

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

明博 陶洪斌 王璞*

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要 利用华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟种植典型区域北京地区1962—2011年逐月降水、温度资料计算多尺度标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI),分析干旱对作物产量的影响。结果显示:1)在过去50年内,SPI与SPEI所评判的干旱演变有巨大的不同,SPEI对气候变暖的响应是造成上述现象的主要原因。2)1990—2011年干旱指数与作物产量的关系显著($P < 0.05$),短时间尺度的 SPI_3-8 和 $SPEI_3-8$ 与玉米气候产量呈曲线关系,所建立的回归方程可以解释60.0%和60.1%的玉米产量变异,适宜的干湿状态在-0.8到3.2(SPI)和-0.9到2.1(SPEI)之间。3)长时间尺度的 SPI_{24-5} 和 $SPEI_{24-5}$ 与冬小麦气候产量呈线性相关,可以解释其51.8%和51.2%的产量变异。研究结果符合北京地区玉米以雨养为主、冬小麦以地下水补灌为主的实际情况。4)利用12或24个月尺度的干旱指数判断区域水分状况,可以帮助决断冬小麦返青后的灌水次数和灌水量,在防范产量风险的同时,提高水资源的利用效率。本研究表明,选择适合的时间尺度和月份的SPI和SPEI可以用来评价华北平原旱涝状况对农业生产的影响。降水量缺乏仍然是导致北京地区作物减产的主要因素。但华北平原由于气温升高导致干旱化的趋势明显,未来研究华北平原干旱对作物产量的影响,需更加注重运用综合了降水和蒸散因素的干旱指数,以提高评价干旱对产量影响的准确性。

关键词 谷物产量; 华北平原; 干旱; SPI; SPEI

中图分类号 S 344

文章编号 1007-4333(2013)05-0028-09

文献标志码 A

Impact of drought on grain yield in Beijing investigated by SPEI-based methods

MING Bo, TAO Hong-bin, WANG Pu*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Drought is one of the costliest weather related natural hazards in North China Plain (NCP). This study was conducted to quantify the influence of drought on grain yield variability using drought indices. Detailed crop and weather data were collected from Beijing, providing a typical region of winter wheat-summer maize rotation system in NCP. The data collected from 1962 to 2011 provided 50 years of data, which were used to compute the SPI and the SPEI drought indices at different time scales from 1 to 24 months. (a) The SPEI and SPI showed large differences in the evolution and identification of drought conditions during the last five decades, positive temperature anomalies were the most important cause of the aforementioned differences. (b) Drought indices more strongly correlated with yield variability during the last two decades. Regression of maize climatic yield as the dependent variable and the 3-month August SPI/SPEI as the independent variable explained up to 60.0% and 60.1% of yield variability in a curvilinear relationship, respectively. Optimum SPI/SPEI values were in the range of -0.8 to 3.2 and -0.9 to 2.1. (c) Furthermore, winter wheat climatic yield and 24-month SPI/SPEI were a linear relationship, SPI_{24-5} and the $SPEI_{24-5}$ drought indices explained 51.8% to 51.2% ($P < 0.01$) of the variation in wheat yield. These results implied that SPI and SPEI provided the accurate assessment of drought impacts on grain yield of the NCP. (d) Based on these results it would be possible to generate

收稿日期: 2013-03-01

基金项目: 公益性行业科研专项(201203031); 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-26)

第一作者: 明博, 博士研究生, E-mail: obgnim@163.com

通讯作者: 王璞, 教授, 主要从事作物抗逆栽培研究, E-mail: wangpu@cau.edu.cn

preliminary estimates of drought impacts on winter wheat yield by pre-season with some confidence. This could be very useful in regard to providing farmers with early warning information to plan irrigation management and prepare for potential drought conditions. In conclusion, the SPI and the SPEI showed excellent capability to identify drought impacts. The impacts of drought on grain yield were much greater, yet decreased precipitation is still the key factor in yield losses. This study identified an increase in drought severity associated with higher water demand as a result of evapotranspiration. Future researches in NCP should be focused on the drought indices based on precipitation and potential evapotranspiration, as they could reflect the better role played by global warming on drought severity, and provide more accurate assessment of drought impacts on yield variability.

Key words grain yield; North China Plain; drought; SPI; SPEI

干旱是一种在世界范围内普遍发生的自然现象。无论各领域对干旱的定义有何不同,其根本原因在于长期的降水缺乏。而在农业和水文领域内,过量蒸散也是干旱发生和加剧的重要因素。干旱通常被认为是一个缓慢的过程,多以季或年尺度进行评估。但在农业领域,关键生育期内短时干旱也能造成重大影响,因此干旱也具有多时间尺度的特性。干旱成因复杂且易受人类活动影响,无法准确量化其持续时间、发生强度和影响范围,研究者普遍借助干旱指数来量化干旱现象^[1]。目前,全球和区域干旱过程的监测与分析中应用最为广泛的干旱指数是帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[2]和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)^[3]。由于SPI具备多时间尺度以及时空适应性强的优点^[4-6],被世界气象组织(WMO)确定为参考干旱指标在世界范围内推广应用。随着全球气候变暖影响的逐步加深,Vicente-Serrano等^[7]在SPI基础上,提出了综合降水和气温变化共同效应的标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)。SPEI继承了PDSI综合考虑降水和蒸散作用、对温度变化反应敏感的特点,又具备SPI计算简单、适合多时间尺度比较的优点,非常适于在全球变暖背景下进行干旱评估^[8]。近期SPEI也被引入国内进行干旱趋势和干旱成因的研究^[9-10]。

华北平原是我国最重要的粮食产区之一,冬小麦-夏玉米一年两熟的种植模式在区域内占主导地位。干旱是影响区域农业生产最主要的农业气象灾害,水分不足已成为制约该区域冬小麦、夏玉米等作物稳产、高产的瓶颈^[11-14]。近年来,由于全球气候变化,华北平原存在明显的干旱化趋势,历时增长、强度增大、频率增加,受旱面积显著扩大^[15-16]。上述趋势的产生与降水量减少密切相关,而气候变暖是干旱化趋势加剧的另一重要原

因^[17-18]。鉴于上述原因,有必要在区域探索一种新的指数来评估干旱事件,并以此为基础研究干旱对作物产量的影响。

在本研究中,笔者以北京地区为例,应用新的多尺度SPEI干旱指数分析北京地区干旱的演变,并与参考干旱指数SPI相比较,旨在研究干旱对北京地区作物产量的影响及其变化趋势,并评价SPEI指数在农业领域内应用的价值。

1 资料和方法

1.1 数据资料

本研究所用气象数据资料源于中国气象科学数据共享服务网(CMDSS)地面气象资料日值数据集^[19]北京站(地理坐标39°48'N,116°28'E,海拔高度31.3 m,站点编号54511),历史气象资料时间范围为1962—2011年。为了评估干旱演变过程,分别计算了短期尺度(1 m)、中期尺度(3、6和12 m)以及长期尺度(24 m)的SPEI和SPI指数。产量数据来自农业部种植业管理司农作物数据库^[20],包括1962—2011年冬小麦和玉米的产量,分别利用直线滑动均值法求取趋势产量和气候产量。

1.2 计算方法

1.2.1 标准化降水指数(SPI)

标准化降水指数(SPI)是表征某时段降水量出现的概率大小的指标^[3,21]。降水次数较多的地方其降水量服从Gamma分布。将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级。在计算时只需输入较长时间(一般需要≥30年)不同时间尺度(一般选择1~48月,也可利用周或旬划分不同时间尺度)的降水量数据序列。假设某一时间尺度下的降水量为 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0)$$

式中, α 为形状参数, β 为尺度参数, x 为降水量, 是 Gamma 函数。最佳的 α 、 β 估计值可采用极大似然估计方法求得。于是, 给定时间尺度的累积概率可计算如下:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

所得的累积概率 $G(x)$ 可由阿布拉莫维茨逼近^[22]的方法进行正态化。计算所得标准降水量指数记为 $SPI_n - M$, 其中 n 表示时间尺度, M 表示月份。例如, SPI_{6-9} 表示 9 月份前 6 个月时间尺度的 SPI 值, 该值是由 4、5、6、7、8、9 月共 6 个月的总降水量序列所计算。

1.2.2 标准化降水蒸散指数(SPEI)

为了监测和研究全球增温背景下的干旱化过程, Vicente-Serrano 等提出了标准化降水蒸散指数(SPEI), 该指数用降水量(P)和潜在蒸散量(PET)的差值(D)来表示水分的盈余或赤字, 继而以此判定干湿状况。某一时间尺度水分盈亏序列可定义为

$$D_i = P_i - PET_i$$

其中, PET 使用 Thornthwaite 法^[23]计算。由于水分盈亏序列中可能存在负值, 所以 SPEI 指数采用

了 3 个参数的 log-logistic 概率分布来描述事件概率, 其累积概率函数形式如下:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}$$

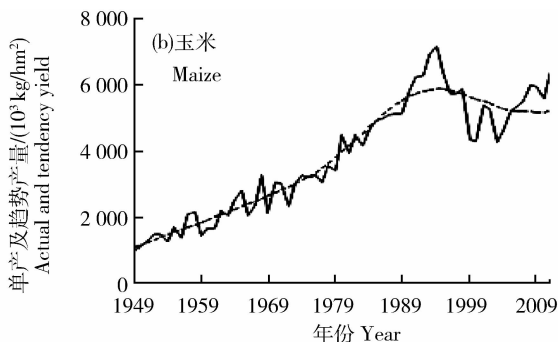
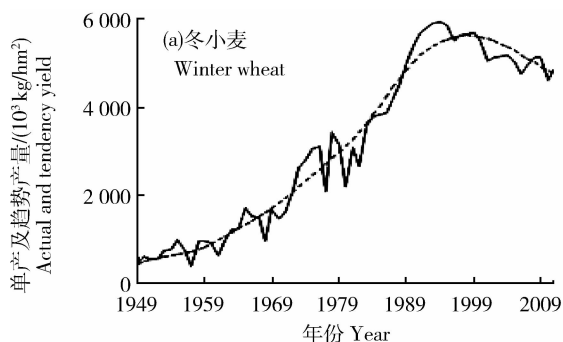
式中, 参数 α 、 β 、 γ 可用线性矩的方法拟合获得。所得累积概率采用与 SPI 计算类似的方法进行标准化。SPEI 的标记方法同 SPI。

1.2.3 气候产量计算

在长时间序列的作物产量与气候因子关系的观测统计研究中, 一般把作物的产量(Y)分解为趋势产量(Y_t)、气候产量(Y_c)和随机误差(ϵ)3 个部分:

$$Y = Y_t + Y_c + \epsilon$$

式中, Y_t 是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量; Y_c 是受以气候要素为主的短周期变化因子(农业气象灾害为主)影响的波动产量分量。研究干旱对农作物产量的影响就需要获得 Y_c , 即计算 Y_t 与 Y 的差值。求取 Y_t 的方法很多^[24], 结合区域特点本研究采用 21 年直线滑动均值法^[25]计算研究区域 1962—2011 年小麦、玉米的 Y_t , 结果如图 1 所示。以此结果求取的 Y_c 将用来表示旱涝状况对谷物产量的影响。



实线表示实际产量, 点画线表示由 21 年直线滑动平均法所得的趋势产量。

The solid line shows actual yield, and the dotted line shows the 21-year moving mean tendency yield.

图 1 北京市 1962—2011 年小麦、玉米实际产量和趋势产量

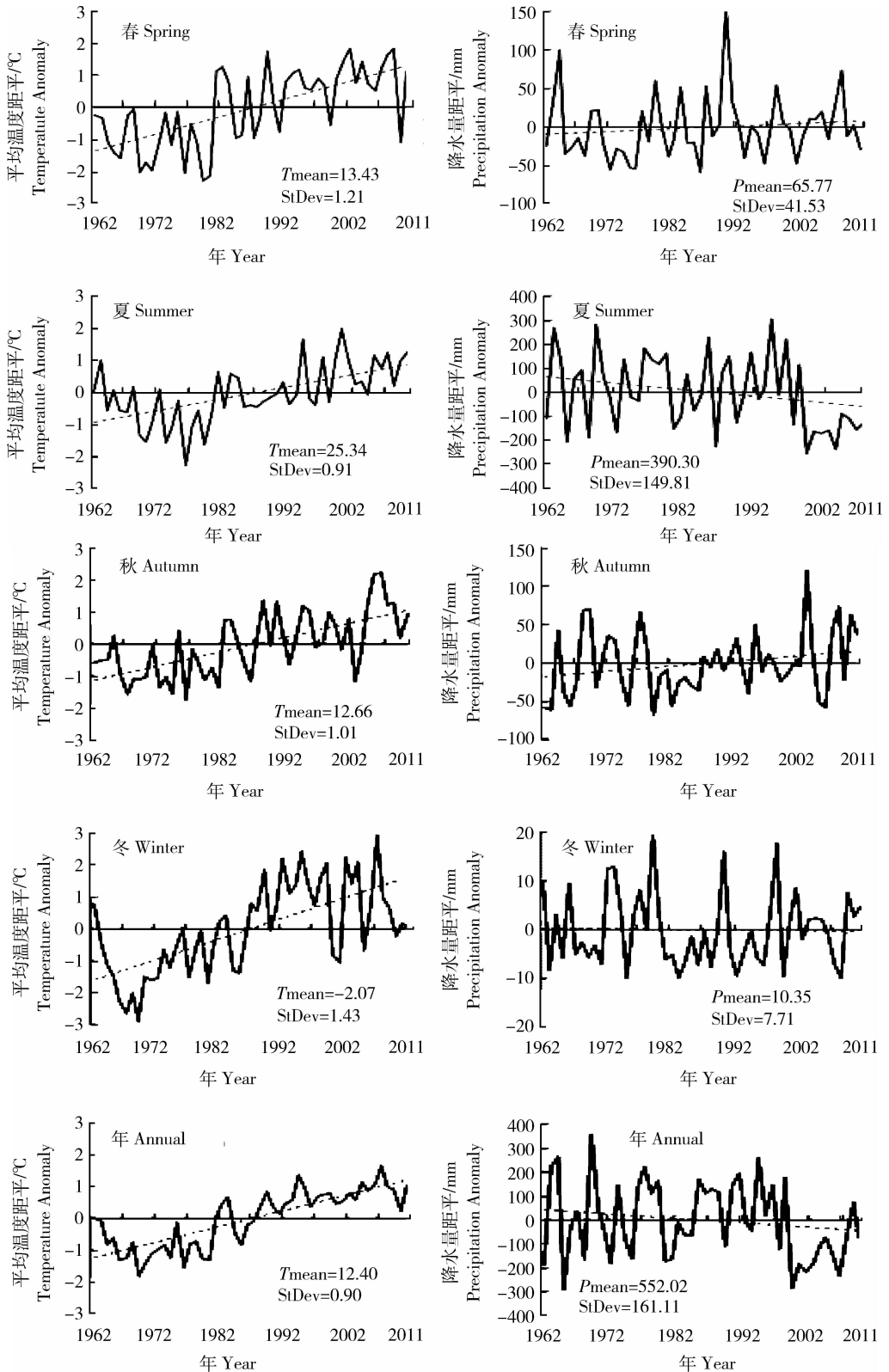
Fig. 1 Annual grain yield observed at Beijing, China from 1962—2011

2 结果与分析

2.1 温度和降水的演变趋势

图 2 显示了北京地区 1962—2011 年不同季节平均温度和降水量距平的变化趋势。随着时间的推移, 平均温度距平值均显示出明显的波动上升趋势。

降水量距平冬季变化不明显, 春季和秋季呈现出缓慢的增加趋势, 夏季和全年降水量则有下降趋势。比较各季节平均降水量和降水量标准差, 降水主要集中在夏季, 其他季节降水量变异均超过 60%, 全年降水量变异 29.1%, 降水年内和年际间分配变化较大。北京地区 1999—2007 年存在长达 8 年的连续



1962—2011 年各季节以及年度平均温度(T_{mean})、平均降水量(P_{mean})和标准差($StDev$)。

Average seasonal mean air temperature (T_{mean}) and precipitation (P_{mean}) and standard deviation patterns ($StDev$) were calculated from the entire period from 1962 to 2011.

图 2 1962—2011 年北京站不同季节平均温度和降水距平值变化趋势

Fig. 2 Long-term fluctuations of seasonal air temperature averages and precipitation shown as deviation from the baseline 1962—2011 climate (zero line) at the Beijing station

降水亏缺阶段。

分析平均温度和降水量距平值的变化趋势(表1),其中降水量随时间的变化均不显著。平均温度距平值随时间变化的趋势均达到极显著水平($P < 0.01$)。冬季升温最为迅速(线性趋势斜率),达到 $0.064\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,夏季升温较慢,为 $0.037\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,春季和秋季的升温速度分别为 0.054 和 $0.045\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$,年均温度上升速度达到 $0.050\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。分析温度和降水变化的线性趋势方程,预测值为零($y=0$,线性趋势与 x 轴相交)的年份出现在1987年前后。此后,平均温度距平值多为正值,增温明显。

表1 1962—2011年平均温度变化趋势

Table 1 Tendency of changes in temperature during 1962—2011

季节 Season	斜率 Slope	显著性 P-value	R^2
冬	0.064	<0.000	0.422
春	0.054	<0.000	0.431
夏	0.037	<0.000	0.349
秋	0.045	<0.000	0.423
年	0.050	<0.000	0.650

综合上述结果,自20世纪80年代末期开始,北京地区正在经历一段异常升温的过程,北京地区平均温度最低的时间段在20世纪60—80年代,20世纪90年代到21世纪最初的10年间是该地区平均温度最高的时期。降水量在过去50年间没有显著的变化趋势,但在21世纪最初的10年中存在一段异常亏缺的阶段。这可能会造成SPEI、SPI指数对该地区的干旱强度、持续时间的评价结果不同。

计算3、6、12和24 m时间尺度的SPI和SPEI,比较2种指数的差值(SPEI-SPI)。图3显示,SPI与SPEI指数对北京地区干旱的评价在2个历史阶段存在明显不同。以1989年为界,前28年间两者差值多为正值,表明SPI所判定的干湿状态相比SPEI明显偏干。其后22年间差值多为负值,SPEI判定的干湿状态相比SPI更干。这与北京地区平均温度距平值变化的时间基本同步。温度升高使PET增加,使“降水-蒸散”的水分平衡趋于减少,导致SPEI所评判的旱涝状况相比SPI有明显的干旱化趋势。

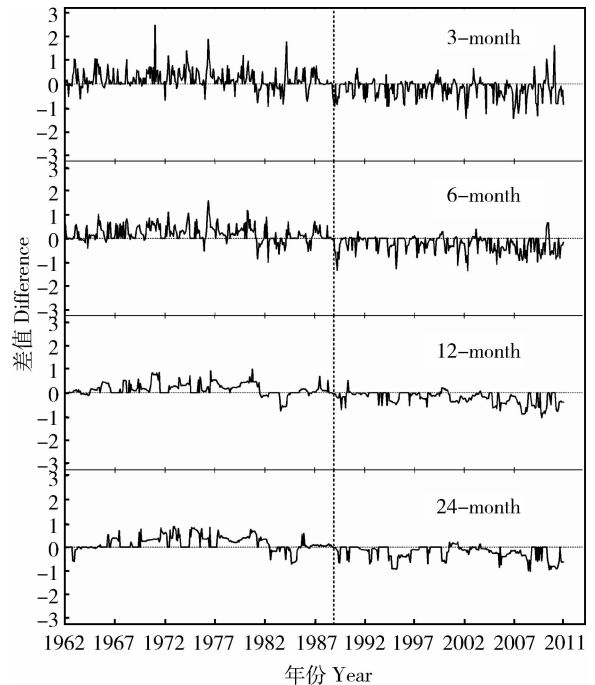


图3 1962—2011年多时间尺度SPEI和SPI的差值(SPEI-SPI)变化趋势

Fig. 3 Time series of the difference(SPEI minus SPI) between multiscalar SPEI and SPI,1962—2011

2.2 SPI和SPEI指数与作物气候产量的关系

通过对北京地区气候演变趋势的分析,本研究将干旱指数与气候产量的关系研究划分为2个阶段分别进行,即:阶段1:1962—1989年,阶段2:1990—2011年。选择作物生育期内SPI和SPEI与作物气候产量进行相关分析(表2和表3,表中结果未列出各时间尺度与气候产量均不显著月份的相关系数)。

2.2.1 与作物气候产量的相关分析

北京地区玉米气候产量与干旱指数相关分析结果显示(表2),在阶段1中仅 SPI_9-9 与玉米气候产量相关性达显著水平($P < 0.05$)。而阶段2中有更多月份和时间尺度的干旱指数与气候产量显著相关,干旱指数与气候产量间的相关性也有所提高。其中, SPI_3-8 和 $SPEI_3-8$ 与气候产量的相关系数分别为0.72和0.66,均达到极显著水平($P < 0.01$),是与玉米气候产量关系最为密切的干旱指数。就时间尺度分析,3 m相关性最强。2种干旱指数相比较,SPI与气候产量的相关更密切。

北京地区以冬小麦为主,因此选取冬小麦播种年10—12月和收获年1—6月的干旱指数与气候产量进行相关分析(表3)。阶段1中没有干旱指数与气候产量达到显著水平。阶段2中,气候产量与干

旱指数的相关明显提升。分析干旱指数与气候产量相关的变化趋势,较长时间尺度下(12 和 24 m)随着月份的增长两者的相关性随着提高,而较短时间尺度下(3 和 6 m)则随月份的推后而降低。较长时

间尺度的干旱指数与气候产量的相关性更强。其中,SPI₂₄₋₅ 和 SPEI₂₄₋₅ 与气候产量的相关系数均为 0.72,达到极显著水平。两种干旱指数比较,SPEI 与气候产量相关更为密切。

表 2 各时间尺度 SPI 和 SPEI 值与玉米气候产量间相关分析

Table 2 Summary of correlation analysis of maize climatic yields and multiscale drought indices in Beijing

Year	Month	SPI ₁	SPI ₃	SPI ₆	SPI ₁₂	SPI ₂₄	SPEI ₁	SPEI ₃	SPEI ₆	SPEI ₁₂	SPEI ₂₄
1962—1989	9	0.04	-0.39*	-0.39*	-0.38*	0.00	0.05	-0.35	-0.32	-0.29	0.03
1990—2011	6	0.28	0.24	0.18	0.43*	0.28	0.27	0.15	0.11	0.33	0.22
	7	0.57**	0.67**	0.63**	0.62**	0.50*	0.57**	0.60**	0.58**	0.56**	0.40
	8	0.51*	0.72**	0.67**	0.61**	0.56**	0.48*	0.66**	0.60**	0.54**	0.48*
	9	0.04	0.67**	0.67**	0.62**	0.54**	0.07	0.64**	0.60**	0.57**	0.48*

注：* 表示 $P < 0.05$ ；** 表示 $P < 0.01$ 。下表同。

Note: * Significant at $P < 0.05$, ** significant at $P < 0.01, n = 22$. The same below.

表 3 各时间尺度 SPI 和 SPEI 值与冬小麦气候产量间相关分析

Table 3 Summary of correlation analysis of wheat climatic yields and multiscale drought indices in Beijing

Year	Month	SPI ₁	SPI ₃	SPI ₆	SPI ₁₂	SPI ₂₄	SPEI ₁	SPEI ₃	SPEI ₆	SPEI ₁₂	SPEI ₂₄
1990—2011	10	-0.15	0.49*	0.61**	0.60**	0.67**	-0.11	0.49*	0.64**	0.64**	0.68**
	11	0.00	0.23	0.58**	0.62**	0.69**	0.03	0.22	0.61**	0.66**	0.71**
	12	-0.13	-0.08	0.58**	0.62**	0.69**	-0.10	-0.05	0.62**	0.67**	0.71**
	1	-0.29	-0.15	0.48*	0.62**	0.69**	-0.28	-0.09	0.48*	0.66**	0.71**
	2	-0.01	-0.19	0.18	0.64**	0.69**	0.07	-0.13	0.18	0.68**	0.71**
	3	0.08	-0.12	-0.05	0.64**	0.70**	0.12	0.01	-0.04	0.68**	0.71**
	4	0.08	0.01	0.04	0.65**	0.71**	-0.13	-0.06	0.01	0.68**	0.71**
	5	0.30	0.23	0.17	0.66**	0.72**	0.34	0.22	0.18	0.68**	0.72**

2.2.2 与作物气候产量的回归分析

干旱指数与玉米气候产量进行回归分析,结果显示两者的关系更符合二次项形式。其中,以 SPI₃₋₈ 和 SPEI₃₋₈ 与玉米气候产量建立的回归方程显著性最高($P < 0.01$)。方程形式为:

$$y = -182.946x_1^2 + 445.371x_1 + 469.492$$

$$y = -326.002x_2^2 + 387.619x_2 + 652.434$$

其中,y 为玉米气候产量, x_1 为 SPI₃₋₈; x_2 为 SPEI₃₋₈。2 个方程的拟合优度(R^2)分别为 0.600 和 0.601。分析方程的形式,气候产量与干旱指数间呈现二次项系数为负的抛物线关系,抛物线顶点在 X 轴上方(图 4)。二次曲线与 X 轴围成区域为玉米增产区。X 轴下方区域表明严重旱涝状况均会造成产量损失。抛物线顶点坐标能够反映该地区的最

优旱涝状态(X 轴坐标)以及最大增产可能(Y 轴坐标)。抛物线与 X 轴的两个交点分别代表对产量造成影响旱涝阈值。SPI 与气候产量回归方程显示,北京地区当 SPI = 1.2 时,可获得最大增产 740.5 kg/hm²。SPI 值在 -0.8~3.2 之间时,玉米气候产量为正值。分析 SPEI 与气候产量建立的方程,当 SPEI = 0.6 时,能达到最大产量增益 767.7 kg/hm²,SPEI 值在 -0.9~2.1 之间时玉米气候产量为正值。

选取播种年相关性最强的 SPI₁₂₋₁₂ 和 SPEI₁₂₋₁₂ 以及收获年相关性最强的 SPI₂₄₋₅ 和 SPEI₂₄₋₅ 分别与冬小麦气候产量进行回归分析,建立线性回归方程:

$$y = 214.376x_1 + 91.683$$

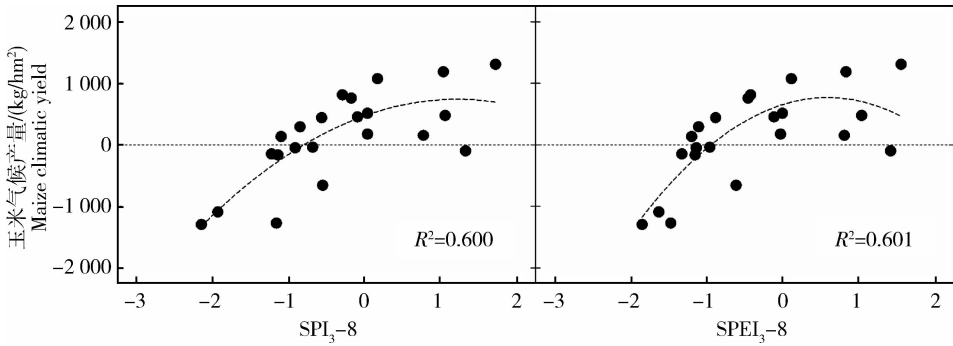
$$y = 245.728x_2 + 104.713$$

$$y = 232.192x_3 + 150.603$$

$$y = 245.139x_4 + 160.232$$

式中, y 为冬小麦气候产量, x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 分别为 SPI_{12-12} 、 SPI_{24-5} 、 $SPEI_{12-12}$ 和 $SPEI_{24-5}$ 。所建立的方程显著性均达到极显著水平, 拟合优度分别为 0.479、0.518、0.502 和 0.512。由回归方程可知, 冬

小麦气候产量与干旱指数呈线性增长关系, 回归方程与 X 轴交点分别为 -0.427、-0.426、-0.649 和 -0.654, 这些值是影响产量的关键阈值。小于上述阈值的干旱状态将会使冬小麦气候产量为负, 造成产量损失; 大于时则气候产量为正, 冬小麦能够在趋势产量的基础上有所增产(图 5)。

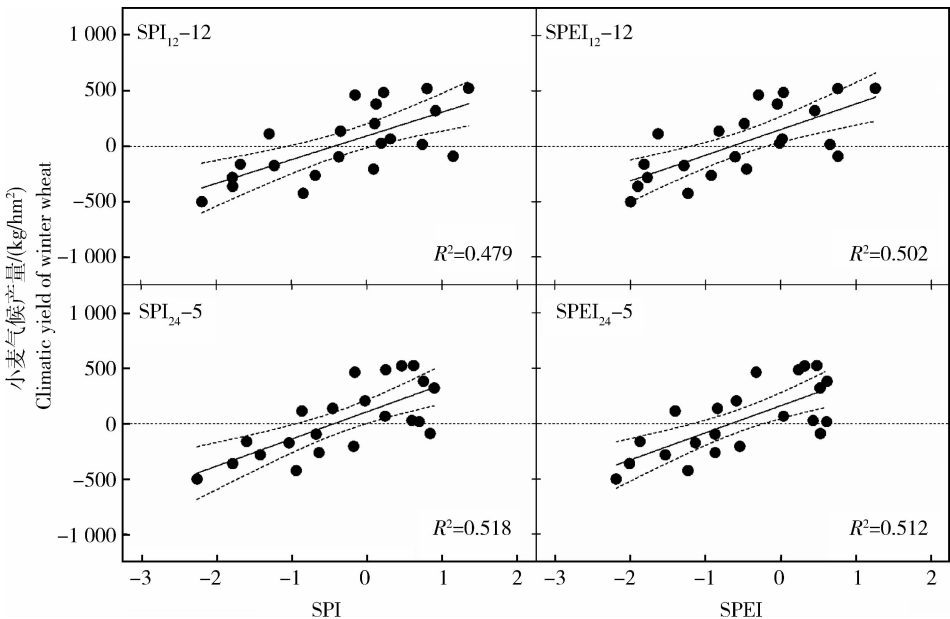


虚线表示二次项回归方程, 方程显著性达极显著水平 ($P < 0.01$), R^2 代表决定系数。

The dotted line indicates the binomial regression function, each of the functions is significant at $P < 0.01$. The respective determination coefficients (R^2) are in the insert. The maize yield variability is in the period 1990 to 2011.

图 4 1990—2011 年玉米气候产量与干旱指数的关系

Fig. 4 Scatter plot for maize yield variability against the 3-month SPI and SPEI (June-August) values



实线表示线性回归方程, 方程显著性达极显著水平 ($P < 0.01$), 虚线表示 95% 置信区间, R^2 代表决定系数。

The solid line indicates the linear regression function for the SPI and the SPEI values, each of the functions is significant at $P < 0.01$, while the dotted lines are for the 95% confidence interval. The respective determination coefficients (R^2) are in the insert. The wheat yield variability is in the period 1990 to 2011.

图 5 1990—2011 年冬小麦气候产量与干旱指数回归分析

Fig. 5 Scatter plot for wheat yield variability against the 12- and 24-month SPI and SPEI values

3 讨论

3.1 干旱化趋势分析

华北农作区干旱加重趋势显著^[15-16],气温升高、蒸发增强加剧了华北地区的干旱化程度^[17-18]。本研究表明 SPEI 指数判定的干旱频次和强度与大气温度的变化趋势相符。以 1989 年为界,前后两个历史时期内 SPEI 与 SPI 所评判的干湿事件存在明显的不同。1962—1989 年间 SPI 判定的干湿状态更干,而在近 22 年来 SPEI 所判定的干湿状态偏干。SPEI 指数较好地反映了气候变暖加剧干旱化趋势的现象。在气候变化的条件下,显示出比 SPI 更为灵敏的干旱监测特性。

3.2 干旱指数与作物产量的关系

许多学者借助多时间尺度干旱指数研究了干旱与作物产量、品质的关系^[26-29]。研究结果表明,选择合理时间尺度和关键月份的干旱指数能够用来分析干旱对作物产量的影响。在北京地区,反映雨季干湿状态的 $SPEI_{3-8}$ 可以用来分析干旱对玉米生产的影响。而反映区域地下水水文状况的 $SPEI_{24-5}$ 、 $SPEI_{24-12}$ 则可以评估干旱对冬小麦产量的影响。

本研究结果显示,SPEI 与 SPI 相比并没有表现出更优的评价性能,这说明研究区域内降水量变化所引起的干旱仍然是造成产量损失的主要原因。其次,由于 SPEI 计算方法采用 Thornthwaite 经验公式估算 PET,结果可能并不准确。今后通过改进 PET 计算方法,使 SPEI 能够更准确地评价水分盈亏,是 SPEI 在农业领域应用的重要研究方向。

3.3 干旱对玉米产量的影响

Yamoah 等^[26]研究认为 SPI 与玉米产量间具有良好的曲线关系,可以借助 SPI 指数决策氮素和水管理。相关分析结果显示,评价干旱对玉米产量影响的最优时间尺度为 3~6 m。就北京地区而言,6、7 和 8 月是玉米生长最旺盛、需水量最高的时期,也是该区降水发生最集中的时段。反映此阶段旱涝状况的 SPI_{3-8} / $SPEI_{3-8}$,可以准确地量化水分状况差异对玉米气候产量所造成的影响。针对 1990—2011 年阶段所建立的回归方程显著性高,预测性能优,显示出近 22 年来水分状况与玉米产量间的关系更为密切。上述现象出现的原因主要有两方面,首先冬小麦-夏玉米一年两熟并不是该区域传统的种植模式,受气候变化的影响,该地区光热资源明显改善,冬小麦-玉米一年两熟面积在北京地区逐步扩大

并逐渐成为主导模式^[30]。伴随着玉米播种面积的逐年提高,旱涝状况与玉米产量变化的关系日趋明显;其次,随着区域玉米产量水平不断提升,由于水分条件限制而引发的产量波动也相应增加。玉米气候产量与干旱指数的关系显示,SPI/SPEI 判定的干湿状态在 -0.8 到 3.2 和 -0.9 到 2.1 之间时气候产量为正,优于轻度干旱的水分条件时就可使玉米产量相对趋势产量增产。当 $SPI=1.2$ (中等湿润)、 $SPEI=0.6$ (轻度湿润)时,可获得最大气候产量增益,即需要比正常状态更为湿润的水分条件才能获得最大的增产值。这表明北京地区玉米生产与气候条件间尚未达到最佳匹配,通过更新品种和采用新的种植技术,进一步提高水分利用效率或是增加水分投入是提高北京地区玉米产量的可能途径。

3.4 干旱对冬小麦产量的影响

冬小麦生育季干旱少雨,降水量远不能满足其生长发育的需要,补灌是保证冬小麦稳产高产的关键手段。对产量的追求以及农民种粮积极性的提高促进了华北地区灌溉农业的快速发展。在地表水持续衰减的情况下,地下水特别是浅层地下水相应成为该区域用水最重要的来源,其开采量达到总供水量的 60% 以上。前人研究表明,在灌溉农业区较长时间尺度的 SPI 与地下水水文条件关系密切^[5,31]。相关分析结果表明,1990—2011 年 24 m 时间尺度干旱指数与冬小麦气候产量的关系最为密切,这表明地下水水文条件与冬小麦产量的关系变得更加密切。回归分析结果显示,北京地区气象产量与干旱指数间是线性正相关关系,增产阈值为 $SPI \approx -0.4$ (正常状态)、 $SPEI \approx -0.6$ (轻度干旱),也就是说接近或处于正常干湿状态下气候产量便可为正,使冬小麦能够在趋势产量的基础上有所增产。

华北平原是我国重要的粮食产区,同时也是主要的水分亏缺区。冬小麦高产对地下水开采的依赖加重了该区域水资源匮乏的局面。考虑到我国对粮食的巨大需求,迫使该地区仍须以高产为首要出发点。提高灌溉水利用效率是减少地下水开采,缓解区域水资源危机的必然选择。Sadat Noori 等^[29]利用冬小麦返青前月份的 SPI 指数与产量建立了回归模型,预测精度较高,可以提前 4 个月预测冬小麦产量。本研究结果也显示,冬小麦冬前 $SPEI_{24-12}$ 可解释 50.2% 的产量变异。应用 SPEI 评估冬小麦土壤水分状况并以此来决定冬小麦返青后的灌水次数和灌水量^[27-30],可以起到提高水资源利用效率的作用。

参 考 文 献

- [1] Hayes M J. Drought Indices[M]. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, 2000
- [2] Palmer W C. Meteorological Drought[M]. Research Paper No. 45. US Department of Commerce, Weather Bureau, Washington DC, 1965
- [3] McKee Thomas B, Doesken Nolan J, Kleist John. The relationship of drought frequency and duration to time scales [J]. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993(1): 17-22
- [4] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index[J]. J Am Water Resour As, 1998, 34(1): 113-121
- [5] Hayes Michael J, Svoboda Mark D, Willhite Donald A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. B Am Meteorol Soc, 1999, 80(3): 429-438
- [6] 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
- [7] Vicente-Serrano Sergio M, Beguería Santiago, López-moreno Juan I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. J Climate, 2010, 23: 1696-1717
- [8] Vicente-Serrano Sergio M, Beguería Santiago, Lorenzo-Lacruz Jorge, et al. performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interact, 2012, 16: 1-27
- [9] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649
- [10] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475
- [11] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1068-1072
- [12] 吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等. 华北地区冬小麦干旱受灾率多尺度分析[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 87-98
- [13] 周磊, 武建军, 吕爱峰, 等. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 597-607
- [14] 李树岩, 刘荣花, 马志红. 基于降水距平的黄淮平原夏玉米干旱评估指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 252-256
- [15] 陆桂华, 同桂霞, 吴志勇, 等. 近 50 年来中国干旱化特征分析[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 78-82
- [16] 赵海燕, 张强, 高歌, 等. 中国 1951—2007 年农业干旱的特征分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 201-206
- [17] 孙卫国, 程炳岩, 郭渠. 东亚季风环流对华北地区降水蒸发差的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 327-334
- [18] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 655-663
- [19] China Meteorological Data Sharing Service System[DB/OL]. Beijing: National Meteorological Information Center, 2012 [2012-9-15]. <http://cdc.cma.gov.cn/>
- [20] 农作物数据库[DB/OL]. 北京: 中华人民共和国农业部种植业管理司, 2012 [2012-9-15]. <http://202.127.42.157/moazzys/nongqing.aspx/>
- [21] Guttman N B. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm[J]. J Am Water Resour As, 1999, 35(2): 311-322
- [22] Abramowitz Milton, Stegun Irene A. Handbook of Mathematical Functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. Washington DC, USA: Government Printing Office, 1964
- [23] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55-94
- [24] 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
- [25] 温晓慧, 温桂清, 薛敏. 用直线滑动均值法做作物趋势产量预报[J]. 黑龙江气象, 1994(1): 19-20
- [26] Yamoaha C F, Walters D T, Shapiro C A, et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 80: 113-120
- [27] Mkhabela M, Bullock P, Gervais M, et al. Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies [J]. Agr Forest Meteorol, 2010, 150: 399-410
- [28] Potop V, Možný M, Soukup J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic [J]. Agr Forest Meteorol, 2012, 156: 121-133
- [29] Sadat Noori S M, Liaghat A M, Ebrahimi K. Prediction of crop production using drought indices at different time scales and climatic factors to manage drought risk[J]. J Am Water Resour As, 2012, 48(1): 1-9
- [30] 李克南, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析Ⅲ. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2088-2097
- [31] Khan S, Gabriel H F, Rana T. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2008, 22(2): 159-177
- [32] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 中国北方冬小麦的水分亏缺与气候生产潜力: 近 40 年来的动态变化研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 121-130
- [33] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32
- [34] 秦欣, 刘克, 周丽丽, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作节水体系周年水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 4014-4024
- [35] Sun Hongyong, Shen Yanjun, Yu Qiang, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agr Water Manage, 2010, 97: 1139-1145