

番聪聪,胡正华,黄 进,等. 河北省夏玉米生长季干旱时空特征及对夏玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(10):69-74.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.10.018

河北省夏玉米生长季干旱时空特征 及对夏玉米产量的影响

番聪聪^{1,2}, 胡正华^{1,2}, 黄 进², 申双和^{1,2}, 尤新媛²

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/大气环境中心,江苏南京 210044;

2. 南京信息工程大学应用气象学院/江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044)

摘要:河北省作为夏玉米主要生产地,由于降水时空分布不均,干旱频发,威胁粮食安全。基于 1961—2014 年河北省 19 个气象站点降水数据,计算标准化降水指数(standardized precipitation index,简称 SPI),通过 ArcGIS 得到干旱的空间分布,并对 SPI 进行 MK 趋势检验,研究夏玉米生长季干旱特征。运用 SPSS 软件,对 SPI 与夏玉米产量进行相关性分析。结果表明,短时间尺度的 SPI 指数能够较好地描述河北省干旱实际情况。20 世纪 90 年代后干旱发生次数多于 20 世纪 90 年代前。生长季内,6—9 月干旱频率分别为 15.8%、16.4%、16.3%、14.7%,7—8 月干旱发生情况较为严重,且 SPI 呈下降(变干)的趋势,干旱趋势显著。在空间分布上,张家口、遵化、南官站干旱发生频率较高,均达到 17.6% 以上。邢台、承德、围场则较为湿润,干旱发生频率在 13.9% 以下。总体来看,河北省东北部和南部干旱发生频率小,西北部和中部干旱频率较高。玉米产量与 SPI 在 7—8 月相关性显著。

关键词: 干旱; 夏玉米; 标准化降水指数; 产量; 河北省

中图分类号: S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)10-0069-06

干旱是指在一定时期内无降水或降水量偏少引起土壤水分亏缺,从而不能满足作物正常生长所需水分的一种气候现象^[1]。干旱具有普遍性和危害性,据统计,全球范围内气象灾害引起的损失约占自然灾害总损失的 85%,其中干旱造成的灾损占 50% 左右^[2]。中国作为农业大国,干旱已成为当前最主要的农业气象灾害,每年平均干旱受灾面积约为 $2.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占各类灾害的 40% 以上,粮食损失达到 $1.2 \times 10^{10} \text{ kg}$ ^[3-4],探究干旱的特征及干旱对农作物的影响很有实际意义与价值。

IPCC 第 5 次评估报告指出,未来气温将继续上升,而中纬度地区的平均降水将减少,会使干旱发生频繁^[5-6]。河北省位于中纬度,面对严峻的干旱形势,对干旱进行监测就显得十分必要。在干旱时空动态的监测方法中,气象指数法具有一致性高、计算简便快捷、对干旱反应灵敏、时间尺度灵活、数据易获取等优点,在我国干旱研究中被广泛应用。其中指数 SPI,采用降水量(干旱形成中的决定性因素)来计算干旱状况,不仅计算过程简便,而且对干旱反应敏捷,标准化后在不同区域和不同时间尺度上都具有可比性^[7-8]。其中,Guttman 通过对比帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index,

PDSI)和 SPI,得出 SPI 比 PDSI 更具有统计上的一致性^[9]。Wu 等研究表明,降水序列时间尺度越长,SPI 的结果越可靠,在干旱气候条件下,应更注重干旱持续时间,不再只是关注干旱强度^[10]。袁平等对我国不同气候区的 SPI 及 Z 指数进行比较,得出 SPI 消除了降水的时空分布差异,在各区域和各尺度均能很好地反映旱涝状况,优于广泛应用的 Z 指数的结论^[11]。张利利等在石羊河流域的研究得出,不同时间尺度 SPI 对降水量变化的敏感程度存在较大差异,时间尺度越小,SPI 对一次降水的反应越明显^[12]。张建平等在西南地区的研究表明,月尺度的 SPI 指数与土壤湿度相关性明显,与气象类干旱监测指数 Pa 和 MI 也都呈显著性相关^[13]。车少静等利用 SPI 分析了河北省旱涝时空变化分布特征,从年际和季节角度分析了旱涝状况^[14]。闫峰等则基于栅格尺度的 SPI 对河北省的干旱时空分布特征进行了刻画^[15]。本研究选取 54 年的 SPI 作为干旱指标,用来反映干旱特征。

虽然基于 SPI 指数的干旱研究众多,但大多数研究使用的 SPI 尺度为 3 个月(季节尺度)或 12 个月(年尺度),本研究则使用 1 个月尺度的 SPI 值,讨论在短时间尺度上 SPI 指数的适用性,及其表现出的干旱特征。在验证 SPI 指数的适用性上,很多研究均为 2 种或多种干旱指数相互比较^[16-19],并未与实际干旱情况作对比。短时间尺度的 SPI 指数能更好地反映短时降水等对农作物的影响,这样的干旱情况能更好地与农作物的水分关键期相结合,因此本研究选取短时间尺度的 SPI。研究区域为河北省,地处华北平原北部,大陆性季风气候使得该省旱涝灾害频发。特别是 20 世纪 80 年代以来,由于气候变化极端气象事件增多,干旱发生越发频繁。根据相关资料,河北省每年的受旱面积平均达到 238.3 万 km^2 。河北省为夏玉米的主要种植省份,玉米是其第二大粮食作物,

收稿日期:2017-12-01

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(编号:GYHY201506001-6);江苏省“六大人才高峰”项目(编号:2014-NY-015)。

作者简介:番聪聪(1992—),女,云南保山人,硕士研究生,主要从事农业气象灾害风险评估方面的研究。E-mail:20151212165@nuist.edu.cn。

通信作者:胡正华,博士,教授,主要从事农业应对气候变化的研究。E-mail:zhhu@nuist.edu.cn。

干旱灾害会严重威胁到粮食安全,对该区域夏玉米生长季内的干旱研究具有重要意义。本研究将基于 1 个月尺度的 SPI 值,用实际的干旱情况验证短时间尺度的 SPI 的适用性,研究河北省夏玉米生长季(6—9 月)的干旱时空分布特征,将干旱的描述更加精细化,同时分析研究区域的干旱变化趋势,为今后的干旱灾害评估做准备,并针对夏玉米这一作物,探究 SPI 与其生长之间的关系,结合干旱特征为保障该区域的粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况及资料来源

河北省位于 $113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50'E$, $36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}40'N$ 之间,总面积 1 885 万 km^2 。冬季寒冷干燥,夏季炎热湿润,降水量分布特点为东南多西北少,降水主要集中在夏季,且主要为暴雨形式,旱涝灾害频繁,干旱已成为当地的主要气象灾害。

本研究采用的数据来自于河北省 19 个地面气象站点 1961—2014 年的气象资料,站点分布见图 1。夏玉米 1980—2011 年的产量数据来自于河北省 19 个农业气象站点。1995—2014 年受灾面积数据来自于河北省农村统计年鉴。

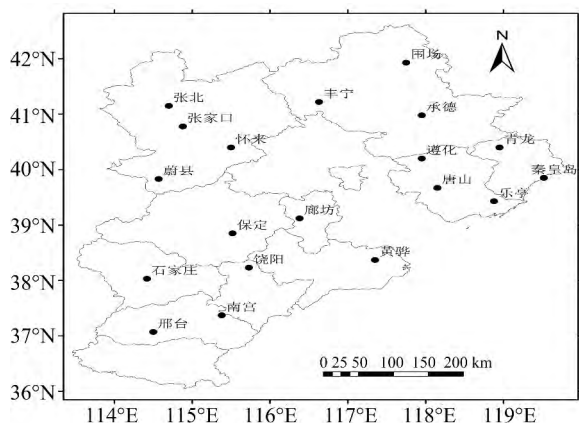


图1 河北省 19 个地面气象站点分布

1.2 计算方法

1.2.1 SPI 指数 SPI 是由 McKee 等在 1993 年创建的干旱指标,主要从降水量的角度来量化干旱。首先假设某一时段的降水量服从 Gamma 概率,再通过正态标准化,然后使用近似式计算最终得到 SPI 值。SPI 的计算方法具体参见文献 [20]。本研究选取的是 1 个月短时间尺度的 SPI,代表区域短时间内的水分盈亏情况,能够较好地反映农作物的水分供给状况。

干旱等级划分参照 McKee 等干旱等级标准 [21] (表 1)。SPI ≤ -1.0 为干旱发生临界界限。

表 1 SPI 等级分类

SPI 值	类型	累积概率	临界值
$-1.0 < SPI \leq 1.0$	正常	0.841 3	1.0
$-1.5 < SPI \leq -1.0$	中旱	0.158 7	-1.0
$-2.0 < SPI \leq -1.5$	重旱	0.066 8	-1.5
$SPI \leq -2.0$	极端干旱	0.022 8	-2.0

1.2.2 干旱评估指标

1.2.2.1 干旱频率(P_i) P_i 用来表征站点有资料年份内发生干旱频繁程度 [22],可用以下公式表示:

$$P_i = (n/N) \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为发生干旱的年数; N 为站点有气象资料的总年数; i 指代不同站点代号。

1.2.2.2 干旱站次比(P_j) P_j 是以某区域内干旱发生站点数占全部站数的比例来评价干旱影响范围的大小,能表示一定区域里干旱发生范围的大小,计算公式如下:

$$P_j = (m/M) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为发生干旱的站点数, M 为研究区域内总气象站点数, j 指不同年份代号。

1.2.2.3 较差值 z 为量化 2 组数据差异的一个统计数,计算公式如下:

$$z = (k_e/E - k_i/F) / (k_e/E) \quad (3)$$

式中: k_e 为受灾面积, k_i 为 12 个月的干旱站次比总和; E 为受灾面积的阈值, F 为站次比的阈值。

1.3 统计与分析

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验法 干旱变化趋势及显著性采用气象学中常用的 Mann-Kendall 趋势检验(简称 MK 检验),对 SPI 指数的时间序列进行趋势检验。MK 检验是一种检验时间序列变化趋势的非参数检验方法,由于允许缺测值存在,且不用证明数据服从一定的分布,使用方便 [23]。

1.3.2 反距离权重插值法 在 ArcGIS 中利用空间分析(spatial analysis)模块,通过反距离权重(inverse distance weighted, IDW)插值法绘制出干旱频率的空间分布图。其中, IDW 是一种常见、易于操作的空间插值方法,以插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。

1.3.3 相关性分析 运用 SPSS 软件对 19 个站点 1980—2011 年的 SPI 与夏玉米产量进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 生长季干旱时间特征

2.1.1 干旱站次比时间变化 站次比能够代表研究区域的干旱发生范围,将整年发生干旱的站次比与统计年鉴中对应年的干旱受灾面积进行对比,讨论 1 个月尺度的 SPI 在河北省的适用性。从图 2 中可以看出,河北省 1995—2014 年干旱受灾面积与计算出的干旱站次比的变化趋势大致相同。其中,2000、2006—2012 年等站次比表征的干旱范围与实际受灾面积出入略大,总体上 2005 年前变化趋势更相近,而 2005—2014 年二者虽然趋势相似,但站次比的情况比实际受灾面积更严重些。为了量化对比二者间的差异,将受灾面积与 SPI 值分别除以其自身阈值,得到的比值差再除以受灾面积的比值,得到归一化后的较差值进行分析。较差值 z 越小说明二者间变化差异越相近,其中 2001—2003 年的数值小于 0.1,变化十分相近。且除了 2011、2012 年的数值小于 -1,其余的都在 -1.9 和 0.6 之间波动。所以 1 个月尺度的 SPI 值能够反映出河北省干旱情况,有较好的适用性。

将 6—9 月的干旱站次比数据进行分析,夏玉米生长季内站次比的年平均值为 15.8%,最大站次比出现在 2000 年,1973 年则没有干旱发生。1961—2014 年 6—9 月各个月发生干旱的站点数分别为 162、168、167、151,表明每个月发生干

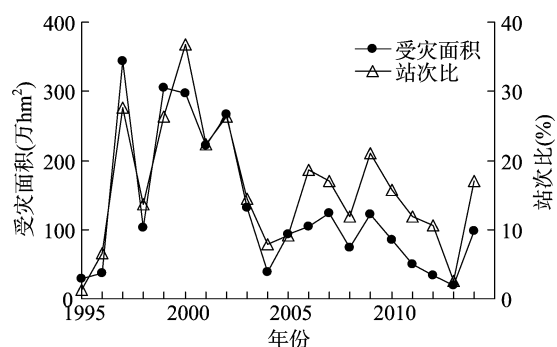


图2 河北省干旱受灾面积与干旱站次比随时间变化的对比

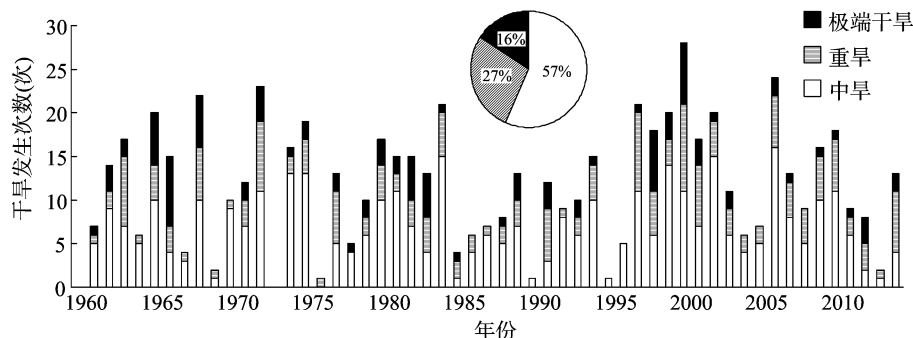


图3 河北省6—9月不同等级干旱发生次数的时间变化

2.2 生长季干旱空间特征

2.2.1 干旱频率分布特征 从图4可以看出,河北省1961—2014年6—9月发生干旱的频率均在9%~24%之间,总体干旱状况比较严重。遵化、张家口、南宫这3个站点,4个月的干旱频率均达到了16.7%以上,相对其他站点干旱较为严重;张北、怀来、石家庄、饶阳、丰宁、唐山、青龙这7个站点干旱频率起伏较大,容易引发农作物旱灾;蔚县、邢台、围场、承德这4个站点,干旱频率较低,均在16.7%以下,表明降水较为丰沛,发生干旱情况偏少。通过6—9月4个月的相互对比,9月降水最多,干旱发生最少,月平均干旱频率为14.7%;7月干旱情况较为严重,月平均干旱频率为16.4%;6月除了个别干旱频率高,其他站点干旱频率较低;8月西北和东部干旱频率较高。

2.2.2 干旱趋势分布特征 运用MK检验对SPI的时间序列做趋势分析,河北省6—9月SPI的趋势空间分布见图5,以通过0.05、0.01显著水平分别为显著和极显著。从图5可以看出,6—9月中,有显著或极显著下降趋势的站点共19个,占25%;显著或极显著上升的站点11个,占14.5%。各个月份之间的趋势变化存在差异,表现出时间和空间上的复杂性。河北省6月和9月SPI呈现上升的趋势,分别有31.6%、57.9%的站点有变湿润的趋势,主要为唐山、青龙、饶阳等几个站点,分布于河北省东部靠海区域。7月和8月的SPI变化则呈现出下降的趋势,7月有31.6%的站点变干,分别为围场、青龙、唐山、蔚县、保定这几个站点,8月则有高达68.4%的站点会变干燥,分布于河北省东部、西北部及南部,范围较大。综合来看,唐山、青龙、张北、黄骅、石家庄、邢台这些站点在不同月份有不同的变化趋势,即月份间的干湿差异更加明显;只有秦皇岛和丰宁无变干的趋势,且秦皇岛的9月降水将增多,其他站点在7月和8月都有或多或少的变干趋势,所以

旱的范围面积相差不大,均在25%左右。

2.1.2 干旱发生次数时间变化 基于SPI值,整理出1961—2014年河北省发生不同等级干旱的次数(图3)。在干旱类型分布中,中旱占比最高,为57%,重旱占27%,极端干旱发生次数最少,为16%,越严重的干旱发生的次数越少。从年际变化来看,干旱发生次数没有明显的规律。以年代际干旱发生均次来分析,20世纪60、70、80年代干旱发生均次为11.9、10.9、11.9次;20世纪90年代、21世纪10年代则达到13.9、14.1次,20世纪90年代后干旱发生明显增多,干旱形势越发严峻。

河北省干旱情形可能出现更加严重的状况。

2.3 干旱与夏玉米产量的关系

SPI值与夏玉米产量的相关性见表2,从各月上来看,7月、8月呈显著性相关的站点多于6月、9月。其中,6月19个站点仅有怀来和廊坊分别呈显著和极显著相关,占比为10.5%;9月仅邢台1个站点有显著相关性;7月有4个站点呈显著相关,4个站点呈极显著相关,占比达42.1%;8月有3个站点呈显著相关,1个极显著相关,占21.1%。由于在夏玉米的出苗期(大约6月中下旬)降水量的不足对产量的形成影响并不明显;9月夏玉米处于乳熟期,降水量对于其产量的影响也较小。而7—8月是夏玉米的拔节—抽雄—开花期,是关键的水分敏感生育期,其中7月,夏玉米正在7叶—拔节的生长时期,干旱影响会更加明显地作用到产量上;8月为夏玉米抽雄—灌浆期,开始转为生殖生长阶段,干旱会直接对穗数产生影响。从站点分布上来讲,总体来说河北中部区域站点相关性较显著。

3 讨论

3.1 1个月尺度SPI指数的适用性

采用了1995—2014年河北省实际干旱受灾面积与计算出的站次比进行对比,发现以1个月为尺度计算得到的SPI指数,能够反映出河北省的干旱状况。将1个月、3个月、12个月尺度的SPI计算出的站次比与实际干旱面积的较差值对比,结果显示3个尺度较差范围分别为-1.9~0.6、-5.1~0.4、-4.1~0.2,1个月尺度的较差值的波动较小,而3个月尺度和12个月尺度则在1995、1996、2011—2013几年中较差值均小于-2,在时间序列的前后部分都出现较大差异,所以本研究选择1个月尺度的SPI作为干旱指标。研究中发现降水的累积效应并不明显,仅考虑短时间尺度的降水,也能很好

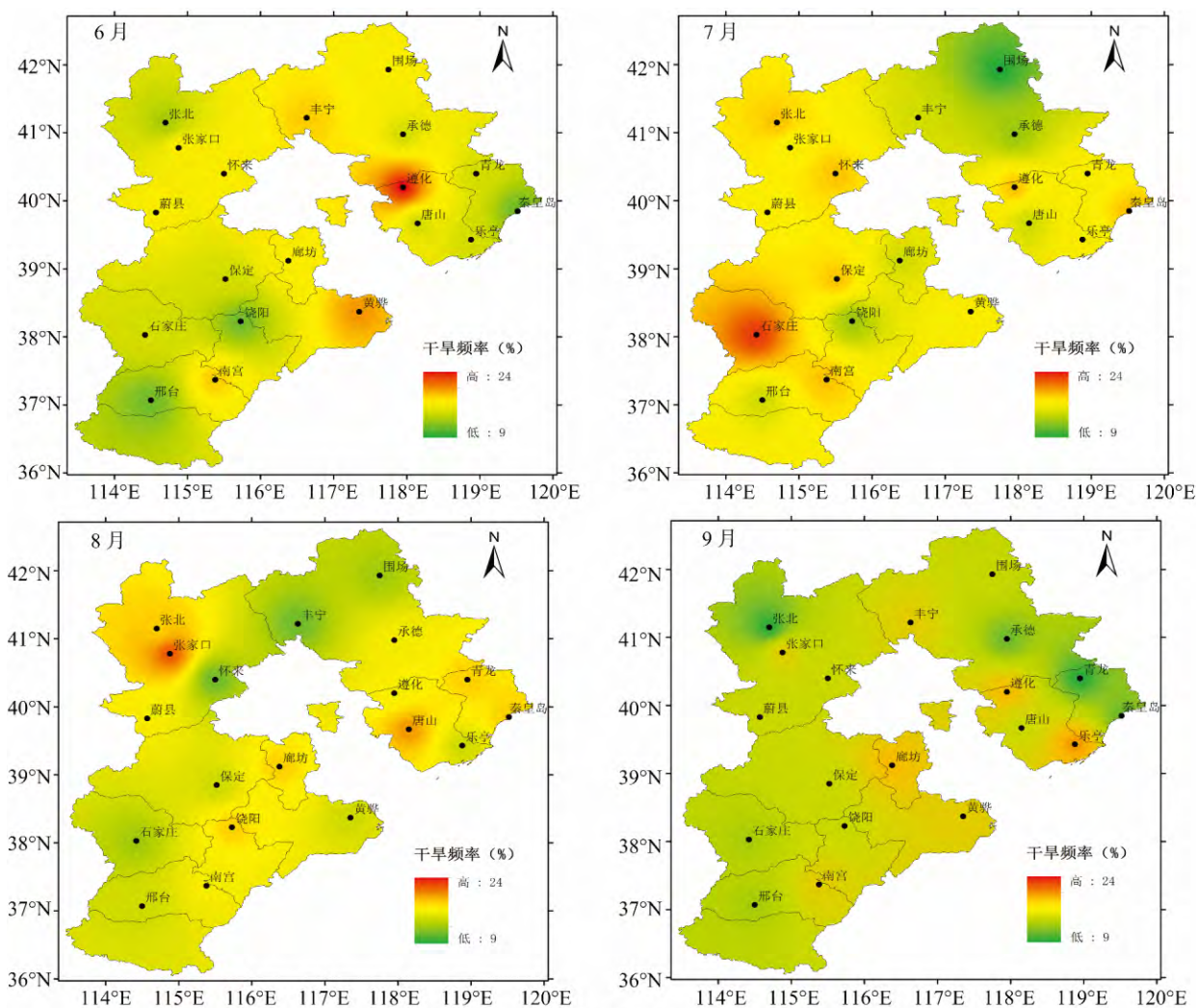


图4 河北省6—9月干旱发生频率的空间分布

地反映干旱的特征。不过由于干旱实际情况复杂,实际受灾面积可能受人为灌溉等因素的影响,所以站次比与受灾面积之间存在差异,但1个月尺度的SPI指数变化特征基本上符合实际干旱的变化特征,说明短尺度的SPI指数也能够反映出河北干旱的实际情况。

3.2 夏玉米生长季干旱时间变化

用干旱发生次数描述河北省干旱的时间变化,首先发现6—9月的不同类型干旱发生情况,中旱发生次数最大,干旱等级越严重,发生的次数越少。相似的结论也有研究指出,如申海凤等基于SPI指数研究了河北邢台的农作物生长期干旱的时间变化,得到邢台县干旱发生以中旱和重旱为主^[24]。而河北省干旱的年际变化虽较为杂乱,但年代际之间还是存在差距,其中20世纪60—80年代的干旱次数少于20世纪90年代和2000年之后,20世纪90年代后干旱情况加重。而赵林等研究中,根据12个月尺度的SPI值得到黄淮海区域20世纪60年代和20世纪90年代干旱有加重趋势,特别是自20世纪80年代以来,干旱加重显著,2000年以来干旱有所减轻使得该时段干旱加重的趋势有所减弱^[25],同本研究的河北区域年代际的干旱趋势相似。自2000年以来的干旱情况相反,可能是由于SPI尺度选用尺度不相同造成的。河北省干旱情

况加剧的结论与很多学者在类似研究区域的干湿变化规律结论^[26-28]相符。

3.3 夏玉米生长季干旱空间变化

1961—2014年各站点发生干旱的频率分布中反映,6月、9月相对7月、8月干旱发生频率较小。结合SPI的趋势变化进行分析,6月和9月SPI呈现上升趋势,主要是分布于河北省东部靠海区域的唐山、青龙、饶阳等站点;而7月和8月SPI则呈现出下降趋势,其中,唐山、青龙、张北、黄骅、石家庄和邢台等站,不仅干旱频率较大且月份间的干湿差异也将会更加明显;秦皇岛和丰宁无变干的趋势,所以干旱情形可能出现更加严重的状况。车少静等2010年对河北省的旱涝时空特征分析中也指出,从长期变化趋势看,春秋旱呈弱减轻趋势,夏季干旱呈弱加剧趋势^[14],与本研究7—8月有明显干旱趋势相一致。王素萍等基于SPI指数线性变化趋势的研究得出,华北地区的干旱主要由夏季趋于干旱引起的^[29],与本研究结论相似。而空间特征上,车少静等的研究显示河北省的旱涝差异主要表现为南北差异,也存在一定的东西差异^[14]。本研究中则没有发现南北差异,而东西差异较明显,存在局地性的特点。造成差异的原因可能是利用了不同尺度的SPI值,短尺度的降水会受到极端降水的影响更加明显,使得空间

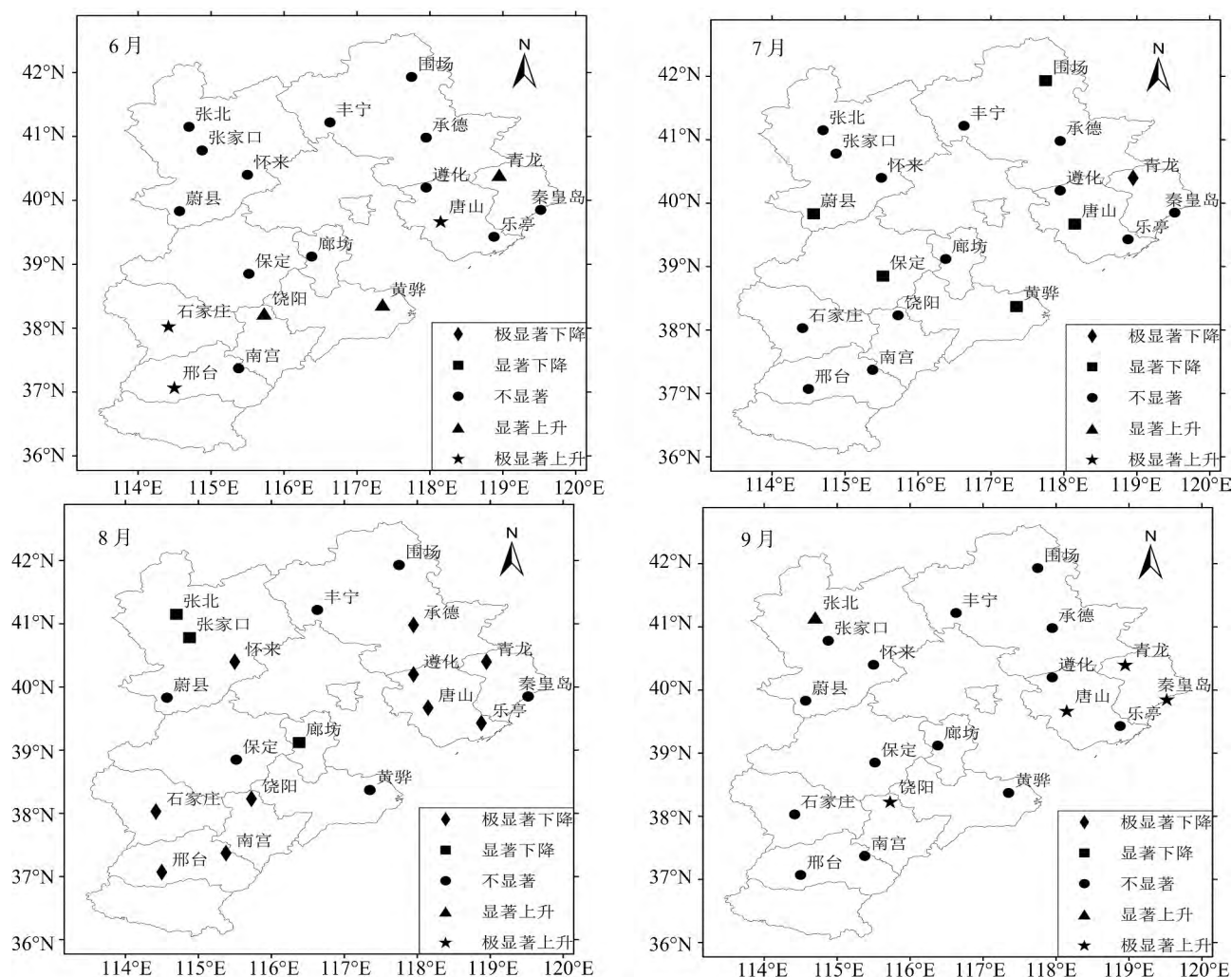


图5 河北省6—9月SPI变化趋势空间分布

表2 河北省夏玉米生长季SPI值与产量的相关性

站点	相关系数			
	6月	7月	8月	9月
张北	-0.212	0.382*	0.020	-0.111
蔚县	0.093	0.479**	0.359*	0.053
石家庄	-0.286	0.058	-0.126	0.049
邢台	-0.120	0.191	0.052	0.425*
丰宁	0.237	0.437*	0.307	-0.126
围场	0.096	0.144	0	-0.189
张家口	0.243	0.199	-0.001	0.085
怀来	0.407*	0.594**	0.473**	-0.206
承德	0.183	0.558**	0.217	0.024
遵化	0.216	0.478**	0.098	0.321
青龙	0.025	0.278	-0.089	0.068
秦皇岛	0.307	0.426*	-0.096	0.249
廊坊	0.476**	0.144	-0.120	0.245
唐山	0.233	0.248	-0.446*	0.234
乐亭	-0.035	-0.164	-0.053	0.006
保定	0.090	-0.098	-0.115	-0.149
饶阳	-0.003	-0.137	-0.203	0.055
黄骅	0.281	0.359*	0.355*	0.148
南宫	0.055	0.047	0.034	0.221

注 “*” “**” 分别表示显著相关 ($P < 0.05$)、极显著相关 ($P < 0.01$)。

的分布更加零散。变干燥的7月、8月,正好是干旱频率较大的2个月,变湿润的6月、9月,是干旱频率较小的月份,呈现出很好的相互促进作用。所以今后河北省夏玉米的生长季内,7—8月的干旱状况将会对夏玉米的生长造成更多的威胁,需要更加紧密的关注。

3.4 夏玉米生长季干旱与产量的关系

将1980—2011年的河北省夏玉米的产量数据与SPI值进行相关性分析,结果显示,6—9月呈显著性相关的站点数依次为7月>8月>6月>9月。对应河北省夏玉米的生育期分析,6月夏玉米基本处于播种和出苗期,降水量不足对产量形成影响不明显;7月(夏玉米处于7叶—拔节期)发生干旱会更明显地影响到产量;8月(夏玉米为抽雄—灌浆期)干旱的发生会直接对穗数产生影响;进入9月夏玉米为乳熟期,此时发生干旱对其产量的影响较小。郁凌华等在黄淮海地区夏玉米生长季内的旱涝灾害分析中,也指出在玉米的拔节到抽雄、抽雄到乳熟阶段,降水量对玉米生长量以及产量积累的影响最大^[4]。在实际的生产生活中,应关注这个时段的降水,从而更好地进行农业生产。而河北省正好是7—8月的干旱发生频率较高,所以干旱会对夏玉米造成更严重的影响,且7—8月的变干趋势显著,使得河北省夏玉米的干旱风险不容忽视,在实际生产生活中,更要注重7—8月的干旱监测,以便

及时做出夏玉米的灾害监测及预警。

本研究虽然得出 6—9 月各月之间的干旱差异及对夏玉米产量的影响,但没有深入每个生育阶段算出对应的 SPI 值,从夏玉米的生育期角度去详细分析干旱的影响;也仅基于 SPI 1 个指数对河北省 6—9 月进行了分析,没有引入其他干旱指数或选择其他 SPI 尺度的共同分析,今后将进一步进行深入研究分析。

4 结论

(1) 1 个月尺度的 SPI 指数能够较好地描述河北省干旱实际情况。(2) 河北省夏玉米生长季干旱频数的年代际变化特征为 20 世纪 60、70、80 年代的干旱发生均次分别为 11.9、10.9、11.9 次,20 世纪 90 年代和 2000—2014 年的干旱发生均次达到 13.9、13.4 次,20 世纪 90 年代后干旱形势越发严峻。生长季内 6 月、9 月,干旱发生频率均低于 16%,并且 SPI 有变湿润的趋势;7 月、8 月的干旱发生情况较严重,均高于 16%,SPI 也有变干的趋势。总体来看,夏玉米生长季干旱形势严峻。(3) 河北省夏玉米生长季干旱的空间分布特征为张家口、遵化、南宫干旱发生频率较高,均达到 17.6% 以上;邢台、承德、围场较为湿润,干旱发生频率在 13.9% 以下。总体来看,河北省东北部和南部干旱发生频率小,西北部和中南部干旱频率较高。(4) 夏玉米产量与生长季 SPI 的相关性分析表明,7 月、8 月呈显著相关的站点占比较高。7—8 月夏玉米处于拔节—抽雄—开花期,是关键的水分敏感期,SPI 与产量显著相关。

参考文献:

- [1] 张景书. 干旱的定义及其逻辑分析 [J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(3): 97—100.
- [2] Obasi G P. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994, 75(9): 1655—1661.
- [3] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 1—29.
- [4] 郑远长. 全球自然灾害概述 [J]. 中国减灾, 2000, 10(1): 17—22.
- [5] 董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC 第五次评估报告解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56—59.
- [6] Vedantham A. A special report of working groups I and III of the intergovernmental panel on climate change [R/OI]. [2017—12—01]. https://www.researchgate.net/publication/228757775_A_Special_Report_of_Working_Groups_I_and_III_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change.
- [7] 冶明珠, 李林, 王振宇. SPI 指数在青海东部地区干旱监测中的应用及检验 [J]. 青海气象, 2007(4): 21—24.
- [8] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3): 429—438.
- [9] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 113—121.
- [10] Wu H, Svoboda M D, Hayes M J, et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 65—79.
- [11] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523—529.
- [12] 张利利, 周俊菊, 张恒玮, 等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究 [J]. 生态学报, 2017, 37(3): 996—1007.
- [13] 张建平, 刘宗元, 王靖, 等. 西南地区综合干旱监测模型构建与验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 102—107.
- [14] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年 (1965—2005) 河北省旱涝时空特征分析 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 137—143, 150.
- [15] 闫峰, 王艳姣, 吴波. 近 50 年河北省干旱时空分布特征 [J]. 地理研究, 2010, 29(3): 423—430.
- [16] 赵平伟, 郭萍, 李立印, 等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 142—149.
- [17] 赵新来, 李文龙, Guo X L, 等. Pa, SPI 和 SPEI 干旱指数对青藏高原东部高寒草地干旱的响应比较 [J]. 草业科学, 2017, 34(2): 273—282.
- [18] 陶新娥, 陈华, 许崇育. 基于 SPI/SPEI 指数的汉江流域 1961—2014 年干旱变化特征分析 [J]. 水资源研究, 2015, 4(5): 404—415.
- [19] 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, 7(9): 1418—1424.
- [20] Edwards D C. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales [D]. Colorado: Colorado State University, 1997: 18—21.
- [21] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C/OI]. [2017—12—01]. https://www.researchgate.net/publication/243785846_The_Relationship_of_Drought_Frequency_and_Duration_to_Time_Scales.
- [22] 张调风, 张勃, 王小敏, 等. 基于综合气象干旱指数 (CI) 的干旱时空动态格局分析——以甘肃省黄土高原区为例 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 13—20.
- [23] 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: 1—35.
- [24] 申海凤, 商彦蕊, 刘公英. 基于 SPI 指数的农作物生长期干旱时间变化研究——以河北省邢台县为例 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(11): 2536—2541, 2546.
- [25] 赵林, 武建军, 吕爱锋, 等. 黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析——基于标准化降雨指数 [J]. 资源科学, 2011, 33(3): 468—476.
- [26] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 307—318.
- [27] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429—2439.
- [28] 马柱国, 任小波. 1951—2006 年中国区域干旱化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195—201.
- [29] 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的 1960—2011 年中国不同时间尺度干旱特征 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 827—834.
- [30] 郁凌华, 赵艳霞. 黄淮海地区夏玉米生长季内的旱涝灾害分析 [J]. 灾害学, 2013, 28(2): 71—75, 80.