

基于标准化降水指数 SPI 的泾惠渠灌区干旱演变对冬小麦气候产量的影响

刘彦平,蔡焕杰

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室/旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了研究干旱变化对于作物产量的影响机制,以泾惠渠灌区为例,选用标准化降水指数 SPI 作为干旱评判指标,采用 Mann-Kendall 趋势检验、最大熵谱分析等方法分析了灌区干旱的变化特征,以及干旱演变下冬小麦气候产量的变化规律。研究表明:(1) 灌区冬小麦实际产量呈显著增加趋势($Z = 7.6482$),气候产量呈不明显减少趋势($Z = -0.5686$);(2) 灌区总体干旱化趋势明显(通过了 99% 的显著性检验),这种趋势在春、夏、秋三季都达到了显著水平;(3) 干旱存在 16 a 的年代际周期波动,4~5 a 的年际周期;(4) 播种前 7—9 月份和播种后的 10、11 月的干旱情况对于冬小麦气候产量的影响最大,是影响作物气候产量的关键期;(5) SPI_{3-9} 与冬小麦气候产量关系最密切,可以解释 46.21% 的产量变异;(6) 随着干旱的年代际周期变化, SPI_{3-9} 与冬小麦气候产量之间的相关系数从 0.44 上升至 0.74,干旱对于冬小麦气候产量的影响有增强的趋势。

关键词: 标准化降水指数(SPI); 冬小麦; 气候产量; 干旱化趋势; 泾惠渠灌区

中图分类号: S274.2;S165+.22 **文献标志码:** A

Effect of drought evolution on climatic yield of winter wheat based on SPI in Jinghuiqu Irrigation District

LIU Yan-ping, Cai Huan-jie

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas of Ministry of Education/ Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the influence mechanism of drought change on crop yield, taking the Jinghuiqu Irrigation District(ID) as the case study, selected the Standard Precipitation Index (SPI) as the drought evaluating index, using the methods of Mann-Kendall trend test and maximum entropy spectrum analysis to analyze the variation characteristics of drought in ID and the change rule of the climatic yield of winter wheat under drought evolution. The research showed that: (1) The real winter wheat yield in the ID has been showed a significantly rising trend ($Z = 7.6482$), while the climatic yield was presented not obvious downward trend ($Z = -0.5686$); (2) The general drought trend in the ID was significant (through significant test at 99% level), this trend was reached remarkable level in three seasons as spring, summer and autumn; (3) The drought has existed periodic fluctuation of 16 years, the variation period was 4 to 5 years; (4) The drought situation in before planting as July to September and after planting as October to November had a great influence on climatic yield of winter wheat, these were the key periods for influencing crop climatic yield; (5) Climatic yield of winter wheat was closely related to SPI_{3-9} , it can be explained 46.21% of the yield change; (6) With the change of the drought periodic cycle, r the correlation efficient of SPI_{3-9} with the climatic yield of winter wheat was increased from 0.44 to 0.74, the impact of drought on climatic yields was showed an increasing trend.

Keywords: standardized precipitation index (SPI); winter wheat; climate yield; drought tendency; Jinghuiqu Irrigation District

在全球变暖的背景下,干旱问题正越来越多的长、影响范围广等特点。干旱产生的原因很多,影响到人们的关注。干旱具有发生频率高、持续时间因素包括温度、蒸发、土壤水分亏缺、地下水供给等

收稿日期:2014-04-06
基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAD29B01);国家自然科学基金项目(51179162);高等学校学科创新引智计划项目(B12007)
作者简介:刘彦平(1988—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: liuyyp1988@163.com。
通信作者:蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn。

多个方面^[1],但就农业干旱而言,降水亏缺的累积是最直接的原因^[2]。在农业干旱的判定中,常采用降水类的气候干旱指标^[3-5],应用较广的有降水距平百分率、标准化降水指数 SPI、降水 Z 指数和帕尔默干旱指数等。降水距平百分率计算简单,能直观地反映各时段降水相对于历史平均的偏离程度^[6];降水 Z 指数与标准化降水指数 SPI 计算仅需降水资料,不涉及复杂的干旱机理,但 SPI 的多时间尺度和计算的稳定性优于 Z 指数,应用前景更广泛^[7]。

干旱对于作物的最终影响会反映在产量上,而产量也是农业生产的核心。因此,分析干旱变化对于产量的影响机制具有实际意义。本研究以泾惠渠灌区为例,选用 SPI 作为地区干旱指标,分析了灌区干旱的变化特征,并在此基础上研究了干旱对冬小麦产量的影响,旨在获取影响作物产量的关键指标值,为合理灌溉和作物增产提供一条新的途径。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取位于陕西省关中平原中部的泾惠渠灌区为研究对象。灌区西、南、东三面有泾河、渭河、石川河环绕,范围涉及泾阳、三原、高陵、临潼四个县和西安市阎良区,东西长约 70 km,南北宽约 20 km。地势西北高、东南低,地面坡降 1/300 ~ 1/600,排水条件良好。灌区农作物以小麦、玉米为主,是陕西省的重要粮菜基地。

降水资料采用泾惠渠灌溉试验站 1953—2000 年的月降水记录,灌区小麦产量取自《陕西省泾惠渠灌溉技术资料汇编》。

1.2 分析方法

1.2.1 产量的分解 作物产量会受到多方面因素的影响,产量长时间序列发生的变化不仅与干旱有关,也包含了其它人为活动与自然条件的影响。所以,分析干旱变化与产量之间关系首先需要对产量进行分解。目前常采用的方法是将产量分解为趋势产量、气候产量和随机误差三部分^[8],趋势产量代表了由国家政策、科技水平等在内的社会因素决定的稳定产量部分,气候产量代表了由降水、光照、温度等自然条件决定的产量波动部分。

$$Y = Y_t + Y_m + \Delta Y \tag{1}$$

式中, Y 是实际作物产量, Y_t 是趋势产量, Y_m 是气候产量, ΔY 是随机误差,实际应用中一般忽略不计。

1.2.2 标准化降水指数(SPI) 标准化降水指数(SPI)是考虑到降水服从偏态分布这一事实,假设降水服从 Γ 分布,并将由此得到的降水量的累积概率进行正态标准化处理。SPI 能够反映不同时间尺

度和地区的旱涝状况以及干旱的年际变化^[9]。SPI 的计算公式如下^[10]:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \tag{2}$$

式中, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{H(x)^2}}$; x 是给定时间尺度的降水量(mm); H(x) 是对应于 x 的累积概率; S 是概率密度正负系数,当 H(x) > 0.5 时, S = 1, 当 H(x) ≤ 0.5 时, S = -1; c₀ = 2.515517, c₁ = 0.802853, c₂ = 0.010328, d₁ = 1.432788, d₂ = 0.189269, d₃ = 0.001308。

H(x) 由不完全 Γ 分布概率密度函数积分得到:

$$H(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx \tag{3}$$

式中, β > 0, 为尺度参数; γ > 0, 为形状参数。可由极大似然估计法求得^[10]。

标准化降水指数 SPI 的干旱等级参考《气象干旱等级》^[10]和《干旱气象学》^[11]划分,具体见表 1。本文采用多种时间尺度的 SPI 进行分析,以 SPI_{n-m} 表示 m 月份前 n 个月的 SPI 值,即 n 代表计算的时间尺度, m 表示月份。

表 1 标准化降水指数干旱等级划分
Table 1 Classification of drought grades by the SPI

等级 Scale	干旱程度 Degree of drought	标准化降水指数 Standard precipitation index(SPI)
1	无旱 No drought	-0.5 < SPI
2	轻旱 Slight drought	-1.0 < SPI ≤ -0.5
3	中旱 Moderate drought	-1.5 < SPI ≤ -1.0
4	重旱 Heavy drought	-2 < SPI ≤ -1.5
5	特旱 Extreme drought	SPI ≤ -2.0

1.2.3 Mann - Kendall 趋势检验 判断研究要素在长时间内是否具有趋势变化,是研究气候变化及其响应的重要内容。Mann - Kendall 趋势检验属于非参数检验,不要求检验序列服从同一分布,也不受少数异常值的干扰,常用于气象水文领域的趋势判断^[12-13]。

对于时间序列 x(1), x(2), …, x(t), 进行趋势分析时,首先定义检验统计量 S:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \tag{4}$$

式中, sign() 为符号函数,取值由 (X_i - X_j) 的值而定。当二者之差为正数、负数或零时,函数取值分别为 1, -1, 0; 统计量 S 大于、等于、小于零时检验量 Z 的计算公式分别为:

$$Z = (S - 1)[n(n - 1)(2n + 5)/18]^{-1/2}, S > 0$$

(5)

$$Z = 0, S = 0$$

(6)

$$Z = (S + 1)[n(n - 1)(2n + 5)/18]^{-1/2}, S < 0$$

(7)

当 Z 为正值时,时间序列表现为增加趋势,为负值时,时间序列为减少趋势。 $|Z| \geq 1.28, 1.64, 2.32$ 时,表示分别通过了信度 90%、95%、99% 的显著性检验^[14]。

1.2.4 最大熵谱分析 干旱是一定气候条件下的产物,通常含有周期性与非周期性成分,其中的周期项、趋势项是揭示气候序列变化规律的关键。目前,对于时间序列主要周期的确定方法很多,如方差分析、功率谱估计等,但这些方法在应用中都存在一定的缺陷:方差分析算法稳定性较差,而功率谱分析精度会收到序列长度的影响^[15]。

1967 年, Burg J P^[16] 在信息论中熵的基础之上,提出在最大熵的准则下外推自相关函数的方法,并将此方法用于频谱分析,即最大熵谱估计。与通常的谱分析相比,最大熵谱分析分辨率高,能应用于短时间序列数据,得到的周期比较精确^[17-18]。

对于时间序列 $x(n)$, 设 V_f 为其方差谱密度, $V_f > 0 (-0.5 < f < 0.5)$, 则该序列的熵谱定义为:

$$H = \int_{-0.5}^{0.5} \log l / f df$$

(8)

以 H 达到极大为准则来估计 V_f 得到的谱即为最大熵谱,以此为原则得到的最大熵谱的表达式如下:

$$I(l) = \frac{\sigma_{k_0}^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^{k_0} a(k_0, j) e^{j2\pi l/n} \right|^2}$$

(9)

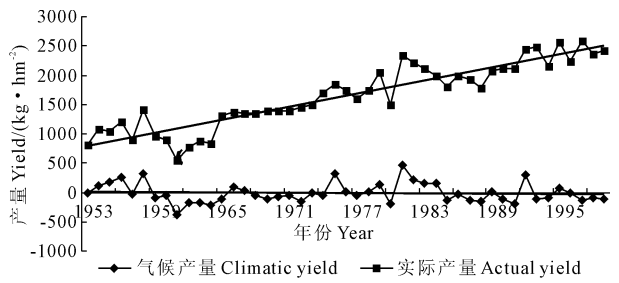
式中, n 为序列长度; l 为波数, 对应周期为 n/l ; i 为虚数; $\sigma_{k_0}^2$ 为对应于截止阶 k_0 的方差; $a(k_0, j)$ 是 k_0 阶反射系数。式中参数的计算采用 Burg 递推算法^[15, 19-20], 截止阶的确定常用的有最终预测误差 (FPE) 准则、信息论 (AIC) 准则、自回归传输函数 (CAT) 准则, 本文选用最终预测误差 (FPE) 准则来计算最佳截止阶。

2 结果与分析

2.1 冬小麦气候产量的分离

根据灌区冬小麦产量的变化特点, 本文选用线性回归来分离趋势产量与气候产量 (结果见图 1), 气候产量体现了实际产量的波动部分, 数值在正负之间变动。气候产量为负值时, 说明气候状态不利

于作物生长, 导致了实际产量下降; 气候产量为正值时, 气候有促进产量增加的趋势。为了研究冬小麦实际产量与气候产量的多年变化, 采用非参数 Man - Kendall 趋势检验与线性倾向估计分析冬小麦总产量与气候产量的变化趋势。计算结果表明, 灌区冬小麦实际产量呈现明显的上升趋势 ($Z = 7.6482$), 线性倾向值达到了 $371.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 并且通过了 99% 的显著性检验; 气候产量 Man - Kendall 趋势检验结果 $Z = -0.5686$, 呈现出下降趋势, 倾向值为 $-7.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$, 但下降趋势不明显。



注: 图中直线为产量的线性趋势线。
Note: The straight line shows the linear trend of yield.

图 1 冬小麦实际产量与气候产量

Fig.1 Actual yield with climatic yield of winter wheat

2.2 SPI 时间演变特征

2.2.1 趋势性分析 分别计算以季、年为尺度的 SPI 指数值, 采用非参数 Mann - Kendall 趋势检验与线性倾向估计分析干旱指标, 以此为依据分析灌区 1953—2000 年间的干旱变化趋势。计算结果见表 2。

从表 2 可以看出, 随着时间的推移, 灌区各时间尺度的 SPI 均呈现出递减趋势。SPI 整体以 $0.268 \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率下降, 且这种下降趋势通过了信度 99% 的显著性检验。SPI 各季节尺度的变化趋势与整体保持一致, 其中, 春季 SPI 下降速率最小, 但趋势较其它季节更明显, 通过了 95% 的显著性检验; 夏季和秋季 SPI 变化趋势显著性相同, 均通过了 90% 的显著性检验, 但秋季 SPI 下降速率较小; 冬季 SPI 也呈下降趋势, 且下降的倾向程度在四个季节中最大, 但这种倾向趋势没有达到显著水平。由此可以推断, 灌区整体呈现出显著的干旱化趋势, 这种趋势在春、夏、秋三季表现得较为明显。

2.2.2 周期性分析 采用最大熵谱分析确定年尺度 SPI 的隐含周期。图 2 为 SPI 最大熵谱分析的结果, SPI 在波数为 3、9、16 处有峰值, 即存在 16、5.33、3 a 的周期波动。

表 2 趋势分析
Table 2 The trend analysis

时间序列 Time series	Man – Kendall 统计量 Z Man – Kendall statistics Z	线性倾向 值(10a) Value of linear trend	显著性 水平 Significance level
SPI – 年 SPI – Year	– 2.7109	– 0.268	99%
SPI – 春季 SPI – Spring	– 1.7687	– 0.124	95%
SPI – 夏季 SPI – Summer	– 1.4488	– 0.156	90%
SPI – 秋季 SPI – Autumn	– 1.3776	– 0.135	90%
SPI – 冬季 SPI – Winter	– 1.2532	– 0.167	—

注：—表示没有达到显著水平。
Note: — means not reaching significant level.

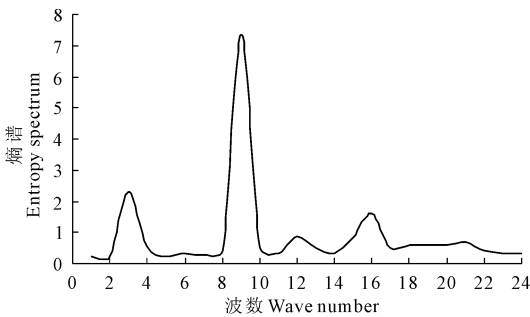


图 2 SPI 最大熵谱图

Fig.2 The maximum entropy spectrogram of SPI

根据 SPI 判定的干旱程度,灌区年际干旱演变可以分为三个时期:第一时期为 1953—1968 年,这段时间水分供应较为充足,仅发生过一次轻度干旱,此阶段为相对湿润期;第二个时期为 1969—1984 年,共发生轻度干旱 3 次,平均周期为 5.33 a,中度及以上程度干旱出现 3 次,平均周期为 5.33 a,干旱情况相较于第一阶段有加剧趋势,将这一时期定义为干旱过渡期;1985—2000 年轻度干旱发生 2 次,平均周期为 8 a,中度及以上程度干旱共发生 4 次,平均周期为 4 a,属于研究期相对干旱的时段。由此看出,最大熵谱分析得到的周期中,16 a 为干旱的年代际变化周期,4~5 a 为年际变化周期。

2.3 SPI 和气候产量的关系

2.3.1 影响气候产量的主要时段 采用 SPSS 软件分析气候产量与不同月份各时间尺度(1、3、5、6、12 个月)SPI 之间的相关性,结果显示 1—7 月份各尺度 SPI 与小麦气候产量相关性均未达到显著水平,剩余月份相关性见表 3。可以看出,随着月份的推后,气候产量与 SPI 的相关性呈现出先增大后减小的趋势,与气候产量关系较密切的 SPI 多集中在 9、10 这两个月份。其中, SPI₁₋₉、SPI₃₋₈、SPI₃₋₉、SPI₅₋₉~SPI₅₋₁₁、SPI₆₋₉、SPI₆₋₁₁、SPI₆₋₁₂、SPI₁₂₋₉ 与气候产量的相关性均达到了极显著水平 ($P < 0.01$), SPI₃₋₉ 与

气候产量相关性最好,相关系数达到了 0.523。从时间尺度来分析,3、5、6 个月尺度 SPI 与气候产量总体相关性较好 ($P < 0.05$)。随着时间尺度的增大,气候产量与各 SPI 相关性呈现出先增大后减小的趋势。

选出与冬小麦气候产量关系最密切(相关性达到极显著水平, $P < 0.01$)的各尺度 SPI 值,分析其涵盖的月份(见表 4)。可以看出,尽管各尺度指标涉及的月份不完全相同,但 40% 的指标包含 10、11 月,而 80% 的指标都包含 7、8、9 月。就研究区而言,冬小麦一般是在 10 月初播种,次年 6 月初收获,与小麦气候产量关系密切的各指标中只涉及了出苗期的月份,主要生育期均不在影响气候产量的范围内。7—9 月是灌区降水最集中的时候,平均占年内降水的 50%,决定了小麦播种前的底墒。由此可以说,在泾惠渠灌区,出苗期的 10、11 月对冬小麦产量形成比较重要;底墒对于灌区冬小麦气候产量有重要意义,7—9 月是决定冬小麦气候产量的关键期。

表 3 各时间尺度 SPI 和冬小麦气候产量相关分析

Table 3 The correlation analysis of SPI with climatic yield for each time scale

月份 Month	SPI _{1-M}	SPI _{3-M}	SPI _{5-M}	SPI _{6-M}	SPI _{12-M}
8	0.21	0.377**	0.197	0.183	0.257
9	0.378**	0.523**	0.422**	0.404**	0.404**
10	– 0.221	0.361*	0.441**	0.325*	0.372*
11	– 0.014	0.149	0.386**	0.422**	0.306*
12	0.004	– 0.25	0.335*	0.380**	0.288*

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。
Note: * Significant at $P < 0.05$, ** significant at $P < 0.01$, $n = 47$.

2.3.2 干旱演变对气候产量的影响 选取与冬小麦气候产量关系最密切的 SPI₃₋₉ 与气候产量进行回归分析,结果显示二者的关系较符合二次多项式 ($P < 0.001$)。方程形式为:

$$y = 39.106x^2 + 118.12x - 45.274 \quad (10)$$

式中, y 为气候产量, x 是 SPI₃₋₉。在研究期内,该方程能解释 46.21% 的气候产量变化。从图 3(a)可以看出,气候产量与 SPI₃₋₉ 是正相关的。当 SPI₃₋₉ 大于 0.5 时,气候产量趋于正值,旱涝状态有利于产量增加;当 SPI₃₋₉ 小于 0.5 时,气候产量趋于负值,干旱制约了产量的增长。在 SPI₃₋₉ 取值在 – 1.51 左右时(对应于重度干旱),气候产量达到最小值 – 134.5 kg·hm^{–2}。从整体来看, SPI₃₋₉ 等于 0.5 是决定冬小麦产量增减的关键值,也是冬小麦抵抗干旱危害的上限。

将气候产量按照干旱的年代际变化周期进行分组,对各时期的气候产量与相应 SPI₃₋₉ 值分别进行

回归分析,结果见图 3(b)、(c)、(d)。在相对湿润期(图(b)), SPI_{3-9} 与气候产量呈现出二次项系数为负的抛物线关系,二者相关性较好,可以解释 43.69% 的气候产量变化($P < 0.001$);在干旱过渡期(图

(c))和干旱期(图(d)), SPI_{3-9} 与气候产量关系均呈现二次项系数为正的抛物线的关系,拟合优度 R^2 分别为0.76、0.74,优于上一时期。随着干旱化的推进,SPI 对于冬小麦气候产量的影响程度在逐渐增加。

表 4 各时间尺度 SPI 对应的时长

Table 4 SPI corresponding time length for each time scale

时间尺度 Time scale	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SPI_{1-9}												
SPI_{3-8}												
SPI_{3-9}												
SPI_{5-9}												
SPI_{5-10}												
SPI_{5-11}												
SPI_{6-9}												
SPI_{6-11}												
SPI_{6-12}												
SPI_{12-9}												

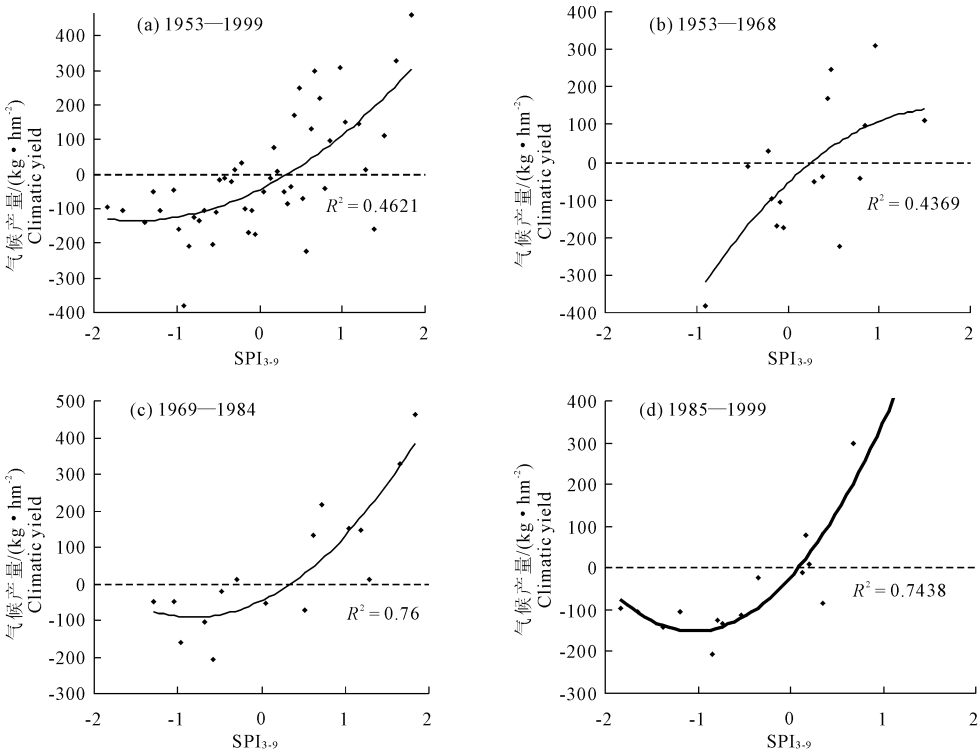


图 3 气候产量与干旱指数的关系

Fig.3 The relationship of climatic yield and drought index

在相对湿润期和干旱过渡期,气候产量正负变化的临界值出现在 SPI_{3-9} 等于 0.5 左右,在干旱期则为 0 左右。从整体来看,在 SPI_{3-9} 导致气候产量减产的区域内,气候减产随着干旱程度的增加呈现出先增大后减少的趋势。在灌区干旱化的进程中,冬小麦对于干旱危害的抵抗能力在增强。 SPI_{3-9} 考虑了 7、8、9 月份总共的降水情况,而在这一

时期,灌区正处于夏灌阶段。根据泾惠渠管理局的统计,干旱过渡期与干旱期的夏灌平均灌水定额比相对湿润期高出 10.4%,灌溉在一定程度上削弱了干旱对于气候产量的危害。因此,在表征旱涝状态的 SPI_{3-9} 对于气候产量变化影响力增加的同时,干旱对于气候产量的负效应在减小。

3 结论与讨论

3.1 讨论

国内外采用干旱指标分析干旱对作物产量影响的研究很多,多数选择多时间尺度的指标进行分析^[4-5,21-22]。尽管各研究采用的干旱指标和研究的作物有所不同,其根本目的都是得到长期水分亏缺对作物产量的影响机制,可以概括为三点:(1) 干旱程度与产量变化的量化关系;(2) 针对具体作物的干旱临界值;(3) 决定产量的干旱敏感期。本研究在此基础上,分析了泾惠渠灌区干旱年际周期变化的各时期内,冬小麦气候产量受干旱影响程度的变化,以及对应的干旱指标关键值的变化,动态地反映了干旱演变对冬小麦气候产量的影响。在泾惠渠灌区,干旱对于冬小麦气候产量的影响随着干旱化的趋势在增大,而干旱带来的减产效应在减弱。

虽然 SPI 在判定干旱时具有多时间尺度的优势,但 SPI 是一种气候干旱指标,判定地区干旱程度时仅考虑了降水的盈亏,在分析干旱对冬小麦气候产量的影响时表现出了一定的局限性。在研究期内,决定冬小麦气候产量增减的干旱指标临界值在逐渐增大,表明干旱对气候产量的负效应在减小,这与 SPI 判定的灌区干旱化的趋势不符。出现这一现象的主要原因是辅助灌溉削弱了干旱对作物产量的影响。在灌区降水逐渐减少的情况下,灌溉在相应地增加,在一定程度上削弱了干旱的危害,SPI 在计算时并没有考虑这一因素。SPI 的这一缺陷也影响了灌区冬小麦需水敏感期判断,使得有灌溉覆盖的主要生育期在决定气候产量时影响不显著。因此,SPI 在与作物结合进行判定时,结果会受到灌溉的影响,如何将灌溉与降水结合进行农业干旱的判定有待进一步的研究。

3.2 结论

干旱是制约地区粮食生产的重要因素,本研究采用 SPI 表征干旱程度,在此基础上分析泾惠渠灌区干旱演变对于冬小麦产量的影响,研究结果表明:(1) 冬小麦多年实际产量呈现出明显的上升趋势,气候产量呈现出下降趋势,但这种趋势未达到显著水平。(2) 灌区整体呈现出旱化趋势,这种趋势在春、夏、秋三季都达到了显著水平,冬季也呈现出干旱化的趋势,但趋势不明显。(3) SPI 存在 4~5 a 的年际变化周期,16 a 的年代际变化周期。(4) 播种前 7—9 月份以及播种后 10—11 月份的干旱情况对气候产量的影响最大。(5) 在研究期内,SP1₃₋₉与冬小麦气候产量关系最密切,二者呈曲线关系,回归分析建立的方程可以解释 46.21% 的气候产量变化,

SP1₃₋₉取 0.5 值是决定气候产量增减的关键点。(6) 按照 SPI 的年代际周期划分的三个时段内,SP1₃₋₉与气候产量呈曲线关系,且 SP1₃₋₉对于气候产量的影响有增强的趋势。

参考文献:

- [1] Hi - Ryong Byun , Wilhite D A . Objective quantification of drought severity and duration[J]. Journal of Climate, 1999,12:2747-2756.
- [2] 冯定原,邱新法.农业干旱的成因、指标、时空分布和防旱抗旱对策[J].中国减灾,1995,5(1):22-26.
- [3] 黎贞发.两种干旱指数在天津农业干旱评估中的应用[J].天津农业科学,2010,16(2):104-106.
- [4] Potop V, Mozny M, Soukup J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012,156:121-133.
- [5] 明 博,陶洪斌,王 璞.基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J].中国农业大学学报,2013,18(5):28-36.
- [6] 赵 丽,冯宝平,张书花.国内外干旱及干旱指标研究进展[J].江苏农业科学,2012,40(8):345-348.
- [7] 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.
- [8] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18.
- [9] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 年演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [10] 国家气候中心.GB/T20481-2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [11] 张书余.干旱气象学[M].北京:气象出版社,2008:76-77.
- [12] 李永坤,丁晓洁.北京市降水量变化特征分析[J].北京水务,2013,(2):9-12.
- [13] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):17-25.
- [14] 秦年秀,姜 彤,许崇育.长江流域径流趋势变化及突变分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.
- [15] 肖志国.几种水文时间序列周期分析方法的比较研究[D].南京:河海大学,2006.
- [16] Burg J P. Maximum entropy spectral analysis[C]//Proceeding of the 37th Annual International Meeting of Society Exploration Geophysicists, Oklahoma: Society of Exploration Geophysics, 1967:133-140.
- [17] 邵 骏,袁 鹏,李秀峰,等.基于最大熵谱估计的水文周期分析[J].中国农村水利水电,2008,(1):30-33.
- [18] 李占杰,鱼京善.黄河流域降水要素的周期特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):401-404.
- [19] 赵利红.水文时间序列周期分析方法的研究[D].南京:河海大学,2007.
- [20] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M].北京:气象出版社,2008:76-82.
- [21] Trnka M, Hlavinka P, Semera'dova' D, et al. Agricultural drought and spring barley yields in the Czech Republic[J]. Plant Soil and Environment, 2007,53:306-316.
- [22] Hlavinka P, Trnka M, Semera'dova' D, et al. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009,149:431-442.