

河北省冬小麦生育期干旱特征及成因分析

康西言^{1,2}, 李春强^{1,2}, 杨荣芳³

(1. 河北省气象科学研究所; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室; 3. 河北省气象服务中心, 河北 石家庄 050021)

摘要:利用河北省冬麦区48个气象站1965—2014年气象资料和冬小麦发育期数据,选取标准化降水蒸散指数(SPEI),以冬小麦需水量代替SPEI指数中的蒸散量,分析了河北省冬小麦生育期近50年干旱时空特征,并对干旱变化特征的成因进行了初步探讨。结果表明:(1)在不考虑轻旱的情况下,河北省冬小麦各生育期内中旱出现频率最高(9.2%~10.4%),其次是重旱(5.7%~7.4%),极端干旱出现频率最低(1.8%~2.7%)。(2)冬小麦生育前、中期中旱以上干旱发生的高频率区位于衡水、沧州,邯郸则为中、后期中旱以上干旱出现的高频率区域。(3)冬小麦全生育期1966~1968年、1971~1972年、1981~1982年、2011年干旱强度较强、范围较大,是干旱较严重的年份,其中,1968年的干旱贯穿全生育期,其它年份均为阶段性干旱。(4)冬小麦全生育期干旱强度、干旱范围随年均均呈减弱趋势,且减弱趋势通过0.01水平的显著性检验;这种减弱趋势与冬小麦需水量的减少趋势关系密切,而冬小麦需水量的减小趋势又受日照时数、风速的下降趋势影响。

关键词:SPEI指数;冬小麦;干旱;时空分布特征;河北省

中图分类号:S162.1 **文献标志码:**A

Analysis of characteristics and causes of drought for winter wheat growing period in Hebei Province

KANG Xi-yan^{1,2}, LI Chun-qiang^{1,2}, YANG Rong-fang³

(1. Meteorological Research Institute of Hebei Province; 2. Hebei Key Lab for Meteorological and Eco-environment; 3. Meteorological Service Center of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021)

Abstract: By using the meteorological data from 48 weather stations during 1965 to 2014 and winter wheat growing period data in Hebei Province, selected the SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index), taken the water requirements of winter wheat to replace the evapotranspiration in SPEI, has analyzed the drought spatial features in winter wheat growing period near 50 years, and initially discussed the causes of drought change characteristics. The results showed that: (1) Under the situation of without considering the light drought, the occurrence frequency of medium drought was the highest as (9.2%~10.4%) in winter wheat growing period, the heavy drought was the next as (5.7%~7.4%), and the extreme drought was the least as (1.8%~2.7%). (2) The high occurrence frequency regions of above medium drought was located in Hengshui and Cangzhou at the early and middle growing stages of winter wheat, but the Handan was the higher occurrence frequency region at the middle and later stages. (3) The drought with high intensity and wide range was occurred during 1968~1968, 1971~1972, 1981~1982 and 2011 in whole wheat growing period, among them the drought was run through whole growing period in 1968, but other years were total for stage drought. (4) The drought intensity and drought range in whole growing period of winter wheat was assumed a decreasing trend at 0.01 significant level. This decreasing trend was close related with the decreasing of water requirements of winter wheat, also this decreasing trend was affected by the decrease of sunshine hours and wind speed.

Keywords: SPEI index; winter wheat; drought; spatial-temporal characteristics; Hebei Province

河北省是我国冬小麦的主要产区之一,冬小麦全生育期集中于10月~翌年6月上旬。受大陆性季风气候影响,河北省年降水量分布不均,70%以上的降水主要集中在7~9月,冬小麦全生育期内的自然降水不能满足其生长需要,干旱是影响冬小麦正常生长发育的主要气象灾害。

目前干旱监测指数主要有:标准化降水指数、作物水分亏缺指数、土壤墒情、帕尔默干旱指数等,这些干旱指数均能在一定程度上反映干旱的发生、发展和变化情况,但也有其局限性。例如,作物水分亏缺指数、帕尔默干旱指数时空比较性差,标准化降水指数未考虑气温变化与水分需求对干旱的影响。2010年Vicente-Serrano等^[1]在标准化降水指数的基础上,提出了具有多时空特征的标准化降水蒸发指数(SPEI),便于不同时间与空间的对比分析,可进行干旱识别和监测,现已被广泛应用于世界范围内的干旱研究。我国学者对SPEI指数在中国区域的适用性进行了验证,认为在我国年均降水量大于200mm区域各种时间尺度SPEI均可适用^[2],并应用该指数对中国区域干旱进行了研究。例如,许玲燕等^[3]基于SPEI指数分析了云南省夏玉米生长季4个时间尺度的干旱风险时空变化特征,并验证了其于玉米减产率的正相关性;张岳军^[4]分析了太原多尺度干旱特征与气候指数的关系,高蓓^[5]、孙滨峰^[6]分别分析了东北地区干旱演变特征和时空特征,周丹等^[7]探讨了近50年华北地区干旱发生强度的时空分布特征和中度以上干旱的空间分布特征,并对干旱成因进行了分析,张玉静等^[8]分析了华北冬麦区干旱时空分布特征。

上述研究对干旱的分析均未涉及具体作物,虽然有的研究针对夏玉米、冬小麦,但实际上只是基于SPEI指数对作物生长季的干旱特征进行了分析,计算蒸散量时未考虑具体作物的生育需求,因而使蒸散量与实际情况有一定差异;并且以月尺度SPEI指数分析,没有考虑作物生育期变化的特性,容易产生偏差。因此,本研究拟基于SPEI指数,对蒸散量计算方法和时间尺度进行修订,分析冬小麦生育期的干旱特征,旨在进一步认识河北省冬小麦生育期干旱发生的规律,为抗旱及制定防灾、减灾措施提供参考依据。

1 研究区概况

冬小麦是河北省第一大粮食作物,主要种植区集中在太行山山前平原和中南部低平原,太行山浅山丘陵和冀东平原也有种植,分布在唐山、秦皇岛、

廊坊、保定、石家庄、沧州、衡水、邢台、邯郸等9个地区。冬小麦生育期间日照时数1390~1890h,平均气温5~9℃,光热条件可满足冬小麦生长需求;降水量100~150mm,蒸发量740~1100mm,蒸降差大,大部分麦区水分亏缺。

2 资料和方法

2.1 资料来源

研究所用气象资料和农业气象资料来自河北省气象局。气象资料包括气温(最高、最低)、降水、日照、相对湿度和风速等。农业气象资料取自河北省农业气象观测站,包括作物各发育期多年出现时间。由于河北省冬麦区气象站建站时间不一,为统一资料年代时间,采用48个气象站1965~2014年的资料(见图1)。

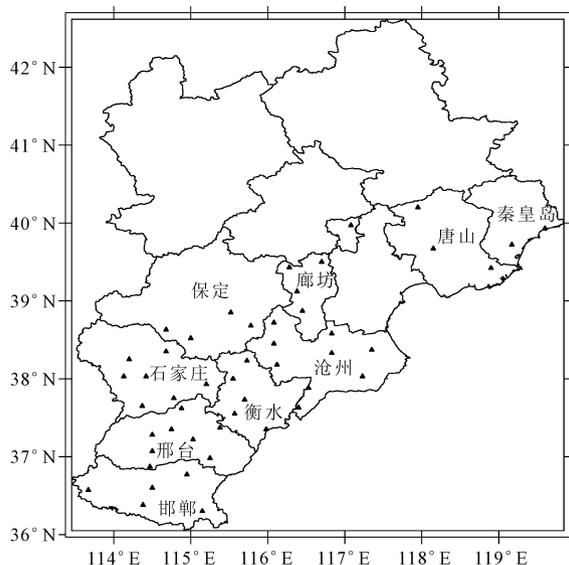


图1 研究区站点分布图

Fig. 1 The distribution of the weather stations in the research region

2.2 研究方法

2.2.1 冬小麦需水量(ET_m) 采用下式计算:

$$ET_m = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中, K_c 为作物系数,全生育期(10月1日~翌年6月10日) $K_c = 0.9$,生育前期(10月1日~2月底) $K_c = 0.58$,生育中期(3月1日~5月10日) $K_c = 1.36$,生育后期(5月11日~6月10日) $K_c = 0.7$ ^[9]; ET_0 为参考作物蒸散量,采用FAO推荐的Penman-Monteith公式^[10]计算。

2.2.2 SPEI指数 SPEI是对降水量与潜在蒸散量差值序列的累积概率值进行正态标准化后的指数。本文以冬小麦需水量代替潜在蒸散量,构建各生育阶段累积水分亏缺量序列,然后计算各生育阶段

SPEI 指数^[1]。生育前期 SPEI 指数时间尺度为 5 个月,中期近似 2 个月,后期为 1 个月,全生育期近似 8 个月。

2.2.3 干旱评估指标

(1) 干旱等级标准

文献中基于 SPEI 指数的干旱等级划分标准不尽相同^[2,11],本研究采用国际上通用的 SPEI 对应的干旱等级划分标准^[8](表 1)。

表 1 SPEI 对应的干旱等级划分

Table 1 The partition of drought grade corresponding SPEI

干旱等级 Level	无旱 None	轻度干旱 Light drought	中度干旱 Medium drought	严重干旱 Heavy drought	极端干旱 Extreme drought
SPEI 值	(-0.5,0]	(-1.0,-0.5]	(-1.5,-1.0]	(-2.0,-1.5]	(-∞,-2.0]

(2) 干旱频率

计算公式如下:

$$p_i = (n_i/N) \times 100\%$$

式中, p_i 为干旱频率, N 为计算的总年份数; n_i 为 i 站发生干旱的年份数。

(3) 干旱强度

计算公式如下:

$$S_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m SPEI_i$$

式中, S_{ij} 为研究区干旱强度, m 为发生干旱的站数(统计轻旱以上站数)。

(4) 干旱范围

应用研究区干旱发生站数占全部站数的比例表示,计算公式如下:

$$p_j = (m_j/M) \times 100\%$$

式中, P_j 为干旱范围, m_j 为第 j 年发生的站数, M 为研究区的总站数。

2 结果与分析

根据冬小麦不同生育阶段的 SPEI 指数,计算各站点不同生育阶段各等级干旱频率、研究区各等级干旱强度及干旱特征。

2.1 干旱空间分布特征

各站点干旱出现的频率反映了干旱发生的频繁程度,可揭示干旱的空间分布特征。轻旱一般对冬小麦生长造成的影响较小,故主要分析中旱以上干旱发生频率分布情况(见图 2)。

2.1.1 生育前期 由生育前期干旱频率空间分布可以看出:中旱以上干旱发生频率在 2.0%~32.7%之间(平均 17.6%),频率较高区域(20%以上)分布在保定东南部、沧州西部、石家庄东部、衡水大部

(图 2a)。中旱发生频率在 0~16.3%之间(平均 9.4%),频率较高区域(10%以上)分布在唐山局部、廊坊南部、保定南部、沧州中北部、石家庄北部和东部、衡水南部、邢台东部、邯郸东北部;重旱发生频率在 2.0%~12.2%之间(平均 6.4%),频率较高区域(8%以上)分布在保定局部、沧州西南部、石家庄西南部、衡水中部;极端干旱发生频率在 0.0%~4.1%之间(平均 1.8%),频率较高区域(3%以上)分布在秦皇岛中西部、唐山东部、廊坊和石家庄两市局部、邢台东南部、邯郸西南部和东部。

2.1.2 生育中期 由生育中期干旱频率空间分布可以看出:中旱以上干旱发生频率在 4.1%~38.8%之间(平均 19.9%),频率在 20%以上的区域较前期明显增大,主要分布在秦皇岛大部、唐山中部、沧州局部、石家庄西南部和衡水、邢台、邯郸三市大部(图 2b)。中旱发生频率在 4.1%~20.4%之间(平均 9.9%),频率较高区域(14%以上)主要分布在秦皇岛和唐山东部;重旱发生频率在 0.0%~12.2%之间(平均 7.4%),频率较高区域(8%以上)分布在:石家庄中南部、衡水大部、沧州东部、邢台中西部、邯郸中部;极端干旱发生频率在 0.0%~6.1%之间(平均 2.6%),频率较高区域(4%以上)分布在:秦皇岛、廊坊西部、保定中北部、石家庄西北部、邢台局部。

2.1.3 生育后期 由生育后期干旱频率空间分布可以看出:中旱以上干旱发生频率在 2.0%~38.8%之间(平均 18.3%),频率在 20%以上的区域主要分布在唐山西部、廊坊北部和南部、保定和石家庄两市西北部、邯郸中南部(图 2c)。中旱发生频率在 2.0%~22.4%之间(平均 10.4%),频率较高区域(14%以上)主要分布在保定西部、石家庄西北部、廊坊北部和南部、邯郸南部;重旱发生频率在 0.0%~10.2%之间(平均 5.7%),频率较高区域(8%以上)分布在沧州西南部、衡水东部、邯郸西南部;极端干旱发生频率在 0.0%~6.1%之间(平均 2.2%),频率较高区域(4%以上)分布在廊坊、保定、沧州三市的局部地区。

2.1.4 全生育期 由全生育期干旱频率空间分布可以看出:中旱以上干旱发生频率在 4.1%~36.7%之间(平均 18%),频率在 20%以上的区域主要分布在保定、石家庄北部(图 2d)。中旱发生频率在 2.0%~16.3%之间(平均 9.2%),频率较高区域(10%以上)主要分布在保定、廊坊、石家庄北部;重旱发生频率在 2.0%~14.3%之间(平均 6.1%),频率较高区域(8%以上)分布在秦皇岛、唐山、衡水三市

局部、邯郸大部;极端干旱发生频率在 0.0%~6.1% 之间(平均 2.7%),频率较高区域(4%以上)主要分布在衡水北部。

综上,各生育期中旱出现频率较高(9.2%~10.4%),其次是重旱(5.7%~7.4%),极端干旱出现频率较低(1.8%~2.7%);生育中期、后期中旱出现频率比前期明显增多,且极端干旱站点的最大值也比前期大,说明中后期干旱程度较前期严重;衡水、沧州在前、中期均为中旱以上干旱发生的高频率区域,邯郸则为中、后期中旱以上干旱出现的高频率区域,其它地区各生育阶段中旱以上干旱发生频率较高的区域分布各不相同。

2.2 干旱的时间分布特征

逐年干旱强度和干旱范围反映了干旱的严重程度,可揭示干旱的演变特征。

2.2.1 生育前期 从生育前期河北省冬麦区近 50 年干旱强度、中旱以上干旱范围变化情况(图 3)来看,研究区干旱强度整体呈现减弱趋势,且通过了 0.05 水平的显著性检验,其气候倾向率为 0.118/10a。干旱强度在中旱以上的年份为 1966~1968 年、1970~1972 年、1976 年、1980 年、1983 年、1985 年、1989 年、1991 年、1995~1996 年、1999 年、2006 年、2009 年和 2011 年。干旱范围也呈现减小趋势,各等级干旱中仅中旱以上干旱范围的减小趋势通过了 0.05 水平的显著性检验,其气候倾向率为 -4.680/10a;中旱以上干旱范围在 50% 以上的年份为 1966~1968 年、1970~1971 年、1980 年、1989 年、1999 年、2006 年和 2011 年。可以看出干旱范围大的年份,对应的干旱强度也较强。

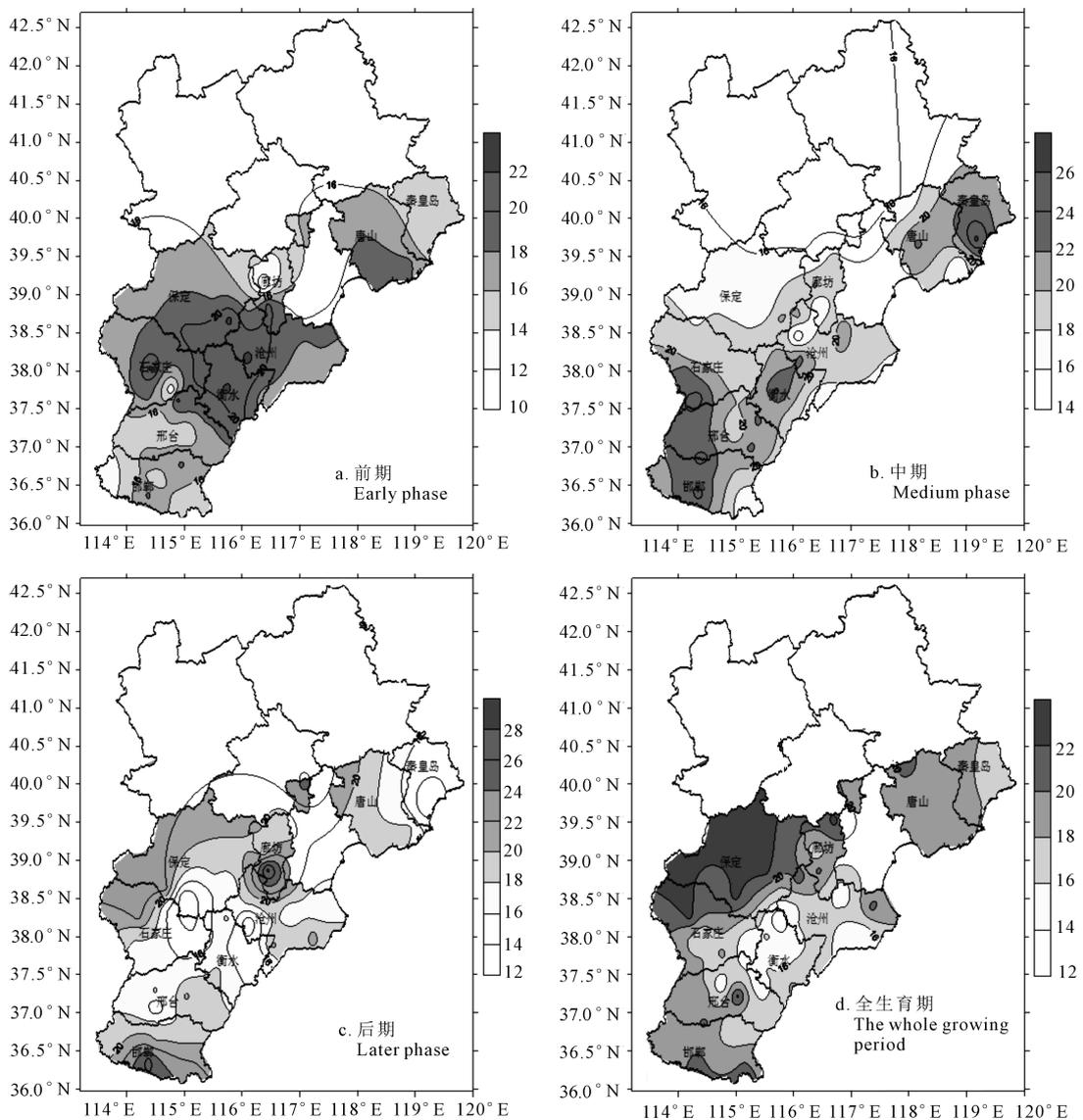


图 2 冬小麦不同生育阶段中旱以上干旱出现频率的空间分布

Fig. 2 The space distribution of the occurrence frequency above medium drought in different growing stages of winter wheat

2.2.2 生育中期 从生育中期干旱强度、中旱以上干旱范围变化情况(图 4)来看,干旱强度同样呈减弱趋势,但减弱趋势不显著,干旱强度在中旱以上的年份为 1968 年、1972~1974 年、1977~1978 年、1980~1982 年、1989 年、1997 年、2000 年、2005 年和 2014 年。干旱范围也呈现减小趋势,中旱以上、重旱以上干旱范围减小趋势均通过了 0.05 水平的显著性检验,其气候倾向率为 $-7.360/10a$ 、 $-5.009/$

10a;中旱以上干旱范围在 50%以上的年份为 1968 年、1972~1974 年、1977~1978 年、1981~1982 年、2000 年和 2005 年,干旱强度较强而干旱范围较小的年份有 1980 年、1989 年、1997 年和 2014 年。

2.2.3 生育后期 生育后期的干旱强度与生育中期相似,也呈现减弱趋势,但减弱趋势不显著,干旱强度在中旱以上的年份为 1966~1968 年、1971~1972 年、1975~1976 年、1978~1979 年、1981~1983 年、

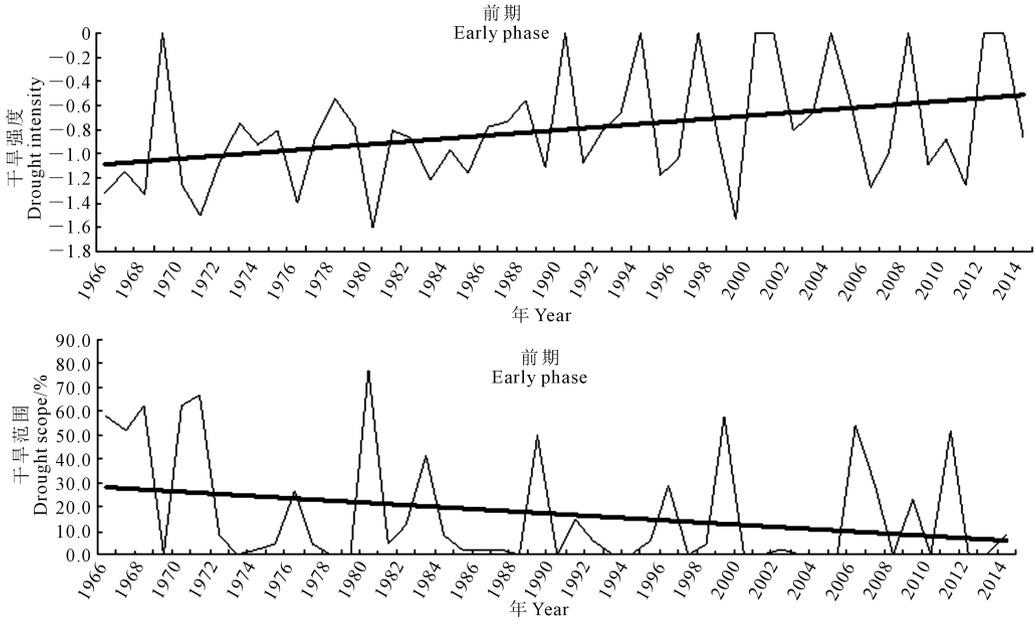


图 3 前期干旱强度、中旱以上干旱范围时间变化曲线

Fig. 3 The change curves with time of drought intensity, range above medium drought in early phase

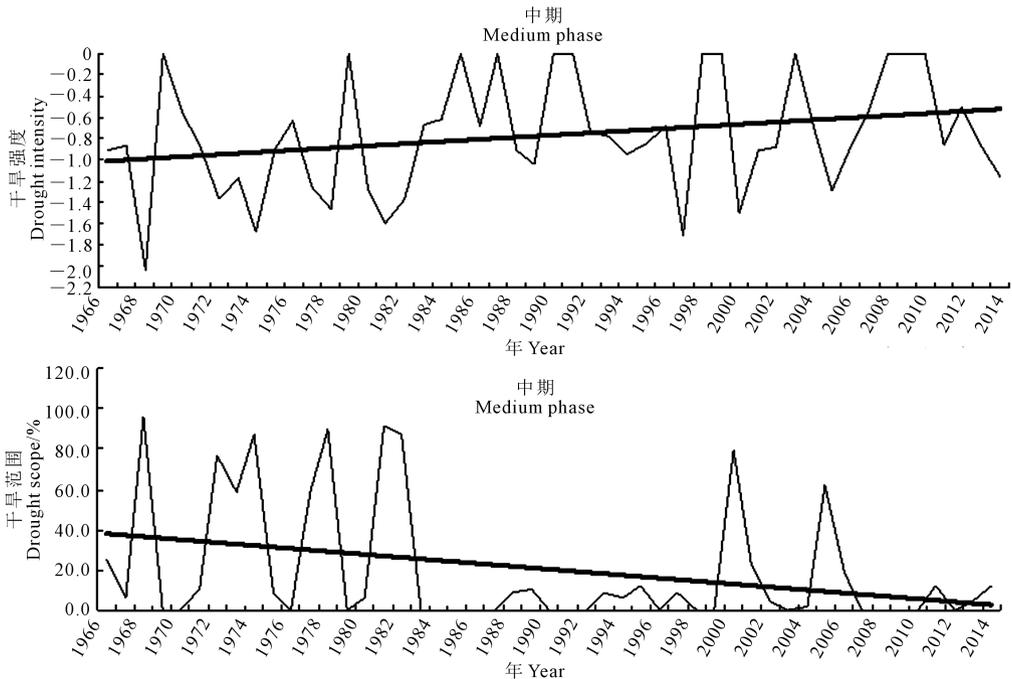


图 4 中期干旱强度、中旱以上干旱范围时间变化曲线

Fig. 4 The change curves with time of drought intensity, range above medium drought in medium phase

1986年、1994年、2001年和2011年。干旱范围同样呈减小趋势,中旱以上干旱范围的减小趋势通过了0.05水平显著性检验,气候倾向率为 $-7.836/10a$;中旱以上干旱范围在50%以上的年份为1966

年、1968年、1972年、1975年、1981年、2001年和2011年(图5),干旱强度强而干旱范围较小的年份为1967年、1971年、1976年、1978~1979年、1982~1983年、1986年、1994年。

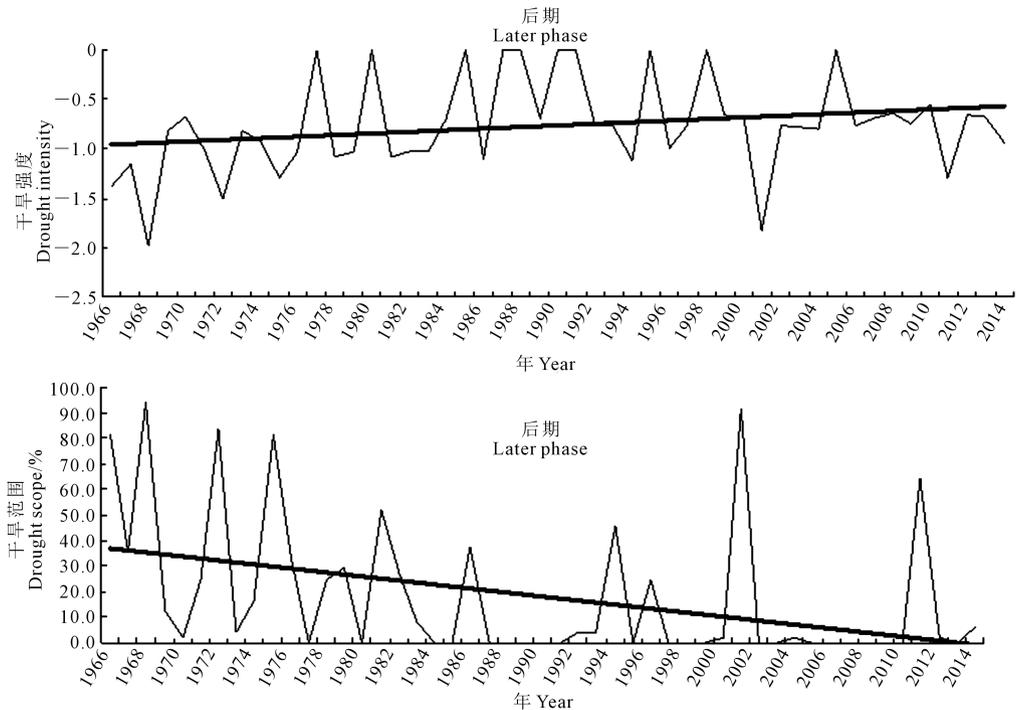


图5 后期干旱强度、中旱以上干旱范围时间变化曲线

Fig. 5 The change curves with time of drought intensity, range above medium drought in later phase

2.2.4 全生育期 全生育期干旱强度随年代呈现减弱趋势,且通过了0.01水平的显著性检验,气候倾向率为 $0.141/10a$,干旱强度在中旱以上的年份为1966~1968年、1971~1972年、1974年、1978年、1981~1982年、1986年、1994年、1996~1997年、2011年。干旱范围同样呈现减小趋势,中旱以上干旱范围减少趋势通过了0.01水平的显著性检验,气候倾向率为 $-8.476/10a$,中旱以上干旱范围在50%以上的年份为1966~1968年、1971~1972年、1981~1982年、2011年(图6)。干旱强度较强而干旱范围较小的年份为1974年、1978年、1986年、1994年、1996~1997年。

综上,冬小麦全生育期1966~1968年、1971~1972年、1981~1982年、2011年干旱强度较强、干旱范围较大,是干旱较严重的年份;其中,1968年的干旱贯穿整个生育期,1972年、1981年旱情主要出现在生育中、后期,1966年、2011年出现在前、后期,1967年、1971年出现在前期,1982年出现在中期。

2.3 干旱变化趋势的成因分析

由以上分析可知,冬小麦生育期内干旱强度、干旱范围随年代均呈减弱趋势,且以全生育期减弱

趋势最显著,因此以全生育期为例对干旱变化趋势的成因进行分析。

SPEI指数是基于降水量、冬小麦需水量计算的,将研究区各站点全生育期SPEI值与相应的降水量和需水量进行相关性分析(图略),各站SPEI指数与降水量呈正相关关系,且相关性均通过了0.001水平的显著性检验,其中,相关系数最高达到了0.937,最低也达到了0.730;各站SPEI指数与需水量呈负相关关系,相关性也均通过了0.001水平的显著性检验,相关系数为 $-0.657 \sim -0.906$ 。同时,冬麦区区域平均降水量年际变化呈增加趋势,但增加趋势不显著,冬小麦需水量减少趋势通过了0.001水平的显著性检验,气候倾向率为 $-14.5mm/10a$,说明冬小麦生育期内干旱强度、干旱范围的减弱趋势与冬小麦需水量的减少相关。

冬小麦需水量可以分为由天气气候决定的参考作物蒸散量和作物系数两部分,其中,参考作物蒸散量受气温、风速、日照时数、相对湿度等气象要素影响。表2给出了各气象要素与冬小麦全生育期需水量的相关系数。

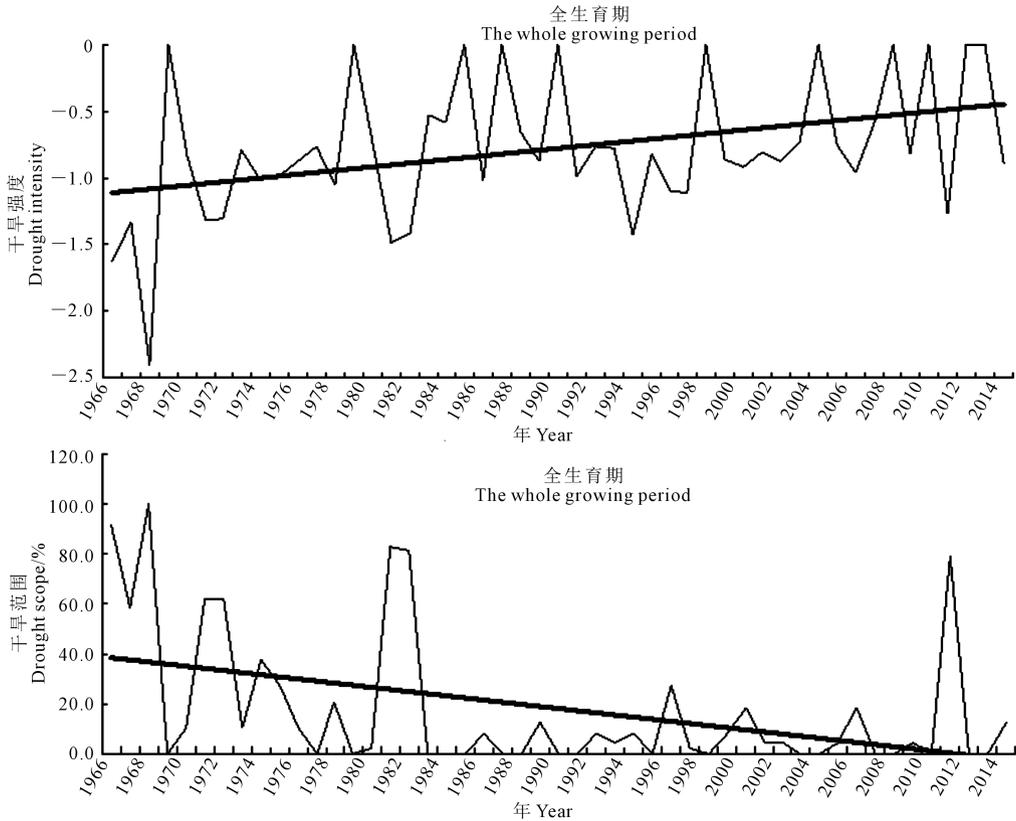


图 6 全生育期干旱强度、中旱以上干旱范围时间变化曲线

Fig. 6 The change curves with time of drought intensity, range above medium drought in whole growing period

表 2 冬小麦全生育期需水量与气象要素的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between water requirements of winter wheat in whole growing period with meteorological factors

气象要素 Meteorological factors	最高气温 Maximum air temperature	最低气温 Minimum air temperature	日照时数 Sunshine hours	风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
相关系数 r Correlation coefficient	0.319*	-0.412**	0.819***	0.685***	-0.683***

注: *、**、*** 分别表示通过 0.05、0.01、0.001 水平的显著性检验。

Note: *, **, *** representing significant text of 0.05, 0.01, 0.001 levels, respectively.

可以看出,需水量与最高气温、日照时数、风速呈正相关,与最低气温、相对湿度负相关,相关系数均通过 0.05 水平的显著性检验,尤其日照时数、风速、相对湿度通过 0.001 水平的极显著性检验。同时,最高气温、相对湿度的年际变化趋势不显著,最低气温上升趋势显著,日照时数、风速均呈显著的下降趋势,表明需水量的减少趋势主要是由日照时数减少和风速下降引起的。

根据参考作物蒸散量(ET_0)的计算公式,地表净辐射(R_n)与 ET_0 呈线性关系,即 R_n 越大 ET_0 越大,而日照时数的多少反映了 R_n 的大小,所以由于日照时数呈显著减少趋势,从而引起 ET_0 减小;风速(U_2)与 ET_0 呈非线性关系,但对分子项的影响大于分母项,所以风速减小参考作物蒸散量也出现下降趋势。

综上,日照时数的减少和风速的下降使参考作

物蒸散量减少,从而引起冬小麦需水量的减少,需水量的下降导致冬小麦生育期内干旱强度、干旱范围的减弱。

3 结 论

通过对河北省冬小麦各生育阶段干旱强度、干旱范围以及各等级干旱出现频率进行分析,结果表明:

(1)在不考虑轻旱的情况下,河北省冬小麦各生育期中旱出现频率最高(9.2%~10.4%),其次重旱(5.7%~7.4%),极端干旱出现频率较低(1.8%~2.7%);生育中期、后期中旱出现频率比前期增多,极端干旱站点的最大值也比前期大,说明中、后期干旱程度较前期严重。

(2)衡水、沧州在冬小麦生育前、中期均为中旱

以上发生的高频率区域,邯鄹则为冬小麦生育中、后期中旱以上干旱出现的高频率区域,其它地区各生育阶段中旱以上干旱发生频率较高的区域分布各不相同。

(3)冬小麦全生育期 1966~1968年、1971~1972年、1981~1982年、2011年干旱强度较强、干旱范围较大,是干旱较严重的年份;其中,1968年的干旱贯穿整个生育期,1972年、1981年旱情主要出现在生育中、后期,1966年、2011年出现在生育前期和后期,1967年、1971年出现在生育前期,1982年出现在生育中期。

(4)冬小麦全生育期干旱强度、干旱范围随年际均呈减弱趋势,且减弱趋势通过 0.01 水平的显著性检验;相关分析表明,这种减弱趋势与冬小麦需水量的减少趋势关系密切,而冬小麦需水量的减小趋势又受日照时数、风速的下降趋势影响。

4 讨论

对 SPEI 指数中蒸散量计算方法进行修订后,分析冬小麦生育期的干旱特征,结果表明,全生育期干旱强度、干旱范围随年际均呈显著减弱趋势,与以往研究结论有一定差异,例如张玉静等^[8]利用 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散量,得到 SPEI 指数分析了华北冬麦区干旱时空分布特征,表明干旱发生的频率加大、程度加重,与本文的研究结论不一致,这可能与蒸散量的计算方法不同有关,Thornthwaite 方法仅考虑了温度因子对潜在蒸散量的贡献,而 Penman-Monteith 公式则综合考虑了热量和空气动力两个因子,有研究表明^[11],随着气候变暖,空气动力因子对潜在蒸散量贡献明显增加。

冬小麦全生育期需水量减少的气象原因主要是日照时数减少和风速下降,这一研究结果与安月改等^[12]、李春强等^[13]“影响河北省参考蒸散下降的主要原因是风速下降和日照减少”的研究结论一致。随着气候变暖,全球大部地区出现了蒸发皿蒸发和参考作物蒸发下降的趋势^[14-18],其主要原因包括:受气溶胶影响,太阳辐射和日照时数减少,用于蒸发的能量减少;风速下降,用于蒸发的动力减少。

另一方面,影响冬小麦需水量的因素还有土壤和农业技术措施等,据估算^[19],利用华北冬小麦干旱综合防御控制技术,可使冬小麦需水量减少 0.4%~16.5%,平均减少 8.3%。同时,随着 CO₂ 浓度增加,植物(作物)水分利用效率也在提高^[20]。因此,影响冬小麦生长发育需水量变化的原因是综合的。

在当前气候变化背景下,河北省冬小麦全生育

期需水量呈减少趋势,将在一定程度上缓解农业用水压力,说明气候变化对水资源和水分利用的影响是多方面的。因此,在研究气候变化对水资源的影响时,不能仅考虑单一的水分供应,而应该全面考虑作物的需水和农业生产技术的改进等因素,这样才可以避免得出片面的结论。

参考文献:

- [1] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1696 - 1718.
- [2] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(5): 617 - 625.
- [3] 许玲燕, 王慧敏, 段琪彩, 等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析 [J]. *资源科学*, 2013, 35(5): 1024 - 1034.
- [4] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1418 - 1424.
- [5] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 等. 基于 SPEI 的 1961—2012 年东北地区干旱演变特征分析 [J]. *中国农业气象*, 2014, 35(6): 656 - 662.
- [6] 孙滨峰, 赵红, 王效科. 基于标准化降水蒸发指数 (SPEI) 的东北干旱时空特征 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 22 - 28.
- [7] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(4): 192 - 202.
- [8] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析 [J]. *生态学报*, 2015, 35(21): 7097 - 7107.
- [9] 韩淑敏, 程一松, 胡春胜. 太行山山前平原作物系数与降水年型关系探讨 [J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 152 - 158.
- [10] 段永红, 陶澍, 李本纲. 北京市参考作物蒸散量的时空分布特征 [J]. *中国农业气象*, 2004, 25(2): 22 - 25.
- [11] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析 [J]. *大气科学*, 2015, 39(1): 23 - 36.
- [12] 安月改, 李元华. 河北省近 50 年蒸发量气候变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 159 - 162.
- [13] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近 35 年 (1965—1999 年) 参考作物蒸散量的时空变化 [J]. *中国农业气象*, 2008, 29(4): 414 - 419.
- [14] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 2002, 298: 1410 - 1411.
- [15] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 1995, 377: 687 - 688.
- [16] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J]. *Agri Fore Meteorol*, 1997, 87: 55 - 73.
- [17] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002 [J]. *Int. J. Climatol.*, 2004, 24: 1077 - 1090.
- [18] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(13): 2665 - 2668.
- [19] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 170 - 174.
- [20] Matthews D. The water cycle freshens up [J]. *Nature*, 2006, 439: 793 - 794.