

郭晓丽,陈素华. 内蒙古中部地区春玉米水分亏缺时空特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 295-300, [GUO Xiaoli, CHEN Suhua. Temporal and Spatial Characteristics of Water Surplus Deficit Index of Spring Maize in Central Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 295-300], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0295

内蒙古中部地区春玉米水分亏缺时空特征

郭晓丽¹, 陈素华²

(1. 内蒙古自治区乌兰察布市气象局, 内蒙古 集宁 012000;

2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:水分亏缺指数是判别作物干旱程度的重要指标之一,分析作物水分亏缺指数时空变化规律可为作物合理布局和科学有效灌溉提供理论依据。基于内蒙古中部地区24个气象站1971—2015年降水、气温、风速等逐日气象观测数据和春玉米生育期观测与调查资料,以Penman-Monteith模型为基础计算春玉米需水量,并结合作物有效降水量,定量分析春玉米水分亏缺指数的时空分布特征。结果表明,内蒙古中部地区春玉米生长季内水分亏缺指数呈“高、低、高”的波动变化;近45 a来,春玉米水分亏缺指数在生育前期和后期呈下降趋势,而在生育中期则呈上升趋势,且抽雄-乳熟期的水分亏缺指数上升趋势明显,1990年代以后上升趋势达到显著性水平,说明水分亏缺指数表现出向春玉米需水关键期增加的趋势,并在1991年发生显著突变;空间上,春玉米水分亏缺指数呈带状分布,且呈北高南低的分布格局,这与该区降水量南多北少的分布特征有关。

关键词:需水量;水分亏缺指数;时空特征;春玉米

文章编号:1006-7639(2018)02-0295-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0295

中图分类号:S16

文献标志码:A

引言

内蒙古中部地区,包括呼和浩特、包头及乌兰察布3市,属于干旱、半干旱气候,降水时空分布不均匀^[1],蒸发量大,水资源比较贫乏,供需矛盾突出。作物生长季(4—9月)降水主要集中在6—8月,雨热与作物生长发育同步,基本属于雨养农业。春玉米是该区主要粮食作物之一^[2],水资源短缺是导致春玉米产量不稳不高的一个重要因素。由于春玉米不同生育期所需水分不同,受旱程度也有所差异,研究自然条件下春玉米不同生育期水分亏缺状况,对当地水资源优化利用、合理制定灌溉方案至关重要^[3]。

表征作物干旱的指标较多,如降水量和降水距平百分率、标准化降水指数、相对湿度指数、土壤墒情干旱指数以及Palmer干旱指数等。作物水分亏缺指数CWSDI(crop water surplus deficit index)是衡量农作物生长发育期间旱涝情况的重要指标之一,是判别作物干旱程度的重要依据^[4-5],尽管该指

标在实际应用中存在一些不足^[6],但仍是目前监测农业干旱最常用的综合性干旱监测指标^[7-12]。目前,利用水分亏缺指数研究作物干旱多集中在水分供需的时空特征和干旱发生规律及成因,如李双双等^[13]通过计算西南地区有效降水量、水稻需水量和水分盈亏率,分析该地区近54 a水稻生长季水分亏缺率的时空变化特征,并探讨了环流异常、地理环境与水分亏缺率时空变化的关系;李喜平^[14]利用河南省农业气象观测站资料,分析了夏玉米各生长阶段需水量和水分亏缺量的变化趋势,并且对需水量的空间分布与海拔高度的相关性进行了分析;董秋婷等^[15]选用东北地区气象观测数据和玉米播种面积资料,分析了春玉米生长季内水分供需变化趋势和不同生长阶段干旱的时空特征分布;张建军等^[16]分析了安徽省夏玉米不同生长阶段水分亏缺指数变化趋势,以及不同时段干旱发生频率和风险。由于作物对一定时期内有限水分亏缺具有适应性和抵抗性^[17-18],而玉米对水分亏缺较敏感,经常因水分亏

收稿日期:2017-09-21;改回日期:2018-01-05

基金项目:内蒙古科技厅项目“内蒙古农用天气预报技术研究”(20120427)资助

作者简介:郭晓丽(1981—),女,硕士,工程师,主要从事生态与农业气象预报及气候评价等方面的研究。E-mail:guoxiaoli987@163.com。

通信作者:陈素华(1964—),女,硕士,正研级高工,主要从事农业气象灾害预报和评估工作。E-mail:nmgxrk@163.com。

缺造成严重减产^[19]。本文针对干旱、半干旱气候的内蒙古中部地区春玉米,采用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式计算春玉米不同生育期需水量,并结合不同生育期有效降水量,定量分析该区春玉米不同生育阶段水分亏缺量的时空变化特征,为提高有效降水利用率、合理优化春玉米生产布局提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选取内蒙古中部 24 个气象观测站 1971—2015 年 4—9 月降水、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、平均风速逐日资料,资料来源于内蒙古自治区气象信息中心;同期春玉米生育期观测及调研资料,其来源于内蒙古中部各旗县春玉米生育期的调研和农业气象观测站。

1.2 研究方法

1.2.1 春玉米各生育阶段的划分

春玉米生育阶段是指春玉米从播种到成熟的时间段。假定春玉米种植品种不变,根据其多年生育期观测资料,采用各生育阶段长度的多年平均值作为当地一般生育阶段,确定内蒙古中部地区春玉米各生育期:播种 - 七叶期(4 月下旬至 6 月中旬)、七叶 - 抽雄期(6 月下旬至 7 月下旬)、抽雄 - 乳熟期(8 月上旬至下旬)、乳熟 - 成熟期(9 月上旬至下旬)。

1.2.2 有效降水量的计算

有效降水量指总降水量中实际补充到作物根系

层土壤中的净水量,能够直接供作物利用。某次有效降水量的计算公式为:

$$P_{ej} = a_j \times p_j \quad (1)$$

式中: P_{ej} 为 j 次降水的有效降水量(mm); p_j 为 j 次降水总量(mm); a_j 为有效利用系数。根据康绍忠等^[20]研究结果, a_j 的取值如下:在作物生育初期(播种 - 七叶期),当 $p_j \leq 3$ mm 时, $a_j = 0$;当 3 mm $< p_j \leq 50$ mm 时, $a_j = 0.9$;当 $p_j > 50$ mm 时, $a_j = 0.75$ 。在作物生育后期(七叶 - 成熟期),当 $p_j \leq 5$ mm 时, $a_j = 0$;当 5 mm $< p_j \leq 50$ mm 时, $a_j = 0.9$;当 $p_j > 50$ mm 时, $a_j = 0.75$ 。因此,某生育阶段总有效降水量可用下式表示:

$$P_e = \sum_{j=1}^n P_{ej} \quad (2)$$

式中: P_e 为某生育阶段总有效降水量(mm); j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)为某生育阶段的降水次数。

1.2.3 需水量的计算

采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的间接计算方法计算春玉米不同生育期需水量,其计算公式^[21]为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中: ET_c 为作物需水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)^[22]。作物系数因气候类型、土壤类型、作物种植制度等条件的不同而有所差异,本文综合 FAO 推荐的作物系数及我国学者的试验结果,以旬为单位确定内蒙古中部春玉米的作物系数^[23](表 1)。

表 1 内蒙古中部春玉米全生育期逐旬作物系数

Tab. 1 The 10-day crop coefficient of spring maize during the whole growing period in central Inner Mongolia

	4 月		5 月		6 月			7 月			8 月			9 月		
	下旬	中旬	下旬	中旬	下旬	中旬	下旬	下旬	中旬	下旬	下旬	中旬	下旬	下旬	中旬	
作物系数	0.45	0.48	0.52	0.54	0.59	0.71	0.84	0.94	1.16	1.25	1.15	1.08	0.92	0.91	0.72	0.68

采用 FAO(1998)推荐的 Penman - Monteith 公式,计算参考作物蒸散量 ET_0 ,表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中: R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),逐日计算时相较于 R_n 很小,可忽略不计; T 为平均气温($^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压

与温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); u_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.2.4 作物水分亏缺指数的计算

春玉米某生育阶段的水分亏缺指数 CWSDI 是该阶段内春玉米需水量和有效降水量之差与春玉米需水量之比,即降水亏缺量与春玉米需水量之比,表征水分盈亏程度^[24],公式为:

$$CWSDI_i = \frac{ET_{ci} - P_{ei}}{ET_{ci}} \quad (5)$$

式中: $CWSDI_i$ 为水分亏缺指数, i ($i = 1, 2, 3, 4$) 代表春玉米各生育阶段; ET_{ci} 为春玉米生育阶段 i 的需水量 (mm); P_{ci} 为生育阶段 i 的有效降水量 (mm)。当 $CWSDI_i > 0$ 时, 表示春玉米 i 生育阶段水分亏缺; 当 $CWSDI_i = 0$ 时, 表示水分收支平衡; 当 $CWSDI_i < 0$ 时, 表示水分盈余。作物水分亏缺指数反映了生育阶段 i 作物需水量和有效降水量的平衡关系, 重度水分亏缺会影响该生育阶段春玉米生长发育状况, 进而影响春玉米产量。

2 结果与分析

2.1 春玉米生长季内水分亏缺指数变化特征

图1是内蒙古中部春玉米生育期各旬有效降水量、需水量及水分亏缺指数变化。可以看出, 内蒙古中部春玉米各生育阶段需水量均大于有效降水量, 且两者变化趋势一致, 都呈现单峰型曲线变化, 而水分亏缺指数正相反, 呈现“高、低、高”的波动变化。其原因主要是该区春玉米属于晚熟品种, 从4月下旬开始播种, 5月中旬进入出苗期, 6月中旬进入七叶期, 7月下旬开始抽雄, 8月下旬进入乳熟期, 9月下旬成熟。春玉米播种到七叶期, 内蒙古中部地区有效降水量为 51.2 ~ 74.4 mm, 平均值 63.8 mm, 需水量为 187.0 ~ 211.1 mm, 平均值 200.4 mm, 有效降水量远不能满足需水要求, 水分亏缺指数在这一阶段最高, 且最高点在播种期, 因此在春播前进行适当灌溉对春玉米的产量极为有利。进入6月中下旬降水逐渐增多, 春玉米需水量也缓慢上升, 但降水的增加速率大于需水量, 这时水分亏缺指数开始下降。七叶到抽雄期, 春玉米需水量进入快速增长期, 且抽雄期需水量达到整个生育期的最大值, 而此时该区

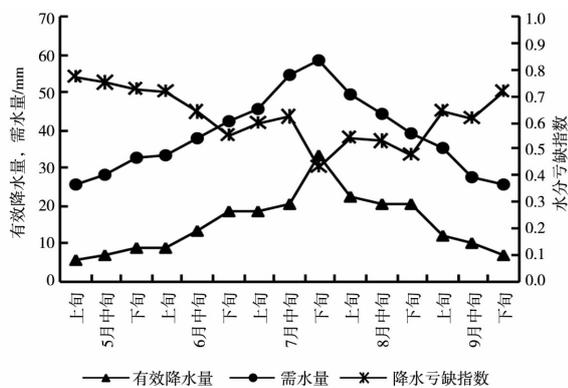


图1 春玉米生育期各旬有效降水量、需水量及水分亏缺指数变化

Fig. 1 The 10-day variations of effective precipitation, water requirement and crop water surplus deficit index during the growth period of spring maize in central Inner Mongolia

进入多雨季节, 7月上旬到8月上旬的有效降水量占整个生育期的 41.3%, 且在7月下旬达到峰值, 这时水分亏缺指数最小, 但由于需水量仍大于有效降水量, 尤其抽雄前后是需水关键期, 对水分特别敏感, 自然降水不能满足玉米生长发育需求, 缺水易造成幼穗发育不好, 果穗小, 籽粒少, 雄穗或雌穗抽不出来, 形成“卡脖旱”, 同时缺水亦会造成雄雌穗间隔期太长, 授粉不良, 结实率低, 导致产量下降。抽雄到乳熟期, 春玉米需水量缓慢下降, 而8月中、下旬降水量也在逐渐减少, 此时作物水分亏缺指数基本保持不变。乳熟到成熟期, 春玉米需水量快速下降, 而平均有效降水量仅为 30.0 mm, 水分亏缺指数再次升高。

2.2 春玉米不同生育阶段水分亏缺指数年际变化

对春玉米各生育阶段平均水分亏缺指数的年际变化特征进行分析(图2)。可以看出, 播种-七叶期, 近 45 a 内蒙古中部地区春玉米水分亏缺指数在 32% (2004 年) ~ 82% (2009 年) 之间, 整体呈微弱下降趋势, 气候倾向率为 $-1.46\% \cdot (10 a)^{-1}$; 七叶-抽雄期, 水分亏缺指数在 23% (1995 年) ~ 82% (2009 年) 之间, 整体呈微弱上升趋势, 气候倾向率为 $1.07\% \cdot (10 a)^{-1}$, 其中 1990 年代明显偏低; 抽雄-乳熟期, 水分亏缺指数为 -5% (1985 年) ~ 91% (2015 年), 整体呈显著上升趋势, 气候倾向率为 $7.76\% \cdot (10 a)^{-1}$, 且 1970—1980 年代波动幅度相对较大; 乳熟-成熟期, 水分亏缺指数为 31% (1995 年) ~ 94% (2011 年), 整体呈微弱下降趋势, 气候倾向率为 $-1.68\% \cdot (10 a)^{-1}$, 且具有明显的“先升后降”阶段性变化特征。可见, 内蒙古中部地区春玉米生育前期和后期水分亏缺指数整体呈不显著下降趋势, 而生育中期水分亏缺指数整体呈上升趋势, 其中抽雄-乳熟期上升趋势显著。其原因可能是近些年该区春季降水量变化表现为增加趋势, 而夏、秋季降水量变化表现为减少趋势, 特别是进入 21 世纪, 夏季降水量异常偏少, 而春季降水量显著偏多^[25], 说明该区季节性干旱明显, 水分亏缺指数表现出向春玉米需水关键期增加的趋势, 这对春玉米产量的形成非常不利。

应用 Mann-Kendall 方法, 对内蒙古中部地区 1971—2015 年春玉米发育中期七叶-抽雄期、抽雄-乳熟期 2 个阶段的平均水分亏缺指数进行突变分析(图3)。由图3可以看出, 七叶-抽雄期, 春玉米水分亏缺指数在 1970 年代和 1990 年代大致表现出减小趋势, 并且在 1979 年达到 0.05 的显著性水平临界线, 说明这两个时段内旱情呈现下降趋势; 1980

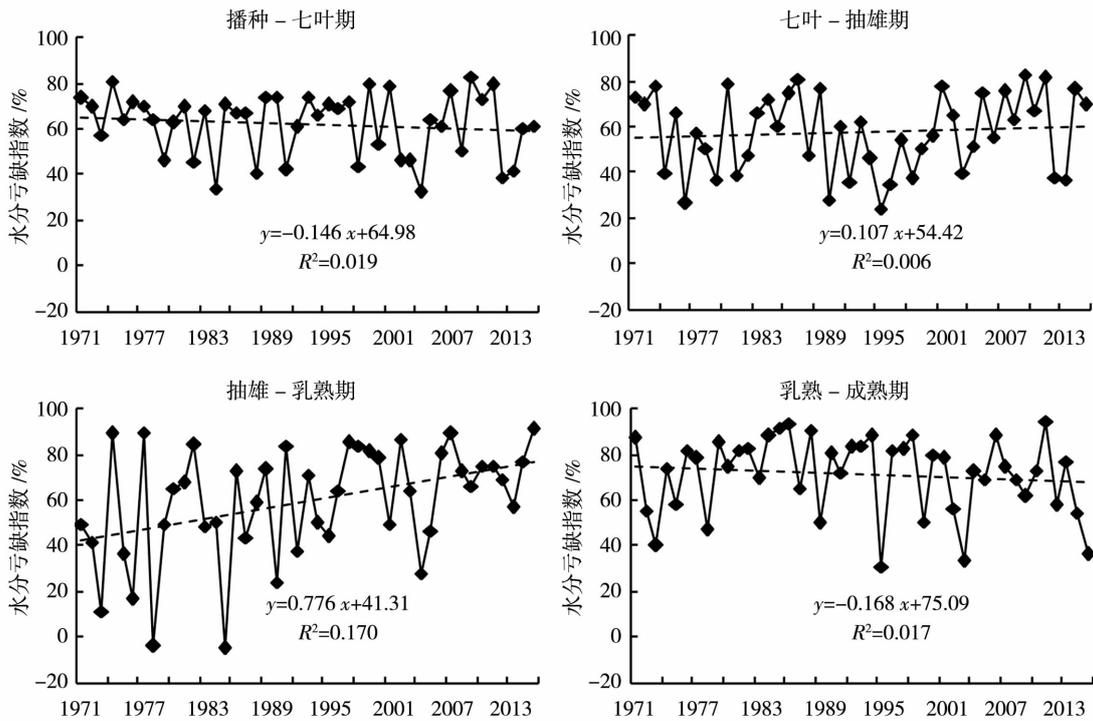


图2 1971—2015年内蒙古中部地区春玉米不同生育阶段水分亏缺指数年际变化
Fig. 2 The annual variations of CWSDI at different growing periods of spring maize in central Inner Mongolia from 1971 to 2015

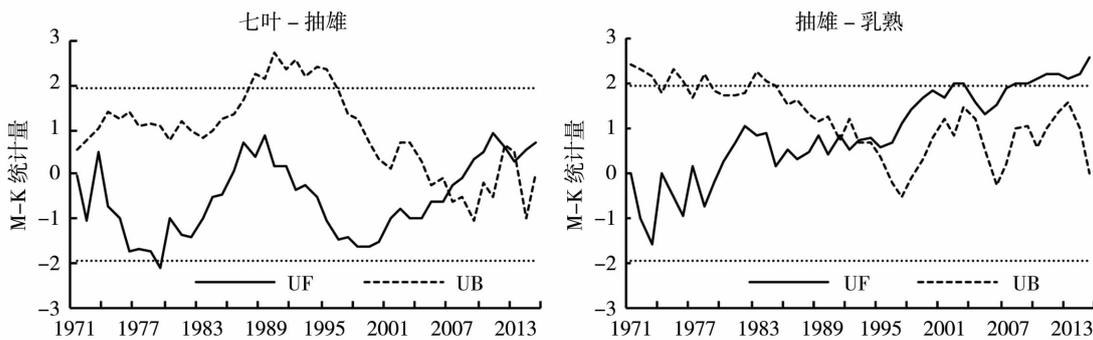


图3 1971—2015年内蒙古中部地区春玉米生育中期水分亏缺指数的M-K检验
Fig. 3 Mann-Kendall test of CWSDI in the middle of growth period of spring maize in central Inner Mongolia during 1971-2015

年代和2000年以后水分亏缺指数基本处于增加趋势,但都没有通过0.05的显著性水平临界线,表明这两个时间段内旱情上升趋势并不明显。从UF和UB曲线的交点看,2000年以后UF和UB曲线多次发生交叉,但突变不显著。抽雄-乳熟期,春玉米水分亏缺指数在1990年代以前处于波动增加趋势,而后呈明显增加趋势,且在2002年、2003年和2007年以后均超过0.05的显著性水平临界线,说明春玉米在此生育阶段内旱情逐年上升,2000年代以后上升趋势十分显著。从UF和UB曲线的交点位置确定,抽雄-乳熟期内春玉米水分亏缺指数在1991年

发生显著突变。

2.3 春玉米水分亏缺指数空间分布

从内蒙古中部地区1971—2015年春玉米各生育阶段平均水分亏缺指数空间分布(图4)看出,整个生育阶段水分亏缺指数呈带状分布,且呈北高南低的分布格局,这与该区降水量南多北少的分布特征有关。播种-七叶期[图4(a)],CWSDI高值区主要分布在研究区西北部,并向西南部和东南部逐渐递减,低值区主要分布于和林县以及察右前旗、丰镇市和兴和县。七叶-抽雄期[图4(b)],CWSDI高值区面积迅速扩大,大致占全区面积的一半,主要

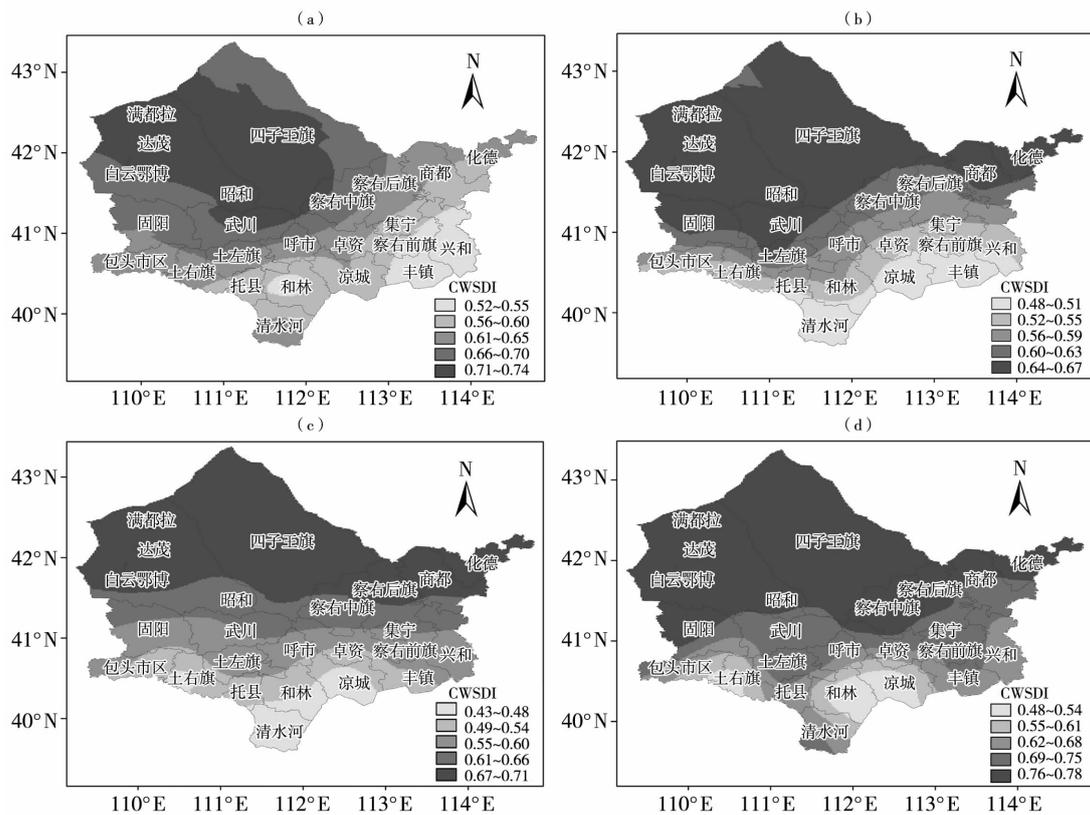


图4 内蒙古中部地区春玉米不同生育阶段水分亏缺指数空间分布

(a)播种-七叶期;(b)七叶-抽雄期;(c)抽雄-乳熟期;(d)乳熟-成熟期

Fig. 4 Spatial distribution of CWSDI of spring maize at different growing periods in central Inner Mongolia

(a) from the seeding to seven-leaf stage, (b) from the seven-leaf to tasselling stage,

(c) from the tasselling to milk-ripe stage, (d) from the milk-ripe to mature stage

分布在固阳、武川、土左旗、四子王旗、商都、化德一线以北区域,并向南逐渐递减。随着夏季集中降雨的到来,抽雄-乳熟期[图4(c)],CWSDI 高值区范围较上一阶段有所减小,且明显呈现由北向南逐渐减小的纬向分布特征。乳熟-成熟期[图4(d)],随着降雨的逐渐减少,CWSDI 高值区面积再次扩大,主要分布在固阳、昭 and 察右中旗、察右后旗、商都和化德一线以北地区,低值区主要分布在引黄灌区的土右旗以及和林县、凉城县。

3 讨论

采用作物水分亏缺指数这一指标研究内蒙古中部地区春玉米水分供需特征符合春玉米生产实践,且方法准确、简单易行,可以作为该区春玉米干旱判别的指标依据。春玉米生长季内水分亏缺指数呈现“高、低、高”的变化趋势,这与一年生农作物^[4,26-27]的水分亏缺指数变化趋势一致。

内蒙古中部春季雨水少,气温回升快,地表蒸发量大,此时水分亏缺指数较高,势必会影响春玉米的

出苗速度和出苗率;抽雄前后是春玉米需水敏感期,其中抽雄-吐丝期,尽管历时短暂,需水绝对量小,但日需水强度为一生之最大,如果此时自然降水偏少,会严重影响最终产量。在气候变暖背景下,该区域旱早发生频率升高,强度增大,春玉米减产率也随之增加^[28]。因此,在春玉米生育关键期进行适当灌溉是稳定产量的关键。但在实际生产管理时,如何进行及时有效的灌溉,以及灌溉多少水量?还需要今后做进一步的研究。

另外,在计算水分亏缺指数时没有考虑夏季降水后延性的影响,实际上在春玉米生长发育过程中,上一阶段的多余水分会在土壤中保存下来,供下一阶段生长所需,因此本文计算的水分亏缺指数存在一定的误差。同时,也未考虑气候变化背景下春玉米生育期变化,因而气候变化对春玉米生育期需水量和水分亏缺指数的影响,以及如何从节水角度提高春玉米产量是今后研究的重点方向。

4 结论

(1)内蒙古中部地区春玉米生长季内水分亏缺

指数呈“高、低、高”的波动变化特征。

(2)从内蒙古中部地区春玉米不同生育阶段水分亏缺指数年际变化来看,近 45 a 来,春玉米播种-七叶期、七叶-抽雄期和乳熟-成熟期的水分亏缺指数整体均无明显变化趋势,而抽雄-乳熟期的水分亏缺指数整体呈显著增加趋势,尤其是 20 世纪 90 年代以后,增加趋势更加明显,表明该区夏季阶段性干旱呈上升趋势,因而保证这一需水关键期的水分供应对于春玉米稳产具有重要作用。

(3)内蒙古中部地区春玉米各生育阶段水分亏缺指数空间上整体呈北高南低的带状分布,这与该区降水量南多北少的分布特征有关。播种-七叶期,春玉米 CWSDI 高值区面积较小,七叶-抽雄期 CWSDI 高值区范围迅速扩大;随着集中降雨的到来,抽雄-乳熟期 CWSDI 高值区面积有所减小,且 CWSDI 纬向分布特征明显;乳熟-成熟期,随着降雨的逐渐减少,CWSDI 高值区面积再次扩大。

参考文献:

- [1] 任志艳,延军平,王鹏涛. 1960—2012 年内蒙古降水集中度和降水集中中期时空变化[J]. 中国沙漠,2016,36(3):760-766.
- [2] 高涛,陈彦才,于晓. 气候变暖对内蒙古三种主要粮食作物单产影响的初步分析[J]. 中国农业气象,2011,32(3):407-416.
- [3] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 黄淮海平原主要农作物全生育期水分盈亏变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(8):138-144.
- [4] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报,2009,25(8):28-34.
- [5] 董朝阳,杨晓光,杨婕,等. 中国北方地区春玉米干旱的时间演变特征和空间分布规律[J]. 中国农业科学,2013,46(20):4234-4245.
- [6] 佟长福,郭克贞,余国英,等. 西北牧区干旱指标分析及旱情实时监测模型研究[J]. 节水灌溉,2007(3):59-65.
- [7] 张艳红,吕厚荃,李森. 作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J]. 气象科技,2008,36(5):596-600.
- [8] 姬兴杰,成林,方文松. 未来气候变化对河南省冬小麦需水量和缺水量的影响预估[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2689-2699.
- [9] 李闯,刘艳伟,符娜,等. 基于作物水分盈亏指数的昆明水稻生长季干旱特征及成因分析[J]. 干旱地区农业研究,2016,36(3):186-192.
- [10] 陆耀凡,廖雪萍,陈欣,等. 广西右江河谷旱作灌溉需水量变化特征[J]. 气象研究与应用,2015,36(1):100-104.
- [11] 赵鸿,王润元,尚艳,等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象,2016,34(1):1-12.
- [12] 李雅善,李华,王华,等. 基于作物水分亏缺指数的宁夏酿酒葡萄干旱时空差异分析[J]. 自然灾害学报,2014,23(4):203-211.
- [13] 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素[J]. 生态学报,2016,36(18):5798-5808.
- [14] 李喜平. 河南省夏玉米生长季水分供需时空变化特征[J]. 干旱气象,2013,31(4):796-802.
- [15] 董秋婷,李茂松,刘江,等. 近 50 年东北地区春玉米干旱的时空演变特征[J]. 自然灾害学报,2011,20(4):52-59.
- [16] 张建军,盛绍学,王晓东. 安徽省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 干旱气象,2014,32(2):163-168.
- [17] NOCTOR G, GOMEZ L, VANACKER H, et al. Interactions between biosynthesis, compartmentation and transport in the control of glutathione homeostasis and signaling[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372):1283-1304.
- [18] PINHERO R G, RAO M V, PALYATH G, et al. Changes in the activities of antioxidant enzymes and their relationship to genetic and paclobutrazol-induced chilling tolerance of maize seedlings[J]. Plant Physiology, 2001,114:695-704.
- [19] 王云奇,陶洪斌,赵丽晓,等. 玉米对水分亏缺的响应[J]. 玉米科学,2014,22(2):87-92.
- [20] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:101-117.
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage paper NO 56, Rome,1998:89-102.
- [22] 毛飞,张光智,徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报,2000,11(增):128-136.
- [23] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京:中国农业科技出版社,1993:48-55.
- [24] 高晓容,王春乙,张继权. 近 50 年东北春玉米生育阶段需水量及早涝时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(12):101-109.
- [25] 包刚,吴琼,阿拉腾图雅,等. 近 30 年内蒙古气温和降水量变化分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2012,41(6):668-674.
- [26] 陈素华,王志春,李丹. 内蒙古通辽、赤峰市春玉米水分亏缺评价及区域差异[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(4):20-25.
- [27] 杨小利,王丽娜. 陇东地区冬小麦水分亏缺特征研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(6):255-261.
- [28] 李海明,托亚,窦林茵,等. 气候变暖背景下内蒙古地区旱涝趋势分析及对策[J]. 内蒙古水利,2010(2):167-169.

(下转至 309 页)