为 0.5(山货回族乡)和 0.19(鸠山镇、神垕镇),其他年份各乡镇年 VCI 差值不大。

表 1 2011—2021 年禹州市冬小麦 VCI 平均值年际变化

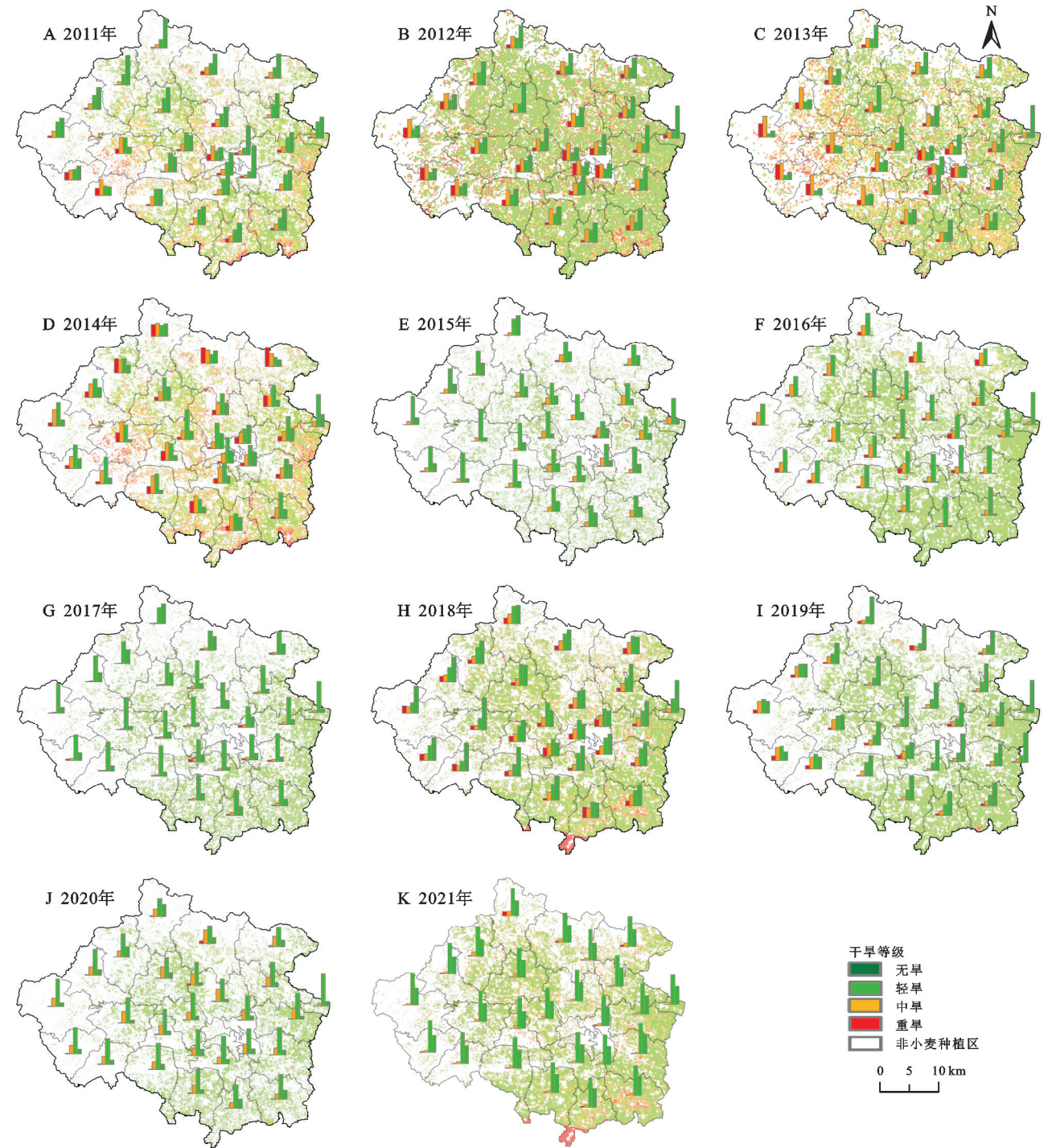
乡镇名称	VCI 平均值										
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
裴庄乡	0.50	0.23	0.31	0.28	0.46	0.36	0.50	0.37	0.51	0.47	0.50
褚河镇	0.56	0.43	0.34	0.25	0.49	0.40	0.56	0.40	0.57	0.50	0.53
范坡镇	0.47	0.29	0.33	0.27	0.45	0.38	0.50	0.41	0.51	0.47	0.51
方岗镇	0.55	0.24	0.29	0.28	0.47	0.40	0.56	0.39	0.56	0.50	0.54
方山镇	0.52	0.20	0.32	0.28	0.42	0.36	0.52	0.39	0.53	0.48	0.51
古城镇	0.57	0.35	0.33	0.25	0.46	0.39	0.56	0.41	0.55	0.49	0.53
郭连镇	0.59	0.42	0.34	0.26	0.49	0.40	0.56	0.40	0.55	0.48	0.52
韩城街道	0.51	0.30	0.36	0.31	0.48	0.36	0.48	0.41	0.41	0.46	0.48
鸿畅镇	0.52	0.24	0.30	0.28	0.43	0.37	0.53	0.38	0.53	0.50	0.54
花石镇	0.53	0.26	0.31	0.28	0.44	0.38	0.56	0.40	0.53	0.48	0.52
火龙镇	0.55	0.40	0.34	0.25	0.45	0.42	0.57	0.38	0.58	0.49	0.53
鸠山镇	0.52	0.19	0.32	0.31	0.41	0.34	0.51	0.41	0.51	0.48	0.51
钧台街道	0.51	0.42	0.32	0.28	0.44	0.37	0.49	0.43	0.48	0.44	0.48
梁北镇	0.54	0.40	0.34	0.26	0.48	0.42	0.55	0.42	0.56	0.49	0.53
磨街乡	0.47	0.20	0.33	0.32	0.43	0.32	0.46	0.37	0.46	0.45	0.50
浅井镇	0.49	0.21	0.34	0.25	0.46	0.40	0.51	0.40	0.49	0.47	0.50
山货回族乡	0.60	0.50	0.38	0.26	0.50	0.44	0.61	0.39	0.59	0.52	0.54
神垕镇	0.47	0.19	0.31	0.32	0.41	0.35	0.50	0.37	0.51	0.47	0.52
顺店镇	0.52	0.36	0.34	0.25	0.44	0.40	0.56	0.37	0.56	0.46	0.51
文殊镇	0.53	0.21	0.30	0.29	0.42	0.38	0.56	0.39	0.53	0.49	0.55
无梁镇	0.55	0.23	0.31	0.26	0.47	0.36	0.54	0.42	0.53	0.48	0.52
夏都街道	0.53	0.42	0.33	0.30	0.45	0.39	0.53	0.38	0.53	0.45	0.50
小吕乡	0.52	0.37	0.35	0.27	0.47	0.40	0.51	0.39	0.53	0.45	0.51
颍川街道	0.49	0.38	0.34	0.22	0.43	0.38	0.53	0.41	0.52	0.45	0.49
张得镇	0.52	0.33	0.32	0.26	0.48	0.39	0.53	0.43	0.54	0.50	0.54
朱阁镇	0.51	0.29	0.32	0.25	0.41	0.38	0.53	0.37	0.51	0.43	0.51
禹州市	0.52	0.31	0.33	0.24	0.45	0.38	0.54	0.40	0.53	0.48	0.52

以 VCI 为干旱监测指标进行冬小麦干旱分级,统计结果发现 2011—2021 年禹州市冬小麦重旱占比为 5.99%,中旱占比为 18.77%,轻旱占比为 42.72%,无旱占

比为 32.52%。以乡镇为统计单元,得到 2011—2021 年冬小麦干旱空间分布结果图和各乡镇不同干旱等级面积占比柱状图(图 1)。由图可知,时序上,禹州市冬小麦

每年都有轻旱,而中旱和重旱具有一定的周期性,二者总占比 25%以上干旱平均 2~4 a 发生 1 次,2012—2014 年连续 3 a 中旱和重旱占比均超过 35%,其次为 2016 年(27.30%)和 2018 年(25.26%)。2014 年干旱最为严重,重旱占比超 15%,中旱占比为 25%,仅 20%左右没有干旱,这与 VCI 年际变化结果一致。空间上,2011—2021 年研究区冬小麦干旱发生范围主要分布在北部和西部,

其中西部以重旱为主,中旱次之;北部以中旱为主,重旱次之;中部、南部和东部则以轻旱为主,无旱次之,重旱和中旱较少。考虑造成这种空间分布特征的原因主要是北部和西部为丘陵和山地,土壤蓄水能力差,灌溉设施少,在自然降水不能满足冬小麦生长发育的条件下,发生干旱概率大。而中部、南部和东部为冲积平原,土壤蓄水能力好,灌溉设施相对齐全,干旱发生风险小。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号豫S(2019年)026号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 2011—2021 年冬小麦干旱时空分布

3.2 干旱变化稳定性分析

利用变异系数法对禹州市冬小麦干旱在空间上

的变化进行稳定性分析,2011—2021 年禹州市冬小麦干旱的变异系数介于 0~2.31,均值为 0.62,整体来

看禹州市冬小麦干旱变化较为稳定。由稳定性空间分布图可知(图2),禹州市冬小麦干旱变化稳定性整体上呈北向南逐渐增加;其中干旱非常稳定的区域占比为20.60%,主要分布在中部平原地带;干旱较为稳定的区域占比最大,为40.64%,空间分布广泛;干旱较不稳定的区域占比为24.53%,主要分布在西部和北部丘陵地区;干旱非常不稳定的区域占比为14.23%,主要集中分布在北部山岗区一带。

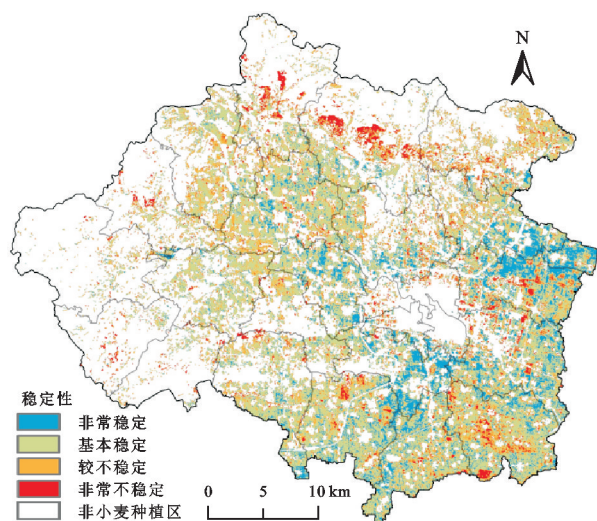


图2 2011—2021年冬小麦干旱变化的稳定性空间分布

3.3 干旱变化趋势分析

为了研究禹州市2011—2021年冬小麦VCI年际变化趋势,本研究通过遥感数据计算VCI与时间进行线性趋势分析。利用公式(4)计算研究区冬小麦VCI指数的变化百分率分布图(图3),由图可知,研究区冬小麦干旱变化趋势在空间分布上整体存在较大差异,变化百分率范围为-72.44%~95.31%,均值为13.12%。冬小麦干旱年际变化呈改善趋势的面积占比为47.76%,其中以轻微改善占主导地位(35.44%),主要位于中部平原区域;干旱年际变化基本不变的区域面积占比为25.52%,空间分布范围较分散,与干旱变化稳定性空间分布较为一致。干旱年际变化呈恶化趋势的区域面积占比为1.20%,表明2011—2021年禹州市冬小麦干旱变化趋势总体上呈向好的趋势发展,大部分区域冬小麦干旱得到改善。由于研究区内处于平原地区的乡镇农田水利设施治理较好,且生态环境保护较好,地方政府注意引导水资源优化利用,促进了水环境的良性循环,大部分地区冬小麦干旱出现好转的趋势。

3.4 干旱空间变化特征分析

以研究区冬小麦VCI为权重,获取2011—2021年冬小麦不同干旱等级的重心经纬度,在此基础上绘制重心迁移轨迹和一级标准差椭圆(图4),并对标准差椭圆的扁率和面积等参数进行统计(表2),从而分析干旱空间分布的方向性和离散性^[30]。

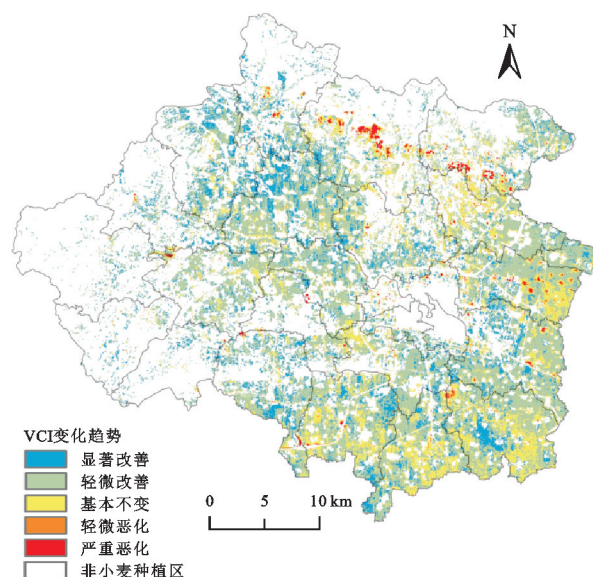


图3 2011—2021年冬小麦干旱变化趋势空间分布

从图4重心迁移轨迹来看,无旱重心整体以3.88 km/a的速度向东方向移动,迁移轨迹总距离为42.70 km;轻旱重心整体以2.86 km/a的速度向西南方向移动,迁移轨迹总距离为31.46 km;中旱重心整体以2.61 km/a的速度向东南方向移动,迁移轨迹总距离为28.69 km;重旱重心整体以1.44 km/a的速度向西南方向移动,迁移轨迹总距离为15.89 km,重旱重心迁移轨迹总距离最小,说明重旱的空间变化比其他干旱等级空间变化小。虽然冬小麦各干旱等级的重心位置不处于相应干旱等级面积占比最大的地区,但是通过重心迁移轨迹可以较好地解释全区干旱重心在空间上的转移变化趋势。

标准差椭圆的扁率可以反映冬小麦干旱空间分布的方向性。从表2可知,研究区冬小麦干旱标准差椭圆扁率在0.36~0.62,呈先升后降趋势,表明不同等级干旱空间分布较分散。其中,中旱的标准差椭圆扁率最大为0.62,表明中旱分布最为集中,重旱标准差椭圆扁率最小为0.36,表明重旱分布最为分散。

标准差椭圆的面积可以表明冬小麦干旱空间分布的离散性。结合表2标准差椭圆面积与图4标准差椭圆分布可知,2011—2021年研究区不同干旱强度的标准差椭圆在空间分布上稍有差别,但都位于研究区中部地区,延长轴向两端扩散,标准差椭圆面积随干旱等级加大而变大,表明干旱空间分布由集中趋于分散。其中,无旱等级的标准差椭圆分布方向为东向西,椭圆面积最小为151.13 km²,表明轻旱空间分布最为集中。轻旱等级的标准差椭圆分布方向为东北向西南。中旱等级的标准差椭圆分布方向为西北向东南。重旱等级的标准差椭圆分布方向为东北向西南,椭圆面积最大为518.57 km²,表明重旱空间分布最大。

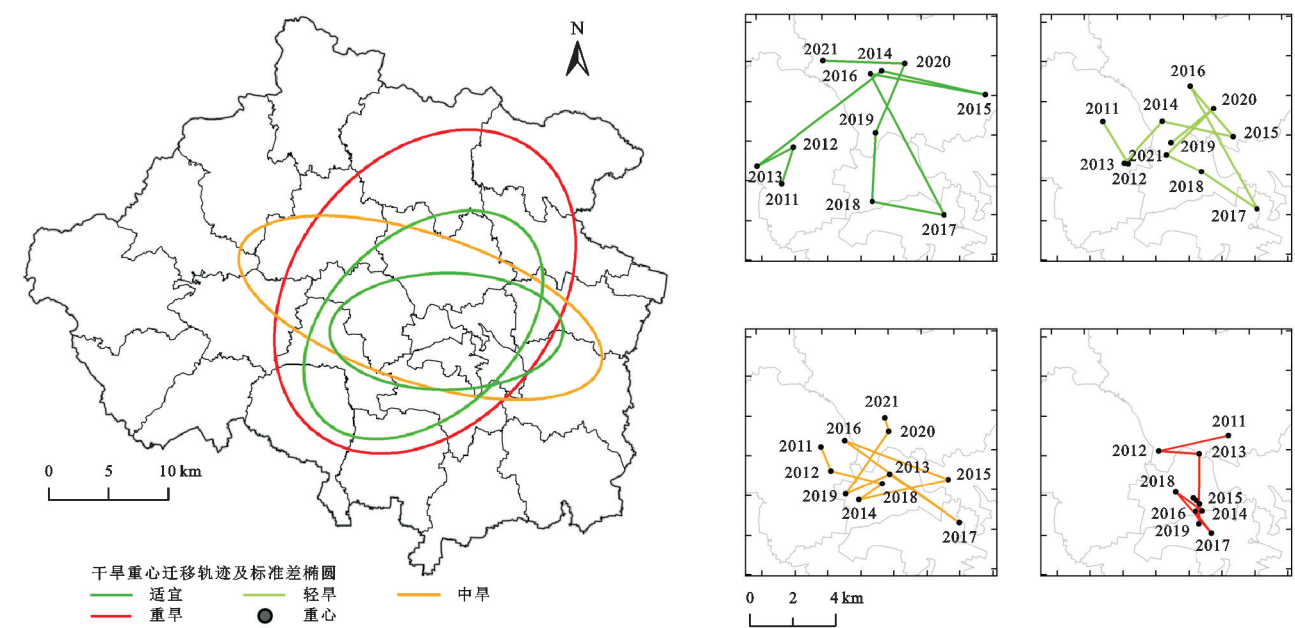


图 4 2011—2021 年冬小麦干旱重心迁移轨迹及标准差椭圆分布

表 2 2011—2021 年冬小麦干旱标准差椭圆参数

干旱等级	X 轴 长度/km	Y 轴 长度/km	方向角/ (°)	扁率	面积/ km ²
无旱	9.98	4.82	92.78	0.52	151.13
轻旱	7.60	11.68	54.138	0.54	278.50
中旱	16.13	6.17	110.65	0.62	312.44
重旱	11.02	14.98	44.87	0.36	518.57

4 讨论与结论

本研究选取河南省禹州市冬小麦干旱为研究对象,利用 GF1,Landsat,Sentinel-2 等中高分辨率遥感数据计算得到禹州市 2011—2021 年逐年 VCI,以 VCI 作为干旱监测指标,采用变异系数、线性趋势法、重心迁移模型及标准差椭圆方法,分析了连续 11 a 禹州市冬小麦干旱的时空变化特征,主要结论如下:

(1) 从空间变化特征来看,2011—2021 年禹州冬小麦干旱主要分布于北部和西部的山岗丘陵区,中部、南部和东部以轻旱和无旱为主,受自然降水和灌溉条件影响,干旱面积和干旱强度由平原向山岗区逐渐延展扩大;变异系数均值为 0.62,表明干旱空间变化较为稳定,稳定性由北向南逐渐增加。冬小麦干旱变化趋势空间分布差异较大,与稳定性空间分布一致性高。标准差椭圆在空间分布上稍有差别,但都位于研究区中部,延长轴向两端扩散,标准差椭圆面积随干旱等级加大而变大,干旱空间分布由集中趋于分散。

(2) 从时间变化特征来看,2011—2021 年禹州市冬小麦每年都有轻旱发生,中旱和重旱具有一定的周期性,二者总占比 25% 以上干旱平均 2~4 a 发生 1 次,2012—2014 年连续 3 a VCI 均值小于 0.35,中旱和重旱总占比超过 35%,其次为 2016 年(27.30%)和

2018 年(25.26%)。其中,2014 年干旱最为严重,VCI 均值为 0.24,重旱占比超 15%,中旱占比为 25%,仅 20% 左右的冬小麦没有干旱。2011—2021 年禹州市冬小麦干旱变化百分率均值为 13.12%。禹州市冬小麦干旱呈改善趋势的面积比例为 47.76%,与稳定性空间分布一致性高。冬小麦干旱年际变化呈恶化趋势的区域仅占总面积的 1.20%,总体上呈现出向好的发展趋势,大部分区域冬小麦干旱改善趋势表现较为明显。重旱空间变化最小,重旱的重心迁移轨迹总距离最小,为 15.89 km,其他依次为中旱(28.69 km)、轻旱(31.46 km)和无旱(42.70 km)。

农业干旱是由自然地理环境、社会经济等多个要素联合影响造成的结果^[31],河南省地形复杂多样,各个县区的农业生产状况具有差异性^[32],本研究围绕禹州市冬小麦种植区开展了县域内农业干旱时空特征研究,较好地揭示了县域冬小麦干旱的空间异质性。此外,众多学者按照月份^[33]、生育期^[34-35]、季节等^[8]不同角度分析了河南冬小麦干旱,但都是针对于整个研究区域,本研究在前人研究的基础上,将干旱研究区域集中于冬小麦种植区域,基于 VCI 指数分析了 2011—2021 年河南禹州市冬小麦干旱时空变化特征,提高了结果的针对性和实用性。但是 VCI 指数是以监测植被生长状态为主的干旱指标,而影响植被生长状态好坏的不仅仅是干旱,还有病虫害、冻害或者土壤质地等其他因素也会影响植被生长状态变化。在后续的研究中,需要进一步明晰冬小麦干旱发生机理,提高冬小麦干旱遥感监测水平。

参考文献:

[1] 果华雯,张元伟,宋小燕,等.中国南北过渡带干旱时空变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):79-85.

- [2] 靖娟利,和彩霞,王永锋,等.西南地区1902—2018年干旱时空演变特征分析[J].水土保持研究,2022,152(3):220-227.
- [3] 国家统计局.中国统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2021.
- [4] 郭文茜,任建强,刘杏认,等.统计数据总量约束下全局优化阈值的冬小麦分布制图[J].遥感学报,2018,22(6):1023-1041.
- [5] 史本林,朱新玉,胡云川,等.基于SPEI指数的近53年河南省干旱时空变化特征[J].地理研究,2015,34(8):1547-1558.
- [6] Yan M. Remote sensing monitoring of agricultural drought in Henan Province during spring and summer of 2009[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,193(195/196):1189-1193.
- [7] 王来刚,刘婷,高超,等.基于环境减灾卫星遥感数据的小麦干旱监测研究[J].河南农业大学学报,2013,47(4):465-469.
- [8] 刘英,岳辉,李遥,等.基于MODIS的河南省春旱遥感监测[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):218-223.
- [9] Huang J X, Zhuo W, Li Y, et al. Comparison of three remotely sensed drought indices for assessing the impact of drought on winter wheat yield[J]. International Journal of Digital Earth, 2020,13(4):504-526.
- [10] Kogan F. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995,76(5):655-668.
- [11] Francisco Z, Mario L S, Koen V, et al. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBio region in Chile using a 250 m resolution vegetation condition index(VCI)[J]. Remote Sensing, 2016,8(6):1-20.
- [12] 吕潇然,尹晓天,宫阿都,等.基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析[J].地球信息科学学报,2016,18(12):1634-1644.
- [13] 罗彪,刘潇,郭萍.基于MODIS数据的河套灌区遥感干旱监测[J].中国农业大学学报,2020,25(10):44-54.
- [14] Yu Y H, Shen Y Z, Wang J L, et al. Assessing the response of vegetation change to drought during 2009—2018 in Yunnan Province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(34):47083-47085.
- [15] Shang Y R, Hu Q H, Liu G Y, et al. Winter wheat drought monitoring and comprehensive risk assessment: case study of Xingtai administrative district in North China[J]. Journal of Environmental Science and Engineering A, 2017,6(3):135-143.
- [16] Dutra D J, Elmiro M A T, Nero M A, et al. Temporal analysis of drought coverage in a watershed area using remote sensing spectral indexes[J]. Sociedade & Natureza, 2021,33,DOI:10.14393/SN-v33-2021-59505.
- [17] 李新尧,杨联安,聂红梅,等.基于植被状态指数的陕西省农业干旱时空动态[J].生态学杂志,2018,37(4):1172-1180.
- [18] 季民,张超,赵建伟,等.基于VCI指数的青藏地区春旱时空动态变化分析[J].国土资源遥感,2021,33(1):152-157.
- [19] Baniya B, Tang Q, Xu X, et al. Spatial and temporal variation of drought based on satellite derived vegetation condition index in Nepal from 1982-2015[J]. Sensors, 2019,19(2):1-21.
- [20] Zhang L F, Jiao W Z, Zhang H M, et al. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,190:96-106.
- [21] 沙莎,郭妮,李耀辉,等.植被状态指数VCI与几种气象干旱指数的对比:以河南省为例[J].冰川冻土,2013,35(4):990-998.
- [22] 刘高鸣,谢传节,何天乐,等.基于多源数据的农业干旱监测模型构建[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1811-1822.
- [23] 何厚军,姚保顺,陈亮,等.墒情遥感监测指数对比分析与灌区应用研究[J].测绘与空间地理信息,2016,39(6):40-42.
- [24] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought watch system using NOAA/AVHRR data [J]. Advances in Space Research, 1993,13(5):219-222.
- [25] 梁任刚,周旭,李松,等.基于CWSI的贵州省干旱时空变化特征及影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(3):284-291.
- [26] 同英杰,文彦君,张翀.2003—2017年陕西省NDVI时空变化及其影响因素[J].水土保持通报,2020,40(3):155-162.
- [27] 王介勇,刘彦随.1990—2005年中国粮食产量重心演进格局及其驱动机制[J].资源科学,2009,31(7):1188-1194.
- [28] 马春玥,买买提·沙吾提,姚杰,等.1950—2015年中国棉花生产时空动态变化[J].地理学报,2020,75(8):1699-1710.
- [29] 夏利恒,刘京,尉芳,等.陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J].农业工程学报,2021,37(5):256-264.
- [30] 宋戈,张文琦.粮食作物种植视角下东北粮食主产区耕地利用的时空分化特征[J].农业工程学报,2020,36(15):1-8.
- [31] 郭妮,王小平.遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J].干旱气象,2015,33(1):1-18.
- [32] 高军波,韩勇,喻超,等.河南省县域农作物生产空间格局演变及专业化分区研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(7):152-163.
- [33] 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.
- [34] 闫研,李忠贤.基于SPEI的河南省冬小麦生育期干旱时空特征分析[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2015,7(2):159-167.
- [35] 王晓东,马晓群,许莹,等.淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J].资源科学,2013,35(3):665-672.