

赵强强, 陈 财, 张菲菲, 等. 淮河流域冬小麦干旱时空分布特征[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 373-381.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.013

淮河流域冬小麦干旱时空分布特征

赵强强, 陈 财, 张菲菲, 高 超
(宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于1961–2016年140个气象站点的日尺度降水数据和月尺度地表温度(*LST*)、归一化植被指数(*NDVI*), 利用标准化降水指数(*SPI*)和温度植被干旱指数(*TVDI*)分别表征淮河流域气象干旱和农业干旱, 分析淮河流域冬小麦气象干旱和农业干旱时空变化特征。结果显示: (1) 气象干旱时空变化特征: 冬前生长期和灌浆成熟期降水量呈上升趋势, 越冬期和返青抽穗期呈下降趋势; 轻度干旱以上占比表现为: 冬前生长期>返青抽穗期>灌浆成熟期>越冬期。(2) 农业干旱时空变化特征: 时间上, 轻度干旱以上占比在越冬期和返青抽穗期呈上升趋势; 空间上, 冬前生长期轻度干旱以上占比明显高于返青抽穗期和灌浆成熟期, 因此有利于冬小麦的生长发育。(3) 农业干旱与气象干旱异同性: 时滞性, 冬前生长期、越冬期和返青抽穗期, *TVDI* 表征的农业干旱较 *SPI* 表征的气象干旱时滞小于1个月; 灌浆成熟期, *TVDI* 表征的农业干旱较 *SPI* 表征的气象干旱时滞1至2个月; 空间上, 在冬前生长期二者轻度干旱占比差异主要位于东部沿海地区, 在返青抽穗期和灌浆成熟期二者轻度干旱占比差异主要位于高海拔地区。而且, 从 *TVDI* 表征的农业干旱与 *SPI* 表征的气象干旱的轻度干旱占比空间分布来看, 农业干旱比气象干旱强度大。

关键词: 气象干旱; 冬小麦农业干旱; 淮河流域; 温度植被干旱指数(*TVDI*); 标准化降水指数(*SPI*)
中图分类号: S423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)02-0373-09

Spatial and temporal distribution characteristics of drought of winter wheat in Huai River Basin

ZHAO Qiang-qiang, CHEN Cai, ZHANG Fei-fei, GAO Chao
(Department of Geography and Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data, the monthly surface temperature (*LST*) and normalized difference vegetation index (*NDVI*) of 140 meteorological stations from 1961 to 2016, the standardized precipitation index (*SPI*) and the temperature vegetation drought index (*TVDI*) were used to characterize the meteorological drought and agricultural drought in Huai River Basin to analyze the temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought and agricultural drought of winter wheat. The results showed that, firstly, on the aspect of temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought, the precipitation increased in the growth period and filling maturity period before winter, decreased in overwintering period and turning green-heading stage. The proportion of drought above mild showed the following order: pre-winter growth period > returning green-heading stage > filling maturity stage > overwintering stage. Secondly, on the aspect of temporal and spatial variation characteristics of agricultural drought, drought above mild showed an upward

收稿日期: 2020-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871024)

作者简介: 赵强强(1994–), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与水文水资源研究。(E-mail) zhaoqiang-gqiangnb@163.com

通讯作者: 高 超, (E-mail) gaoqinchao1@163.com

trend in overwintering period and returning green-heading stage on the time scale, the proportion of drought above light in the growth period pre-winter was significantly higher than that in returning green-heading stage and filling maturity stage on the space scale, so it was beneficial to the growth and development of winter wheat. Thirdly, on

the aspect of the similarities and differences between agricultural drought and meteorological drought, the agricultural drought represented by *TVDI* was one month less than the meteorological drought represented by *SPI* during the pre-winter growth period, overwintering period and returning green-heading period in the comparison of time lag. At the stage of filling maturity, the agricultural drought represented by *TVDI* lagged about one to two months compared with the meteorological drought represented by *SPI*. On the spatial scale, the proportion difference of mild drought represented by *TVDI* and *SPI* mainly located in the eastern coastal area during the pre-winter growth period, and the proportion difference of the mild drought represented by *TVDI* and *SPI* in the periods of returning green-heading and filling maturity mainly located in the high altitude area. Moreover, from the aspect of the spatial distribution of agricultural drought characterized by *TVDI* and meteorological drought characterized by *SPI*, the intensity of agricultural drought was higher than that of meteorological drought.

Key words: meteorological drought; agricultural drought of winter wheat; Huai River Basin; temperature vegetation drought index (*TVDI*); standardized precipitation index (*SPI*)

干旱作为一种难以提前准确监测的自然环境灾害,最为直接的表现则体现在农业生产中,会影响作物生长发育,导致农业减产^[1-2]。在全球气候变暖的背景下中纬度地区干旱灾害频率增加^[3-4]。加强对干旱时空演变特征的研究,尤其是气候变化背景下的干旱评估和干旱监测等方面的研究是非常必要的。

农业干旱是指农作物不同生长阶段,由于降水量、土壤含水量不能满足生长需要而导致农作物产量减少的现象^[5]。气象干旱是指在较长时期,蒸发量大于降水量,或降水量异常偏少,或降水量长时间偏少而产生灾害的现象^[6]。气象干旱是农业干旱的前提,在灌溉设施不完备的地区,气象干旱是引发农业干旱的最重要因素。用单一要素分析农业干旱和气象干旱的研究中,标准化降水指数 (*SPI*)^[7]、降水量距平百分率 (*Pa*)^[8-9]、相对湿润指数 (*MI*)^[10-13]、帕默尔干旱指数 (*PDSI*)^[14-16] 等气象指标被学者广泛使用,其中,选用标准化降水指数 (*SPI*) 分析气象干旱时空变化特征和旱涝演变规律的较多。分析农业干旱特征的遥感指标主要有作物缺水指数 (*CWSI*)^[17]、温度植被干旱指数 (*TVDI*)^[18]、距平植被指数 (*AVI*)^[19]、条件植被温度指数 (*VTCTI*)^[20] 等,其中,温度植被干旱指数 (*TVDI*) 多用于分析相对干旱程度和干旱的空间变化。但是,基于标准化降水指数 (*SPI*) 和温度植被干旱指数 (*TVDI*) 分析冬小麦干旱的研究中以分析冬小麦干旱时空分布的较多,而综合分析 2 个指数空间分布异同性的较少。因此,本研究基于淮河流域近 55 年 140 个气象站点数据,以标准化降水指数表征气象干旱,分析淮河流域冬小麦气象干旱和农业干旱时空变化

特征,以及冬小麦气象干旱和农业干旱空间变化规律的异同性,为淮河流域冬小麦干旱灾害评估和监测提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

淮河流域 (111°55'~121°25'E, 30°55'~36°36'N), 流域面积约 $2.7 \times 10^5 \text{ km}^2$, 涵盖中国 5 个省份^[21-22] (图 1)。年均降水量 920 mm, 时空分布不均匀, 多集中在汛期 (6-9 月), 旱涝灾害频发^[23-24]。流域内水热充足, 适合农业作物生长, 是中国粮食主产区之一^[25]。

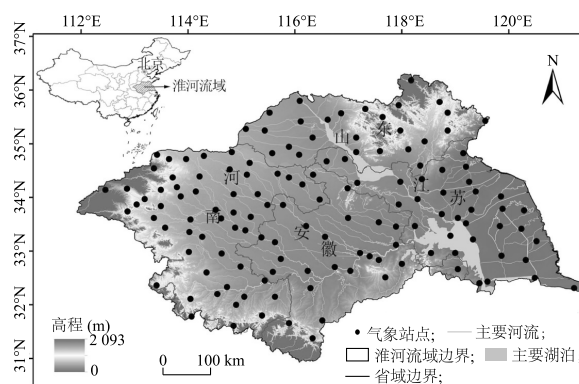


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the area studied

1.2 数据来源

淮河流域 140 个气象站点的逐日气温及降水量数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>)。遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)。

cn)。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数(*SPI*)计算 *SPI* 可以反映干旱变化状况^[26-27], 计算公式如下:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (1)$$

式中, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$, x 表示不同时间尺度的降水量, $G(x)$ 表示与 x 对应的累积概率, S 表示概率密度正负系数。*SPI* 干旱程度分级如表 1 所示。

表 1 标准化降水指数(*SPI*) 干旱程度分级

Table 1 Classification of drought degree by standardized precipitation index (*SPI*)

<i>SPI</i> 值	干旱程度
$SPI \leq -2.0$	极度干旱
$-2.0 < SPI \leq -1.5$	重度干旱
$-1.5 < SPI \leq -1.0$	轻度干旱
$-1.0 < SPI \leq 1.0$	正常
$1.0 < SPI \leq 1.5$	轻度湿润
$1.5 < SPI \leq 2.0$	重度湿润
$2.0 < SPI$	极度湿润

1.3.2 温度植被干旱指数(*TVDI*)计算 采用 T_s -*NDVI* 特征空间算法^[28], 表示为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} \quad (2)$$

式中, T_s 为给定像元的地表温度, $T_{s_{max}}$ 、 $T_{s_{min}}$ 分别为特征空间的干边和湿边。对 $T_{s_{max}}$ 、 $T_{s_{min}}$ 进行线性回归, 回归方程为:

$$T_{s_{min}} = a_1 + b_1 NDVI \quad (3)$$

$$T_{s_{max}} = a_2 + b_2 NDVI \quad (4)$$

式中, a_1 、 b_1 为 *TVDI* 干边拟合方程的系数; a_2 、 b_2 为 *TVDI* 湿边拟合方程的系数, *NDVI* 为给定像元的归一化植被指数。

1.3.3 插值方法 采用气候倾向率对长时间序列尺度的降水和干旱特征进行趋势分析^[29]。利用 M-K 趋势检验对以站点为变量的时间要素进行趋势变化检验。通过克里金法对数据进行空间插值。基于 ArcGIS10.5 软件描述气象干旱等要素的空间分布。

2 结果与分析

2.1 淮河流域气象干旱时空特征

2.1.1 冬小麦气象干旱的时间变化特征 对淮河流域 1961-2016 年冬小麦不同生育期的标准化降水指数(*SPI*)进行趋势分析, 结果如图 2 所示。冬前生长期和越冬期 *SPI* 呈上升趋势, 表明淮河流域冬小麦冬前生长期在 1961-2016 年呈现变湿趋势; 越冬期和灌浆成熟期在 1961-2016 年 *SPI* 呈下降趋势, 在此期间呈现变干趋势。返青抽穗期是冬小麦生长发育的重要阶段, 而返青抽穗阶段在 1961-2016 年降水呈下降趋势但下降趋势不显著, 可能不利于冬小麦生长发育。由于冬小麦的生长发育不仅仅受降水的影响, 还受到气温、蒸散发、下垫面等诸多因素的影响, 降水在冬小麦生长发育的重要阶段呈下降趋势是否不利于冬小麦的生长发育还需进一步研究。

2.1.2 冬小麦气象干旱的空间分布特征 通过对淮河流域 1961-2016 年的 *SPI* 轻度干旱以上占比进行空间表达分析(图 3), 轻度干旱以上占比表现为冬前生长期 > 返青抽穗期 > 灌浆成熟期 > 越冬期。冬前生长期, 轻度干旱以上占比较高的区域主要集中在西北部, 而较低且成片的区域主要分布在东部沿海地区; 返青抽穗期、灌浆成熟期和越冬期轻度干旱以上占比都有明显的纬向分布, 而且返青抽穗期和灌浆成熟期都呈南部低、北部高的特征, 但越冬期与前两者相反, 主要原因在于冬季风。

通过 Mann-Kendall 趋势检验对 *SPI* 进行趋势分析, 研究显示淮河流域在冬小麦冬前生长期呈现变湿的趋势, 尤其在冬小麦种植的平原区域最为明显; 越冬期, *SPI* 呈现南升北降的趋势, 与越冬期轻度干旱以上占比情况恰好相反, 有利于淮河流域旱情的减轻; 返青抽穗期, 西北部地区的站点 *SPI* 呈下降趋势, 与淮河流域轻度干旱以上占比较高的区域一致, 这将增加西北部地区的干旱情况; 灌浆成熟期, *SPI* 呈上升趋势的气象站点多分布在北部地区, 且占整个区域的大部分, 呈下降趋势的气象站点多出现在南部地区(图 3)。

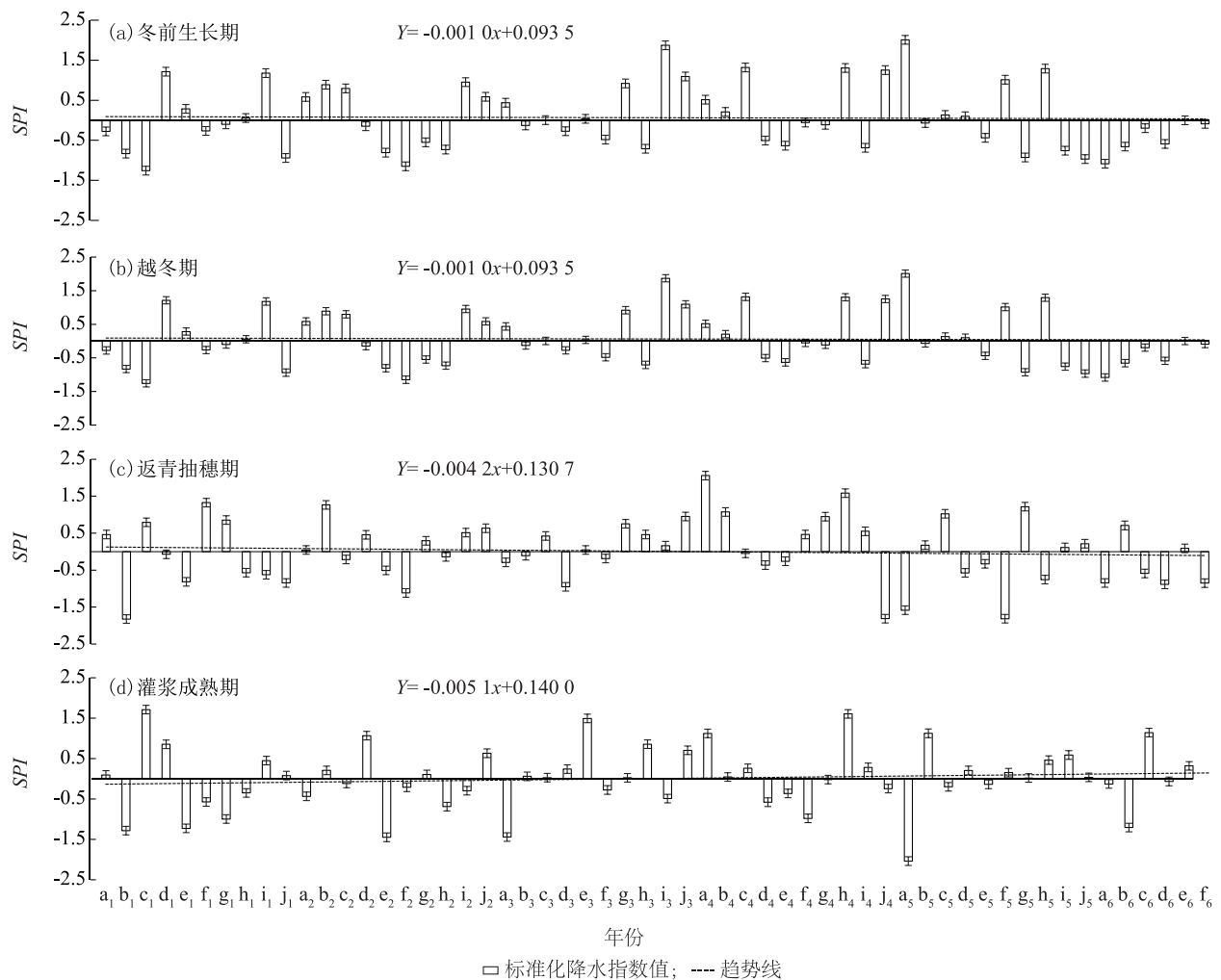
2.2 淮河流域农业干旱时空特征

2.2.1 冬小麦农业干旱的时间变化特征 如图 4 所示, 淮河流域冬小麦温度植被干旱指数(*TVDI*)轻度干旱以上占比在冬前生长期较大, 平均值为 42.69%, 其次为越冬期、返青抽穗期和灌浆成熟期,

占比分别为 37.52%、32.21% 和 25.76%。轻度干旱以上占比在越冬期和返青抽穗期在 1961–2016 年呈上升趋势,总体上有利于冬小麦的生长发育。

2.2.2 冬小麦农业干旱的空间分布特征 如图 5 所示,淮河流域冬小麦不同生育期 2000–2016 年温度植被干旱指数 (*TVDI*) 轻度干旱以上占比 (即 $TVDI \geq 0.6$) 空间分布图表明:冬前生长期,淮河流域南部干旱明显大于北部,呈现纬向分布;越冬期,

同样淮河流域南部干旱大于北部,与冬前生长期相比,干旱有所缓解;返青抽穗期,与冬前生长期和越冬期相比淮河流域轻度干旱以上占比空间分布不同,呈现从沿海至内陆递减的趋势,且轻度干旱占比较大的地区多分布在海拔相对较高的地区。灌浆成熟期,淮河流域轻度干旱以上占比空间分布同返青抽穗期较为相似,但轻度干旱以上占比高的区域整体上小于返青抽穗期。



a_1 :1961年; b_1 :1962年; c_1 :1963年; d_1 :1964年; e_1 :1965年; f_1 :1966年; g_1 :1967年; h_1 :1968年; i_1 :1969年; j_1 :1970年; a_2 :1971年; b_2 :1972年; c_2 :1973年; d_2 :1974年; e_2 :1975年; f_2 :1976年; g_2 :1977年; h_2 :1978年; i_2 :1979年; j_2 :1980年; a_3 :1981年; b_3 :1982年; c_3 :1983年; d_3 :1984年; e_3 :1985年; f_3 :1986年; g_3 :1987年; h_3 :1988年; i_3 :1989年; j_3 :1990年; a_4 :1991年; b_4 :1992年; c_4 :1993年; d_4 :1994年; e_4 :1995年; f_4 :1996年; g_4 :1997年; h_4 :1998年; i_4 :1999年; j_4 :2000年; a_5 :2001年; b_5 :2002年; c_5 :2003年; d_5 :2004年; e_5 :2005年; f_5 :2006年; g_5 :2007年; h_5 :2008年; i_5 :2009年; j_5 :2010年; a_6 :2011年; b_6 :2012年; c_6 :2013年; d_6 :2014年; e_6 :2015年; f_6 :2016年。

图2 淮河流域冬小麦不同生育期 *SPI* 趋势特征

Fig.2 Trend characteristics of standardized precipitation index (*SPI*) in different growth stages of winter wheat in Huai River Basin

通过对淮河流域冬小麦不同生育期空间干旱占比分析可得出以下规律:*TVDI* 在冬前生长

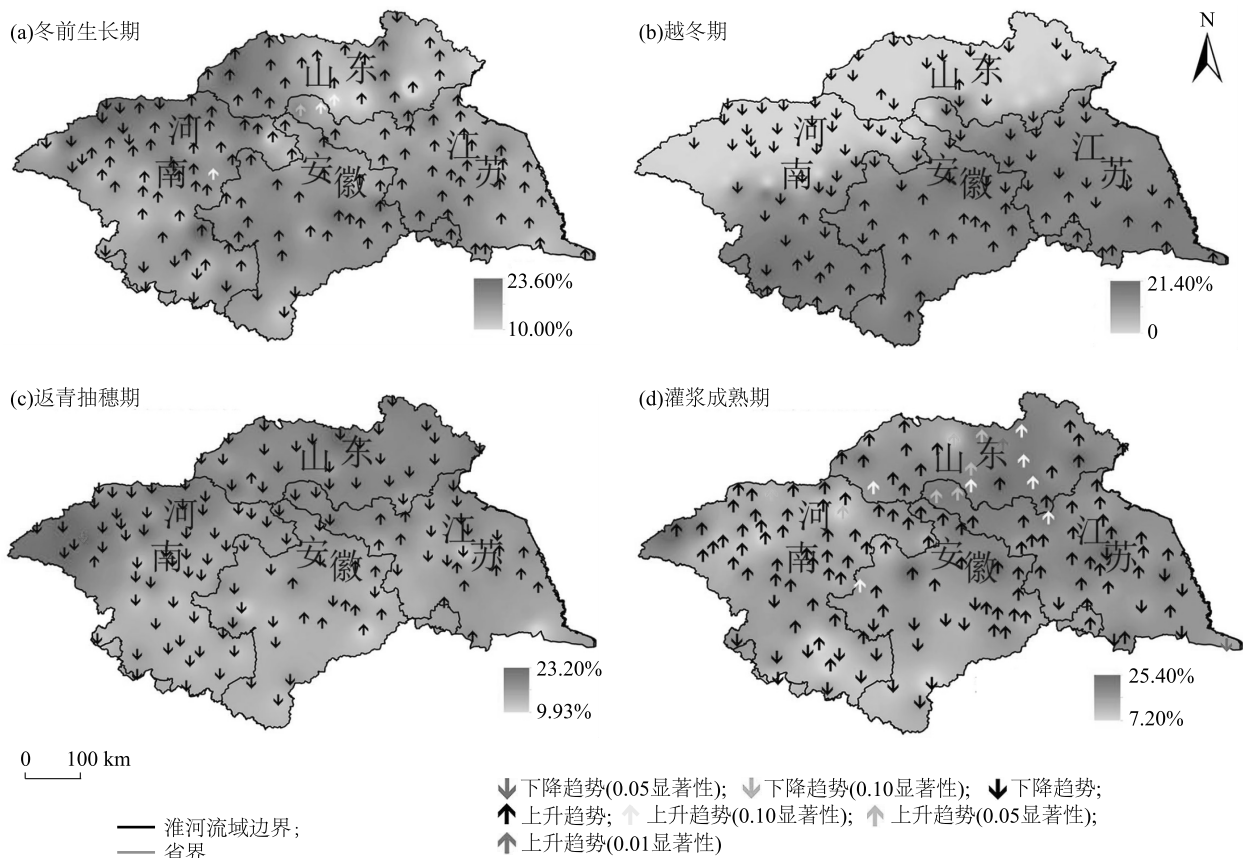


图3 淮河流域冬小麦不同生育期1961–2016 年轻度干旱以上占比以及 Mann-Kendall 趋势检验
Fig.3 Proportion of drought above mild and Mann-Kendall trend test at different growth stages of winter wheat from 1961 to 2016 in Huai River Basin

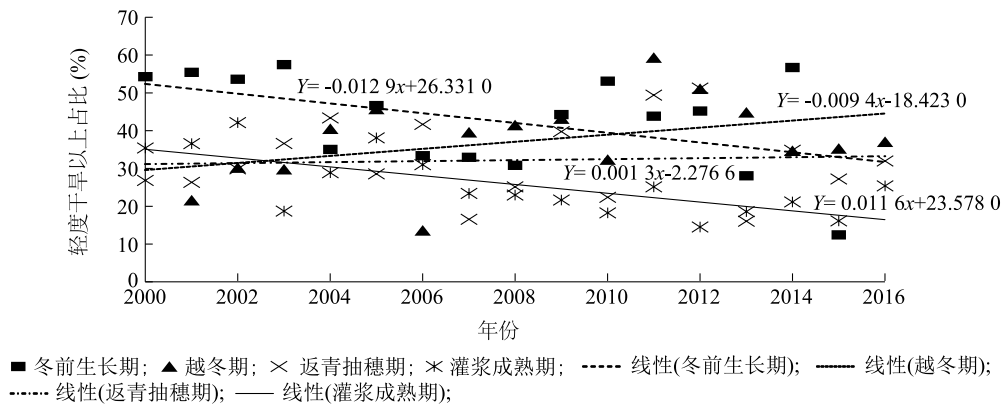


图4 淮河流域 2000–2016 年温度植被干旱指数 (TVDI) 轻度干旱以上占比
Fig.4 Proportion of drought above mild by temperature vegetation drought index (TVDI) from 2000 to 2016 in Huai River Basin

期轻度干旱以上占比明显高于其他时期,而冬前生长期和越冬期冬小麦需水量不高,返青抽穗期是冬小麦需水量多的生长阶段。冬前生长期和越冬期淮河流域轻度干旱以上占比基本一致,与纬度分布呈负相关关系。返青抽穗期和灌浆成熟期,海拔相对较高地区的干旱情况要严重于海拔较低地区,呈沿海向内陆递减的趋势。

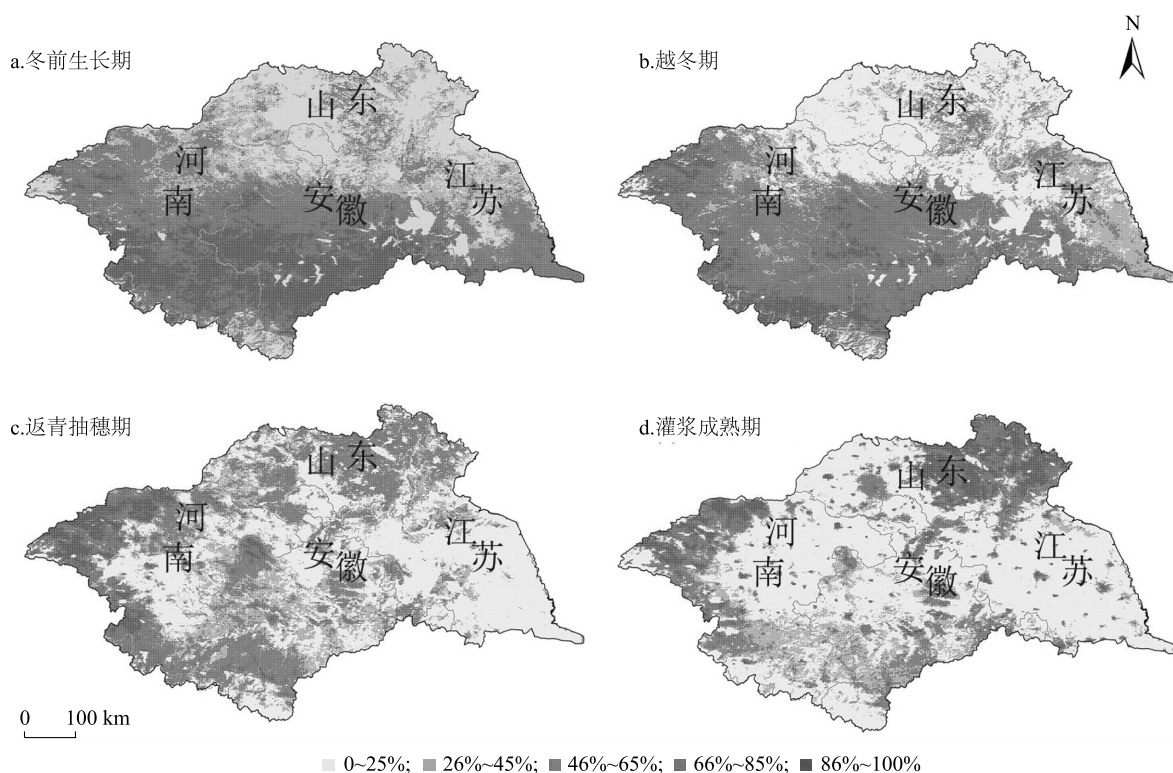


图 5 淮河流域 2000–2016 年冬小麦不同生育期温度植被干旱指数 (TVDI) 空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of temperature vegetation drought index (TVDI) at different growth stages of winter wheat from 2000 to 2016 in Huai River Basin

2.3 淮河流域气象干旱与农业干旱异同性

2.3.1 气象干旱与农业干旱的时滞性 为了探究气象干旱和农业干旱之间的时滞性,基于 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 大小的网格冬小麦种植面积对长时间序列尺度 2000–2016 年的 TVDI 和 SPI 进行提取,得到两者的相关性。考虑到农业干旱相较于气象干旱存在时滞情况,本研究分析了 TVDI 与当月 SPI 以及前 1 个月 SPI 和前 2 个月 SPI 的相关性(表 2)。冬小麦不同生育期 TVDI 与 SPI 相关性总体呈现负增长,且 TVDI 与当月的 SPI 相关性较高。冬前生长期,TVDI 与当月 SPI 相关性高值年份为 2009 年、2010 年、2012 年和 2014 年;越冬期,TVDI 与当月 SPI 相关性高值年份为 2001 年、2005 年、2007 年和 2015 年;返青抽穗期,TVDI 与当月 SPI 相关性高值年份为 2002 年、2014 年和 2015 年;灌浆成熟期,TVDI 与当月 SPI 相关性高值年份为 2004 年、2008 年和 2011 年。冬前生长期、越冬期和灌浆成熟期,TVDI 与当月 SPI 之间的相关性较高,表明淮河流域冬小麦农业干旱相较于气象干旱时滞小于 1 个月。返青抽穗期,TVDI 与当月 SPI、前 1

个月的 SPI 有较好的相关性,表明淮河流域冬小麦农业干旱相较于气象干旱时滞 1 至 2 个月。

2.3.2 气象干旱与农业干旱的空间差异性 TVDI 表征的农业干旱轻度干旱占比空间分布(图 5)与 SPI 表征的气象干旱轻度干旱占比空间分布(图 3)相比,总体上冬小麦农业干旱比冬小麦气象干旱强度大。在冬小麦不同生育期气象干旱和农业干旱轻度干旱占比空间分布存在差异(表 3),主要表现为:冬前生长期,SPI 轻度干旱占比表现为南北高,中部和东部低,TVDI 的轻度干旱占比沿纬向分布,由南至北逐渐降低,二者差异主要表现在 TVDI 的轻度干旱占比呈纬向分布的趋势更为显著;返青抽穗期,SPI 轻度干旱占比表现为沿纬向分布,由南至北逐渐降低,TVDI 的轻度干旱占比由东部沿海至西部内陆逐渐增高,轻度干旱占比较高区域主要位于高海拔地区,二者差异主要表现为 TVDI 的轻度干旱占比在高海拔地区较为显著;灌浆成熟期,SPI 与 TVDI 轻度干旱占比空间分布差异较小,差异主要表现为 TVDI 的轻度干旱占比在高海拔地区较为显著。

表 2 淮河流域冬小麦不同生育期温度植被干旱指数 (TVDI) 与当月、前 1 个月、前 2 个月标准化降水指数 (SPI) 的相关性
Table 2 Correlation of temperature vegetation drought index (TVDI) of winter wheat at different growth stages with standardized precipitation index (SPI) in the current month, the previous month and the previous two months in Huai River Basin

年份	冬前生长期			越冬期			返青抽穗期			灌浆成熟期		
	TVDI 与前 2 个月 SPI 相关性	TVDI 与前 1 个月 SPI 相关性	TVDI 与 当月 SPI 相关性	TVDI 与前 2 个月 SPI 相关性	TVDI 与前 1 个月 SPI 相关性	TVDI 与 当月 SPI 相关性	TVDI 与前 2 个月 SPI 相关性	TVDI 与前 1 个月 SPI 相关性	TVDI 与 当月 SPI 相关性	TVDI 与前 2 个月 SPI 相关性	TVDI 与前 1 个月 SPI 相关性	TVDI 与 当月 SPI 相关性
2001	0.56	0.09	-0.31	0.19	0.08	-0.43	-0.36	-0.26	0.49	0.07	0.60	-0.06
2002	-0.40	0.39	-0.23	-0.24	0.50	-0.33	0.38	-0.52	-0.49	-0.04	0.06	-0.02
2003	0.14	-0.21	0.31	0.48	0.25	-0.37	-0.11	-0.01	-0.32	-0.51	-0.43	0.27
2004	-0.37	0.23	-0.12	-0.01	-0.04	-0.03	0.13	-0.31	-0.10	0.46	-0.31	-0.36
2005	-0.49	-0.59	-0.37	0.25	-0.50	0.49	-0.18	-0.24	-0.33	0.41	-0.33	-0.07
2006	-0.35	-0.25	-0.35	0.27	0.47	-0.32	0.08	-0.43	-0.24	-0.31	0.05	-0.02
2007	0.59	-0.24	0.32	0.29	0.04	-0.50	-0.19	-0.02	-0.03	0.29	0.04	0.02
2008	-0.04	-0.16	0.39	-0.36	0.35	-0.10	-0.27	0.28	-0.16	0.08	0.06	-0.39
2009	-0.39	0.13	-0.48	-0.48	-0.60	-0.23	-0.23	-0.09	0.11	0.19	-0.47	-0.34
2010	0.10	-0.22	0.40	0.53	0.24	-0.39	0.24	-0.62	0.26	0.04	-0.01	-0.23
2011	-0.01	0.28	0.20	0.16	-0.02	-0.51	-0.41	-0.40	-0.11	0.36	-0.49	-0.57
2012	-0.57	-0.23	-0.67	-0.56	-0.33	-0.37	0.22	-0.08	-0.30	-0.22	-0.06	-0.17
2013	0.53	0.02	0.37	-0.22	-0.21	0.02	0.32	-0.15	-0.08	-0.50	0.11	-0.09
2014	0.34	0.20	-0.55	-0.02	0.37	-0.30	-0.15	-0.29	-0.24	0.10	-0.30	0.19
2015	0.13	-0.18	-0.22	-0.18	-0.51	-0.47	0.29	0.24	-0.42	-0.35	0.31	-0.12
2016	-0.30	-0.07	-0.37	-0.51	-0.19	0.38	-0.12	0.30	-0.50	-	-	-
均值	-0.03	-0.05	-0.10	-0.03	-0.01	-0.22	-0.02	-0.16	-0.15	0.00	-0.08	-0.13

表 3 淮河流域冬小麦不同生育期气象干旱与农业干旱中轻度干旱占比空间分布差异
Table 3 Spatial distribution differences of proportion of drought above mild between meteorological drought and agricultural drought at different growth stages of winter wheat in Huai River Basin

生育期	气象干旱 (SPI)	农业干旱 (TVDI)	显著差异区
冬前生长期	北部和南部高,东部沿海低	南部高,北部低,沿纬向分布	东部沿海
越冬期	南部高,北部低,沿纬向分布	南部高,北部低,沿纬向分布	-
返青抽穗期	北部高,南部低,沿纬向分布	东部沿海至西部内陆逐渐增高,轻度干旱占比较高区域主要位于高海拔地区	高海拔地区
灌浆成熟期	东部沿海至西部内陆逐渐增高	东部沿海至西部内陆逐渐增高,轻度干旱占比较高区域主要位于高海拔地区	高海拔地区

3 讨论

SPI 是一种较为普遍使用的表征多尺度、长时间序列气象干旱指标^[30-32],能够反映不同干旱类型,但未考虑蒸发的影响,无法准确判断干旱发生的起始时间。本研究采用 TVDI 表征农业干旱,即通过 LST 和 NDVI 反演土壤表层水分特征。相关研究结果表明^[33-34],LST 与 NDVI 之间具有明显的负相

关关系,土壤水分受到该关系的显著影响。因此,在进一步研究中需分析不同土壤类型,以及浅层地下水埋藏深度等与冬小麦干旱的相关性。此外,本研究仅间接用降水量和土壤相对湿度来反映冬小麦干旱时空特征以及农业干旱和气象干旱的异同性,并未考虑人类活动、冬小麦品种等可能造成干旱的因素。因此综合采用气象站点数据、遥感数据、农业活动资料数据、水文数据,有针对性地研究时空尺度上

干旱各个环节的演化,将会很好地支持淮河流域冬小麦干旱评估和监测。

研究结果显示淮河流域冬小麦不同生育期降水特征各异,但1961–2016年整体变化特征并不明显,这与相关学者研究近半个世纪以来淮河流域干旱时空特征的结果较为相似^[35-36]。*TVDI*轻度干旱以上占比在返青抽穗期较低,而该时期是冬小麦生长的关键时期,因此有利于冬小麦的生长发育。

基于Landsat系列数据反演土壤湿度,提取网格化冬小麦种植面积,得到研究区冬小麦干旱空间分布状况的方法,以及分析*TVDI*与*SPI*的时空变化异同性为本研究的创新点,在一定程度上细化了淮河流域冬小麦干旱时空分布,有利于提升基于*TVDI*与*SPI*双要素评估干旱的准确性。

农业干旱与气象干旱异同性分析结果显示,*TVDI*表征的农业干旱与*SPI*表征的气象干旱轻度干旱占比在空间分布上的差异主要位于东部沿海地区和高海拔地区。而且,研究结果显示冬小麦农业干旱比冬小麦气象干旱强度大。因此,需进一步研究淮河流域冬小麦干旱的影响因素,尤其是下垫面因素对干旱的影响,将会提高淮河流域基于多源数据评估和监测冬小麦干旱的准确度。

本研究基于1961–2016年140个气象站点的日尺度降水数据和月尺度的地表温度(*LST*)、归一化植被指数(*NDVI*),利用标准化降水指数(*SPI*)和温度植被干旱指数(*TVDI*)分别表征淮河流域气象干旱和农业干旱,分析淮河流域冬小麦生育期气象干旱和农业干旱的时空格局变化,得出以下结论:(1)气象干旱的时空格局变化:淮河流域冬小麦在冬前生长期和灌浆成熟期降水量呈上升趋势,越冬期和返青抽穗期呈下降趋势。轻度干旱以上占比表现为冬前生长期>返青抽穗期>灌浆成熟期>越冬期。(2)农业干旱的时空格局变化:在时间尺度上,轻度以上干旱在越冬期和返青抽穗期呈上升趋势;在空间尺度上,冬前生长期轻度干旱以上占比明显高于返青抽穗期和灌浆成熟期,返青抽穗期是冬小麦需水量多的生长阶段,因此有利于冬小麦的生长发育。(3)农业干旱与气象干旱的异同性:冬前生长期、越冬期和灌浆成熟期,*TVDI*与当月*SPI*之间的相关性较高,表明淮河流域冬小麦农业干旱相较于气象干旱时滞小于1个月;返青抽穗期,*TVDI*与当月*SPI*、前1个月的*SPI*有较好的相关性,表明淮河流域冬

小麦农业干旱相较于气象干旱时滞1至2个月。空间上,在冬前生长期二者轻度干旱占比差异主要位于东部沿海地区,在返青抽穗期和灌浆成熟期二者轻度干旱占比差异主要位于研究区的高海拔地区。而且,从*TVDI*表征的农业干旱与*SPI*表征的气象干旱二者在不同生育期的时滞性和轻度干旱空间占比分布来看,冬小麦农业干旱比冬小麦气象干旱严重。

参考文献:

- [1] BENISTON M, Stephenson D B. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 44(1-4): 1-9.
- [2] 苗茜,曾燕,谢志清,等. 1961–2007年淮河流域热量资源变化趋势[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(3): 548-554.
- [3] 康凌艳,芦清水,邵宏波,等. 干旱对滨洲灌区冬小麦归一化植被指数(*NDVI*)的影响[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(1): 87-93.
- [4] HUANG S Z, CHANG J X, HUANG Q, et al. Spatio-temporal changes and frequency analysis of drought in the Wei River Basin, China [J]. *Water Resource Manage*, 2014, 28(10): 3095-3110.
- [5] 孙荣强. 干旱定义及其指标述评[J]. *灾害学*, 1994, 9(1): 17-21.
- [6] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等. 气象、农业干旱指标综述[J]. *干旱地区农业研究*, 2007(1): 185-189, 211.
- [7] 王春林,陈慧华,唐力生,等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(3): 157-163.
- [8] 史建国,严昌荣,何文清,等. 气象干旱指数计算方法研究概述[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(增): 19-195.
- [9] 强皓凡,靳晓言,赵璐,等. 基于相对湿度指数的近56年若尔盖湿地干湿变化[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 172-177, 182.
- [10] 曹雯,成林,杨太明,等. 河南省冬小麦拔节-抽穗期干旱天气指数保险研究[J]. *气象*, 2019, 45(2): 274-281.
- [11] 杨志勇,袁喆,严登华,等. 黄淮海流域旱涝时空分布及组合特性[J]. *水科学进展*, 2013(5): 617-625.
- [12] 贾建英,韩兰英,万信. 甘肃省冬小麦水分盈亏指数的改进及其应用[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(4): 559-566.
- [13] 王文静,延军平,刘永林,等. 基于综合气象干旱指数的海河流域干旱特征分析[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(2): 336-344.
- [14] 张调风,张勃,王有恒,等. 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近50年气象干旱特征分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 975-984.
- [15] 王连喜,胡海玲,李琪,等. 基于水分亏缺指数的陕西冬小麦干旱特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2015(5): 237-244.
- [16] 董秋婷,李茂松,刘江,等. 近50年东北地区春玉米的时空演变特征[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 52-59.
- [17] JACKSON R D, IDSO S B. Canopy temperature as a crop water

- stress indicator [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17:1133-1138.
- [18] 程伟,辛晓平. 基于TVDI的内蒙古草地干旱变化特征分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2728-2742.
- [19] 郑宁,严平,孙秀邦,等. 基于NOAA/AVHRR卫星数据的淮北地区干旱监测[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(1): 256-259.
- [20] 王鹏新,龚健雅,李小微,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. *地球科学进展*, 2003(4): 527-533.
- [21] 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.
- [22] 高超,尹周祥,许莹. 淮河流域冬小麦主要生育期旱涝时空特征及对产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 103-111.
- [23] 高超,张正涛,刘青,等. 承灾体脆弱性评估指标的最优格网化方法——以淮河干流区暴雨洪涝灾害为例[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(3): 119-129.
- [24] 尹周祥,高超,李学文,等. 淮河上游冬小麦生长关键期旱涝灾害阈值研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(7): 100-107.
- [25] GAO C, LI X W, SUN Y W, et al. Water requirement of summer maize at different growth stages and the spatiotemporal characteristics of agricultural drought in the Huaihe River Basin, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018 (10): 1-14.
- [26] 王兆礼,黄泽勤,李军,等. 基于SPEI和NDVI的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 177-186.
- [27] GAO C, LI X W. Precipitation thresholds of drought disaster for maize in areas in front of Bengbu Sluice, Huaihe River Basin, China [J]. *Water*, 2018, 10(10): 1-18.
- [28] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国标准化委员会. 气象干旱等级: GB/T 32136-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1-21.
- [29] 刘宗元,张建平,罗红霞,等. 基于农业干旱参考指数的西南地区玉米干旱时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 105-115.
- [30] 谷鑫鑫,司剑华,卢素锦,等. 黄河源区历史时期干湿变化特征分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(23): 307-312.
- [31] EL-MAGD I, TANTON T W. Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(21): 4197-4206.
- [32] 范嘉智,谭诗琪,罗宇,等. 湖南省最适干旱指数研究及近50年干旱演变分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(15): 291-295, 306.
- [33] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等. 基于SPEI的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 227-233.
- [34] 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.
- [35] 李艳利. 基于气象数据和LST-NDVI特征空间的吉林省干旱时空分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [36] 许莹,马晓群,王晓东,等. 淮河流域冬小麦水分亏缺时空变化特征分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(9): 1138-1144.

(责任编辑:张震林)