

近 35 年吴桥县夏玉米水分亏缺变化趋势分析

商蒙非 杨萌 冯宇鹏 贾浩 李硕 宋英杰 陈阜 褚庆全*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 为探讨自然降雨和有限灌溉条件下提高夏玉米的产量和水分利用效率。本研究利用 1981—2015 年吴桥气象数据和 SIMETAW 模型,分析黑龙港流域夏玉米全生育期及播种—出苗、出苗—拔节期、拔节—吐丝期和吐丝—成熟期 4 个生育阶段的有效降水量、需水量、降水耦合度和水分亏缺指数(CWDI)的变化趋势,同时分析水分亏缺对夏玉米产量的影响。结果表明:1)近 35 年来夏玉米全生育期水分亏缺指数呈不显著下降趋势;降水耦合度呈不显著上升趋势;需水量呈显著上升趋势。生育期延长是夏玉米需水量上升的主导因素,30 年来生育期延长 20 多天;2)夏玉米全生育期干旱程度主要为无旱和轻旱,概率分别为 51.43%和 45.71%,播种—出苗期和吐丝—成熟期水分亏缺指数最高;3)一般年份,夏玉米需水量与降水耦合度高,降水基本能满足夏玉米生产;水分亏缺严重的年份,应在吐丝—成熟期补灌 1 次。

关键词 夏玉米; 需水量; 干旱; 水分亏缺指数; 黑龙港地区

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2018)09-0001-10

文献标志码 A

Study on the water deficit trend of summer maize in recent 35 years in Wuqiao County, Hebei Province

SHANG Mengfei, YANG Meng, FENG Yupeng, JIA Hao,

LI Shuo, SONG Yingjie, CHEN Fu, CHU Qingquan*

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

Abstract To improve the WUE and grain yield of summer maize and make the best of rainfall in limited irrigation conditions in Heilonggang, based on summer maize yield and observed daily meteorological from 1981 to 2015, the crop water requirement, coupling degree between rainfall and water requirement, crop water deficit index (CWDI) and influence of CWDI on summer maize yield in the growth periods of summer maize were analyzed by SIMETAW model. The results showed that: 1) In recent 35 years, CWDI in the summer maize season was not significantly decreased with time, while coupling degree between rainfall and water requirement not significantly increased, and the water requirement of summer maize increased significantly. The extension of growth period was the dominant factor for the increase of summer maize water requirement, and the growth period extended more than 20 days in recent 30 years. 2) The main drought types in summer maize growth period, no drought and light drought probability, were respectively 51.43% and 45.71%. From seeding to emergence period and from tasseling to maturity period, CWDI were the highest. 3) In general years, when the coupling degree between rainfall and water requirement were high, rainfall could offer summer maize basically enough water. However, in serious water deficit years, maize should be irrigated between tasseling and maturity period.

Keywords summer maize; water requirement; drought; crop water deficit index; Heilonggang area

收稿日期: 2017-09-13

基金项目: 粮食丰产增效科技创新专项(2016YFD0300201); 公益性行业(农业)科研专项(201103001)

第一作者: 商蒙非, 博士研究生, E-mail: 598404167@qq.com

通讯作者: 褚庆全, 副教授, 主要从事农作制度与模拟模型研究, E-mail: cauchu@cau.edu.cn

近年来,受气候变化和人类活动的综合影响,干旱发生的频率和强度均呈增长趋势,干旱范围及持续时间前所未有,对农业生产造成严重的损失^[1]。华北是我国气候变化的敏感区域,近年来气候条件发生了很大的变化^[2-3],其中水热条件变化对夏玉米的生育期产生很大的影响^[4-5]。黑龙港流域是华北平原重要的夏玉米种植区,农业面临的重大资源障碍是水资源严重匮乏^[6-8],如何在有限灌溉条件下提高作物的产量和水分利用效率是亟待解决的问题^[9]。吴桥县位于黑龙港流域,其气候特点和夏玉米灌水制度在黑龙港流域具有代表性。因此,研究吴桥夏玉米生育期水分供需变化趋势对黑龙港流域制定夏玉米灌溉制度有重要的意义。

前人选用了不同的干旱指标来分析不同区域作物干旱发生规律^[10-13],如作物水分亏缺指数、标准化降雨指数、水分盈亏指数、相对湿润度指数等。尹小刚等^[11]利用标准化降雨指数和干旱灾害风险指数评估了松辽平原干旱的发生规律,并提出了免耕加宽窄行是当地最合理的土壤耕作技术。张玉芳等^[12]利用水分盈亏指数分析出了四川省玉米各生育阶段干旱分布的时空特征。杨萌等^[14]利用作物水分亏缺指数分析了河北吴桥冬小麦各生育阶段干旱发生情况。作物水分亏缺指数 CWDI (Crop water deficit index) 是分析玉米干旱发生情况比较常用的指标^[15-18],它是表征作物水分亏缺程度的指标之一,是衡量作物需水量与实际供水量平衡的重要指标。气候变化背景下,对华北平原水热资源和干旱时空演变的报道较多^[2-3,13,16],但分析夏玉米生育期及各生育阶段需水量、降水量和水分亏缺变化趋势的研究较少。本研究通过分析近 35 年吴桥夏玉米全生育期 and 不同生育阶段的需水量、降水量和水分亏缺指数,夏玉米实际产量、气象产量与水分亏缺指数的相关性,旨在揭示吴桥夏玉米生育时期干旱的变化趋势,寻找夏玉米水分最亏缺的时期,为吴桥乃至黑龙港地区夏玉米合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域在河北省吴桥县 (37°41' N, 116°37' E), 该区地处海河平原黑龙港流域中部,位于河北省东南部,属暖温带季风气候,多年平均降水量 530 mm 左右,全年降水量的 50%~80% 集中在 6~8 月,年蒸发量 1 700 mm,日照时数 2 340 h,>

10 °C 积温 4 665 °C。冬小麦—夏玉米一年两熟是该区域主要种植模式,夏玉米全生育期平均有效降水 218.68 mm。试验土壤 0~100 cm 土层土质为壤土,100~120 cm 为粘土层,120 cm 以下基本为砂土,部分土层夹杂少量粘土。各土层砂粒、粉粒和粘粒的质量百分比:0~50 cm 为 12.1%、82.1%、8.8%;50~100 cm 为 6.8%、78.5%、14.7%;100~150 cm 为 1.6%、76.3%、22.2%。0~20 cm 土层基础养分为:有机质 14.70 g/kg、全氮 0.96 g/kg、碱解氮 64.20 g/kg、速效钾 123.50 g/kg、有效磷 14.80 g/kg。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 水分亏缺指数

本研究采用作物水分亏缺指数 (CWDI) 进行夏玉米生育期干旱演变趋势分析,CWDI 是表征作物水分亏缺程度的指标之一,其计算方法如下^[15-16,19]:

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4} \quad (1)$$

式中: CWDI 为作物生育期按旬时段计算的累计水分亏缺指数; CWDI_i、CWDI_{i-1}、CWDI_{i-2}、CWDI_{i-3}、CWDI_{i-4} 为该旬及前 4 旬的水分亏缺指数;a、b、c、d、e 为对应旬的累计权重系数,一般 a 取值为 0.3,b 取值为 0.25,c 取值为 0.2,d 取值为 0.15,e 取值为 0.1^[16]。其中 CWDI_i 的计算公式如下:

$$CWDI_i = \begin{cases} (ET_c - P_i) / ET_c \times 100\% & ET_c > P_i \\ 0 & ET_c \leq P_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: CWDI_i 为第 i 旬作物水分亏缺指数; ET_c 为第 i 旬作物需水量,mm; P_i 为第 i 旬降水量,mm。ET_c 由参考作物蒸散量 (ET₀) 与作物系数 (K_c) 相乘而得,即:

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

式中: ET₀ 为参考作物蒸散量,mm/d; K_c 为作物系数。ET₀ 可以根据彭曼公式^[20] 计算得出,在本研究中利用 SIMETA W 模型^[21] 计算 ET₀ 得出。

SIMETA W 模型是由美国加州大学戴维斯分校基于 FAO 推荐的 Penman-Montieth 方程在逐日气象数据资料的基础上计算作物需水量研究开发的农业水资源管理与规划模型,在估测作物需水量、计算土壤蒸发、制定合理灌溉制度和农业用水规划等方面,提供理论依据。此模型的参数由气象、作物和土壤参数构成。气象参数包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、平均风速、日照时数和相对湿度;

作物参数包括作物名称,播种和收获时期等;土壤参数包括土壤类型、单位面积、土层深度、作物最大根深、土壤水分及营养情况。SIMETAW模型能够准确计算出作物生育期内逐日动态变化的参考作物蒸散量(ET_0)和作物系数(K_c),从而计算出研究时段的平均参考作物蒸散量、作物系数和作物需水量。

水分亏缺指数反映作物需水量与实际供水量平衡关系,本研究中水分亏缺指数干旱等级的划分主要根据前人研究^[16]及对研究区多年资料的分析。划分标准如下: $CWDI \leq 0.35$ 为无旱; $0.35 < CWDI \leq 0.5$ 为轻旱; $0.5 < CWDI \leq 0.65$ 为中旱; $0.65 < CWDI \leq 0.8$ 为重旱; $CWDI > 0.8$ 为极旱。

1.2.2 降水耦合度

作物需水量与自然降水的耦合程度反映作物对自然降水的利用程度,数值上介于0~1,采用以下公式计算^[22]:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & P_i \geq ETc_i \\ P_i / ETc_i & P_i < ETc_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ_i 表示第*i*阶段(月)作物需水与自然降水的

耦合度; P_i 代表第*i*阶段(月)内自然降水量,mm; ETc_i 代表第*i*阶段(月)内作物需水量,mm。

1.2.3 气象产量

根据吴桥县近35年夏玉米实际产量,利用5年滑动平均法计算出夏玉米的趋势产量,趋势产量主要受社会因素的影响,如栽培技术和育种技术等。实际产量减趋势产量得到气象产量,气象产量主要受气象因素的影响。气象产量与趋势产量的比值为相对气象产量,即减产率^[23]。

1.3 数据来源与统计分析

本研究选用的河北省吴桥县1981—2015年逐日气象数据包括最高气温、最低气温、平均气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数、降水量等,经纬度和海拔高度等地理特征数据来自距试验区1 km之内的吴桥县气象局。作物参数包括播种日期、收获日期、播种面积和夏玉米出苗、拔节、吐丝、成熟日期,来自中国气象局农业气象观测站(表1)。夏玉米实际产量来自吴桥县统计局。

表1 1981—2015年夏玉米物候期

Table 1 Phenology of summer maize from 1981 to 2015

年份 Year	播种期 Seeding	出苗期 Emergence	拔节期 Jointing	吐丝期 Tasseling	成熟期 Maturity
1981—1985	06-22	06-28	07-29	08-13	09-14
1986—1990	06-21	06-26	07-26	08-13	09-15
1991—1995	06-15	06-22	07-25	08-13	09-13
1996—2000	06-12	06-17	07-19	08-11	09-15
2001—2005	06-19	06-26	07-31	08-19	09-23
2006—2010	06-12	06-17	07-21	08-10	09-30
2011—2015	06-15	06-22	07-24	08-08	09-29

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20 软件进行统计分析。方差分析采用随机区组的单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 近35年吴桥夏玉米全生育期需水量、有效降水量变化趋势及原因分析

近35年夏玉米全生育期需水量和有效降水量都呈显著上升趋势($P < 0.05$,下同)。有效降水量上升

幅度高于需水量,使夏玉米灌溉需水量呈不显著下降趋势(图1)。夏玉米需水量为249.11~344.12 mm,35年平均值为299.93 mm,生育期内有效降水量平均值为218.68 mm。需水量整体上大于有效降水量,仅依靠自然降水不能满足夏玉米种植对水分的需要。

夏玉米全生育期需水量与太阳辐射、生育期积温、日照时数等极显著正相关($P < 0.01$,下同)。引起作物需水量变化的因素有很多,例如太阳辐射、气

温和风速等,对夏玉米全生育期需水量与太阳辐射、降水、生育期积温、平均风速、日照时数和相对湿度做相关分析,发现夏玉米全生育期需水量与总太阳辐射、生育期积温和总日照时数等极显著正相关(表2)。1981年后吴桥“冬小麦-夏玉米”的种植习惯发生了很大的变化,从以冬小麦为主夏玉米为辅

到冬小麦-夏玉米套种,再到贴茬播种、双晚技术和吨良田技术。30年来,夏玉米播种提前7 d,收获延后15 d,生育期延长22 d,使生育期内总太阳辐射、生育期积温和总日照时数增加,是夏玉米需水量增加的主要原因。

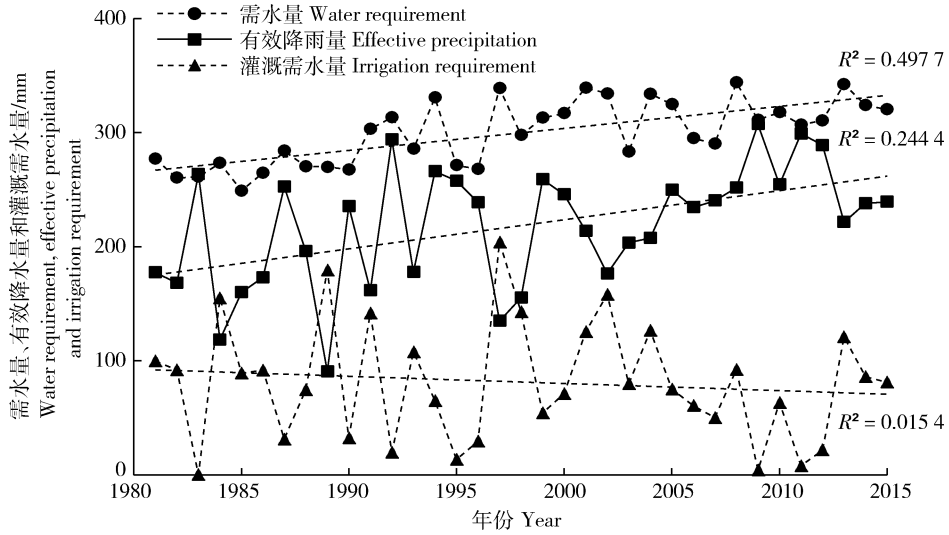


图1 近35年夏玉米生育期内需水量、有效降水量和灌溉需水量变化趋势

Fig. 1 The water requirement, effective precipitation and irrigation requirement in summer maize season in last 35 years

表2 夏玉米需水量与气象因子相关分析

Table 2 Correlation analysis between summer maize water requirement and meteorological factors

参数 Item	需水量 Water requirement	太阳辐射 Solar radiation	降水量 Precipitation	平均气温 Average temperature	平均风速 Average wind speed	日照时数 Sunshine hours	相对湿度 Relative humidity
需水量	1						
太阳辐射	0.826**	1					
降水量	0.087	0.331	1				
平均气温	0.817**	0.747**	0.086	1			
平均风速	0.379*	0.471**	0.234	0.433**	1		
日照时数	0.677**	0.921**	0.362*	0.455**	0.352*	1	
平均相对湿度	0.563**	0.559**	0.231	0.805**	0.473**	0.241	1

注: *表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上显著相关。

Note: * represents significant correlation at the 0.05 level; ** represents significant correlation at the 0.01 level.

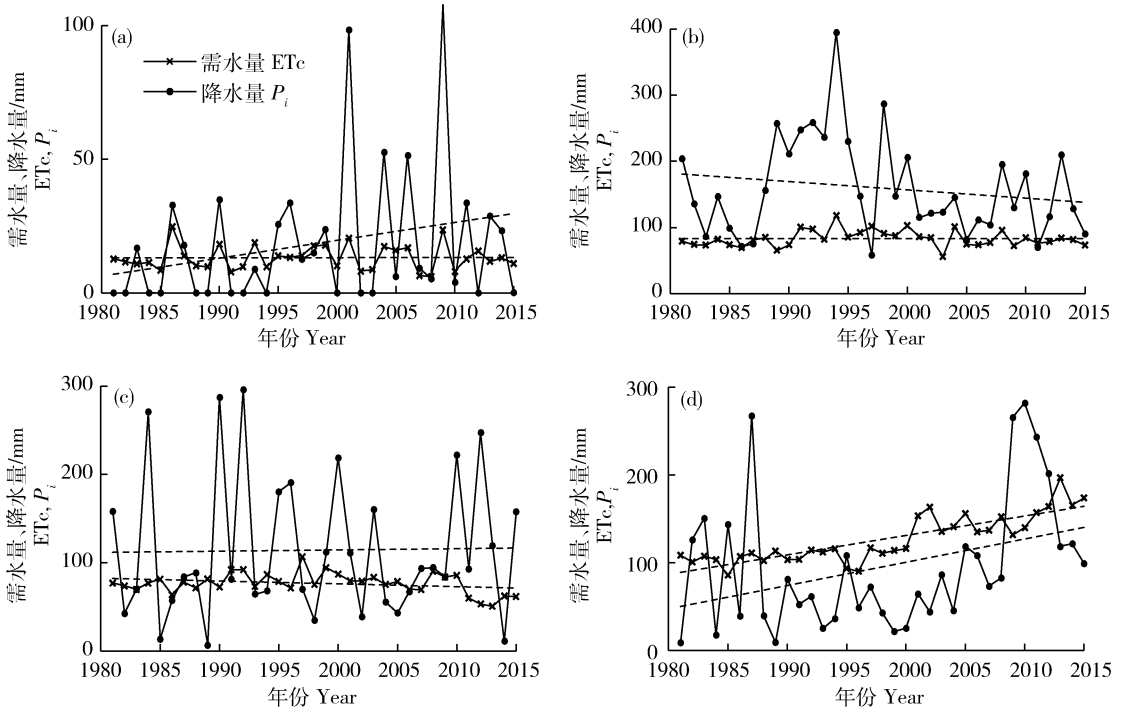
2.2 夏玉米各生育时期需水量和降水量的变化趋势

近35年吴桥夏玉米不同生育时期需水量和降水量呈现不同的变化规律。播种一出苗期(图2(a))、出苗一拔节期(图2(b))、吐丝一成熟期(图2

(d))的需水量呈增长趋势,其中吐丝一成熟期需水量增长速度最大,播种一出苗期需水量变化较小。播种一出苗、拔节一吐丝(图2(c))和吐丝一成熟期降水量呈上升趋势,出苗一拔节期呈下降趋势。对

比近 35 年夏玉米各生育阶段的需水量和降水量,播种一出苗和吐丝一成熟期需水量大于降水量的年份较多,分别占 60.00%和 74.29%;出苗一拔节期和

拔节一吐丝期只占 11.43%和 42.86%,降水基本能满足这两个生育时期的夏玉米需水量。



(a)播种一出苗 Seeding-emergence; (b)出苗一拔节期 Emergence-jointing; (c)拔节一吐丝期 Jointing-tasseling; (d)吐丝一成熟期 Tasseling-maturity

图 2 近 35 年夏玉米各生育时期需水量、降水量变化趋势

Fig. 2 The water requirement, precipitation in different growing periods of summer maize in the last 35 years

2.3 夏玉米全生育期及不同生育阶段水分亏缺指数的变化

近 35 年吴桥夏玉米全生育期水分亏缺指数(CWDI)呈不显著下降趋势(图 3(a)),降水耦合度呈不显著上升趋势(图 3(b)),两者共同表明夏玉米

全生育期干旱呈减轻趋势。在分析的 35 年中,吴桥夏玉米全生育期水分亏缺指数由 1981—1985 年平均 0.37 下降到 2011—2015 年平均 0.33,多年水分亏缺指数平均值为 0.35,夏玉米全生育期干旱程度主要为无旱和轻旱,概率分别为 51.43%和 45.71%。

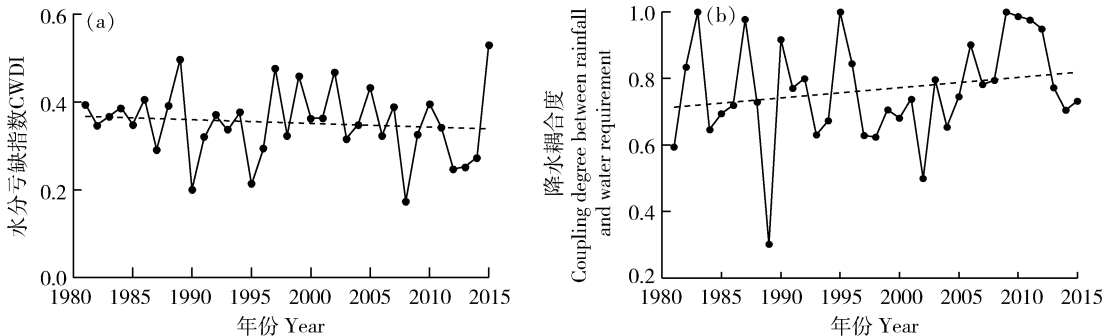
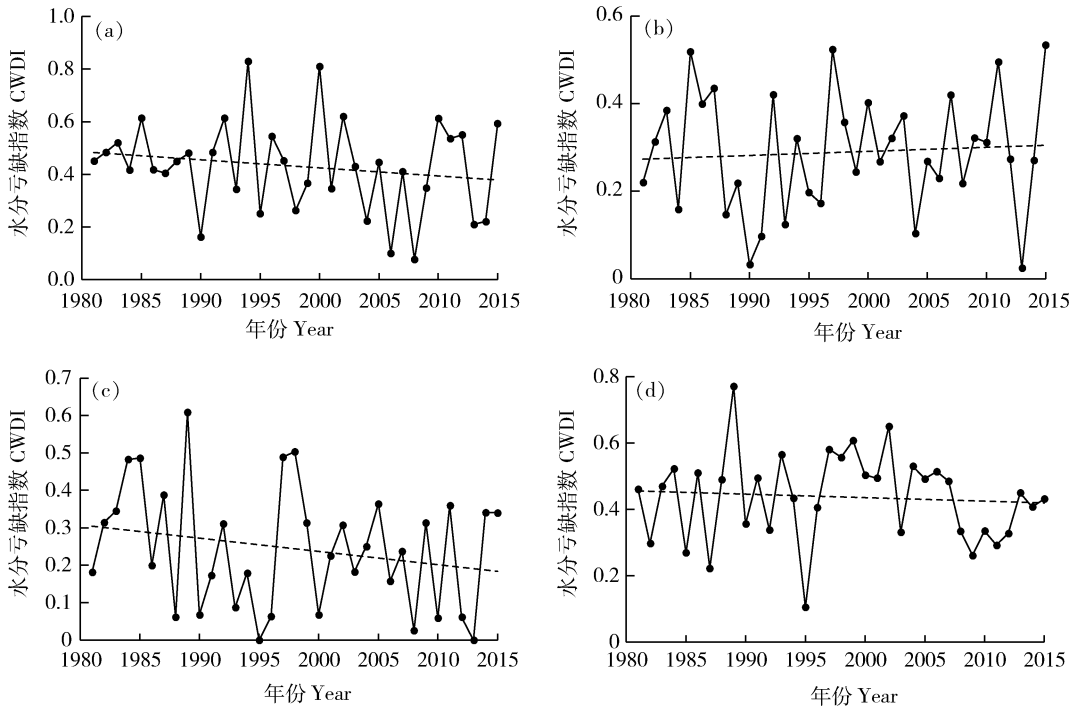


图 3 近 35 年夏玉米全生育期水分亏缺指数(a)和降水耦合度(b)变化趋势

Fig. 3 The water deficit index (a) and coupling degree between rainfall and water requirement (b) in the summer maize season

夏玉米播种—出苗(图4(a))、拔节—吐丝(图4(c))和吐丝—成熟期(图4(d))水分亏缺指数呈不显著下降趋势,出苗—拔节期(图4(b))水分亏缺指数呈不显著上升趋势。夏玉米各生育阶段水分亏缺指数以吐丝—成熟期最大,播种—出苗期次之,出苗—拔节期和拔节—吐丝期最小。播种—出苗期无旱、轻旱、中旱、重旱和极旱的发生频率分别为31.43%、37.14%、25.71%、0和5.71%。出苗—拔节期和拔节—吐丝期以无旱和轻旱为主,未出现重旱和极旱。吐丝—成熟期无旱、轻旱、中旱、重旱和极旱的发生

频率分别为31.43%、37.14%、25.71%、5.71%和0。播种—出苗和吐丝—成熟期是吴桥夏玉米水分最亏缺的时期。由于前茬冬小麦季降水少,播种前土壤储水少,加之播种—出苗期降水量小且降水耦合度低,此时期如果没有灌溉会对夏玉米出苗及前期生产造成威胁。吐丝—成熟期虽然降水量较出苗—吐丝期减少,但此时期处于雨季高峰期后,土壤水分处于饱和或近饱和状态,在一定时间内不会遭受干旱危害。因此,夏玉米播种—出苗期是干旱常发期且干旱危害最大。



(a)播种—出苗 Seeding-emergence; (b)出苗—拔节期 Emergence-jointing; (c)拔节—吐丝期 Jointing-tasseling; (d)吐丝—成熟期 Tasseling-maturity

图4 近35年夏玉米各生育时期水分亏缺指数变化趋势

Fig. 4 The water deficit index in different growth periods of summer maize in over the last 35 years

2.4 夏玉米产量及与水分亏缺指数的相关分析

近35年夏玉米实际产量和趋势产量都呈极显著上升趋势,气象产量呈波动式不显著上升趋势(图5)。气象产量增长幅度远低于实际产量和趋势产量,说明随经济发展和技术进步,科学技术进步因素(如水肥管理技术、耕作栽培技术、新品种和生育期调整等)在影响夏玉米产量的因素中占的比重增大^[24],而气象因素对产量的影响下降,即技术进步弥补了气候因素变化对夏玉米产量的负面影响。

1981—2015年吴桥夏玉米实际产量与播种—出苗水分亏缺指数负相关(系数 -0.188),表明1981年后夏玉米播种—出苗期干旱是影响产量的主要因素之一,播种—出苗期水分亏缺指数越大,实际产量越低。1981—2015年夏玉米气象产量与全生育期水分亏缺指数负相关(系数 -0.225),表明全生育期水分亏缺指数越大,夏玉米气象产量越小,可能原因是水分亏缺指数越大,夏玉米干旱程度越严重,当地农民为减少损失而进行灌溉,减轻干旱对产量的影响。

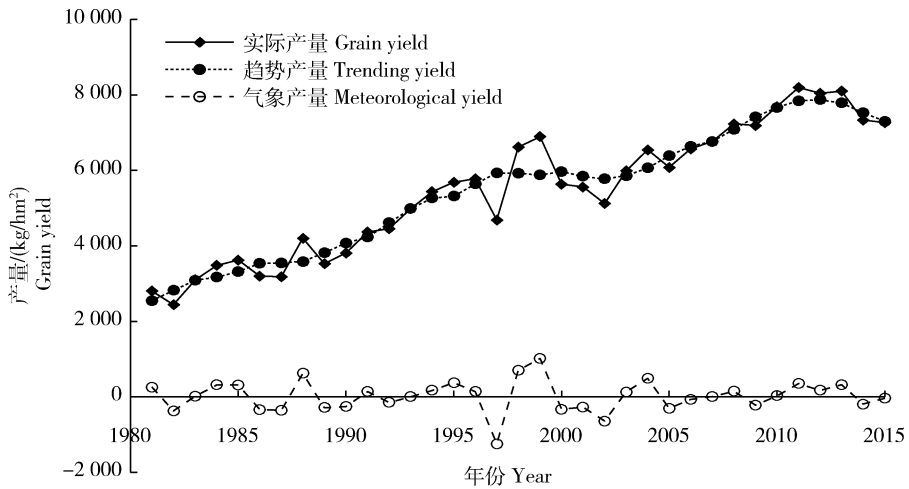


图 5 近 35 年吴桥夏玉米实际产量、趋势产量和气象产量变化趋势

Fig. 5 The grain yield, trending yield and meteorological yield of summer maize in the last 35 years

3 讨论

作物水分亏缺指数作为一种表征农业干旱的指标,一直受到研究者的关注并被广泛应用,本研究采用这一指标和方法,不仅考虑研究时段降水量对夏玉米的影响,还考虑研究时段前 4 旬降水量对夏玉米的影响,更符合作物生产实际情况。不同学者^[10-13]在研究不同区域不同作物干旱变化特征所采取的指标不同,得到结果也略有不同。中国气象局行业标准中规定了作物水分亏缺指数的计算方法和干旱等级,但该指标等级是针对全国平均状况,并不能充分反映各地区的差异,因此黄晚华等^[15]、董朝阳等^[16]和张淑杰等^[25]在研究玉米干旱的时空特征时,均结合历史干旱发生情况对指标等级进行重新划分,以使等级划分更符合研究区域的干旱实际发生情况,分级标准均明显高于《农业干旱等级》中给定的分级标准。本研究在研究吴桥县水分亏缺情况时,主要参考董朝阳等^[16]的干旱分级标准,因为董朝阳等人在对水分亏缺指数干旱等级进行重新划分后,选取辽宁省朝阳、河南省商丘和甘肃省武威 3 个典型站点的计算结果对实际旱情进行了验证,验证结果表明该等级标准更适用于研究区域。

1981 年后吴桥地区冬小麦—夏玉米的种植习惯发生很大的变化,从以冬小麦为主夏玉米为辅到冬小麦—夏玉米套种,再到贴茬播种、双晚技术^[26-27],这些种植模式的大面积推广使夏玉米生育期延长 20 d 左右,生育期总太阳辐射、生育期积温、总日照时数和平均相对湿度增加,从而导致夏玉米

全生育期需水量的增加。此结果与 Yang 等^[28]研究得到的夏玉米生育期需水量下降的结论不同,主要原因是本研究考虑 1981—2015 年不同年份夏玉米生育期延长和各生育时期变化的情况,而研究结论是基于整个黄淮海地区,并没有分析不同区县和站点的变化趋势。本研究中得到夏玉米全生育期干旱呈不显著下降趋势,与董朝阳等^[16]结论一致。

本研究区域为吴桥县,能够反映黑龙港地区的气候和种植制度。夏玉米全生育期需水量平均值为 299.93 mm,全生育期降水量平均值为 387.07 mm,虽然夏玉米全生育期降水量 > 需水量,但降水主要集中在 6、7 月份,生育期内有效降水量并不高,平均为 218.68 mm,且不同年份降水的时间分布存在较大差异,导致夏玉米干旱时常发生。充分利用夏玉米生育期内自然降水是该地区缓解水资源压力的重要途径,一方面利用高产抗旱品种和调整播期等措施充分利用自然降水,根据气象和旱情预测合理灌溉,以提高夏玉米季自然降水利用率;另一方面提高降水周年利用率,通过秸秆还田和深松等措施提高土壤储水能力,促使更多的富余降水补充地下水,达到夏水春秋用的目的^[29-31]。本研究的研究结论能够为吴桥县乃至黑龙港地区夏玉米的灌溉提供理论依据,但对于整个黄淮海地区就有一定的局限性。同时本研究也未考虑灌溉和土壤墒情的影响。

4 结论

1) 吴桥县夏玉米全生育期需水量和有效降水量都呈显著上升趋势,需水量整体上大于有效降水量,

需水量与太阳辐射、生育期积温和日照时数等极显著正相关。技术进步和种植习惯改变使夏玉米生育期延长 20 d 左右,总太阳辐射、生育期积温和总日照时数增加,是夏玉米全生育期需水量增加的主要原因。

2) 夏玉米全生育期水分亏缺指数呈不显著下降趋势,降水耦合度呈不显著上升趋势,干旱程度主要为无旱和轻旱。夏玉米吐丝一成熟期水分亏缺指数最大,播种一苗期次之,出苗一拔节期和拔节一吐丝期最小。吐丝一成熟期处雨季高峰期后,不易遭受干旱危害;而夏玉米播种一苗期降水量小且播前土壤储水少,是干旱的常发期且干旱危害最大。

3) 夏玉米实际产量和趋势产量都呈极显著上升趋势,气象产量增长幅度远低于实际产量和趋势产量,品种更新、水肥管理和生育期调整等技术因素弥补了气候因素变化对夏玉米产量的负面影响。一般年份,夏玉米需水量与降水耦合度高,降水基本能满足夏玉米生产;水分亏缺严重的年份,应在吐丝一成熟期补灌 1 次,以保证夏玉米正常成熟。

参考文献 References

- [1] 曹阳,杨婕,熊伟,武永峰,冯灵芝,杨晓光. 1961-2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 421-429
Cao Y, Yang J, Xiong W, Wu Y F, Feng L Z, Yang X G. Simulation of summer maize yield influenced by potential drought in China during 1961-2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 421-429 (in Chinese)
- [2] 马洁华,刘园,杨晓光,王文峰,薛昌颖,张晓煜. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3818-3827
Ma J H, Liu Y, Yang X G, Wang W F, Xue C Y, Zhang X Y. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3818-3827 (in Chinese)
- [3] 王占彪,王猛,尹小刚,张海林,褚庆全,文新亚,陈阜. 气候变化背景下华北平原夏玉米各生育期水热时空变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 473-481
Wang Z B, Wang M, Yin X G, Zhang H L, Chu Q Q, Wen X Y, Chen F. Spatiotemporal characteristics of heat and rainfall changes in summer maize season under climate change in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 473-481 (in Chinese)
- [4] Tao F, Zhang S, Zhang Z, Rotter R P. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3686-3699
- [5] Tsimba R, Edmeades G O, Millner J P, Kemp P D. The effect of planting date on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 145-155
- [6] 董宝娣,张正斌,刘孟雨,张依章,李全起,石磊,周永田. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27-33
Dong B D, Zhang Z B, Liu M Y, Zhang Y Z, Li Q Q, Shi L, Zhou Y T. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation scheduling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 27-33 (in Chinese)
- [7] 郑桂萍,李金峰,钱永德,吕艳东,刘丽华,王伯伦. 农作物综合抗旱性指标的评价分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 109-121
Zheng G P, Li J F, Qian Y D, Lv Y D, Liu L H, Wang B L. Evaluation on comprehensive drought resistant index of crops [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10): 109-121 (in Chinese)
- [8] Wang W X, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1): 1-14
- [9] Rampino P, Pataleo S, Gerardi C, Mita G, Perrotta C. Drought stress response in wheat: Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2006, 29: 2143-2152
- [10] Zhang J. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 102(2): 133-153
- [11] 尹小刚,刘武仁,郑洪兵,张海林,褚庆全,文新亚,殷鹏飞,陈阜. 松辽平原中部地区应对气候干旱变化的土壤耕作技术[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 123-131
Yin X G, Liu W R, Zheng H B, Zhang H L, Chu Q Q, Wen X Y, Yin P F, Chen F. Soil tillage practices coping with drought climate change in central region of Songliao Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 123-131 (in Chinese)
- [12] 张玉芳,王明田,刘娟,董孝斌,刘琰琰. 基于水分盈亏指数的四川省玉米生育期干旱时空变化特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 236-242
Zhang Y F, Wang M T, Liu J, Dong X B, Liu Y Y. Spatio-temporal characteristics of drought at different maize growth stages in Sichuan Province as determined by water budget index[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2): 236-242 (in Chinese)
- [13] 徐建文,居辉,刘勤,杨建莹. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 460-470
Xu J W, Ju H, Liu Q, Yang J Y. Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 460-470 (in

- Chinese)
- [14] 杨萌,冯宇鹏,林倩,陈阜,褚庆全.近30年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析[J].中国生态农业学报,2015,23(4):482-489
Yang M, Feng Y P, Lin Q, Chen F, Chu Q Q. Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 482-489 (in Chinese)
- [15] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,冯利平,黄彬香,王靖,施生锦,武永峰,张晓煜,肖小平,杨光立,李茂松.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
Huang W H, Yang X G, Qu H H, Feng L P, Huang B X, Wang J, Shi S J, Wu Y F, Zhang X Y, Xiao X P, Yang G L, Li M S. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(8): 28-34 (in Chinese)
- [16] 董朝阳,杨晓光,杨婕,解文娟,叶清,赵锦,李克南.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
Dong C Y, Yang X G, Yang J, Xie W J, Ye Q, Zhao J, Li K N. The temporal variation characteristics and spatial distribution laws of drought of spring maize in Northern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(20): 4234-4245 (in Chinese)
- [17] 薛颖,刘荣花,马志红.黄淮海地区夏玉米干旱等级划分[J].农业工程学报,2014,30(16):147-156
Xue C Y, Liu R H, Ma Z H. Drought grade classification of summer maize in Huang-Huai-Hai area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16): 147-156 (in Chinese)
- [18] 薛颖,马志红,胡程达.近40a黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析[J].自然灾害学报,2016,25(2):1-14
Xue C Y, Ma Z H, Hu C D. Spatiotemporal characteristics of drought during summer maize growing season in Huang-Huai-Hai area for recent 40 years[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2): 1-14(in Chinese)
- [19] 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
Zhang Y H, Lv H Q, Li S. Applicability of crop water deficit index in agricultural drought monitoring[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(5): 596-600 (in Chinese)
- [20] Allen R G, Smith M, Perrier A, Pereira L S. An update for the definition of reference evapotranspiration[J]. *ICID Bulletin*, 1994, 43(2): 64-92
- [21] 杨晓琳,宋振伟,王宏,石全红,陈阜,褚庆全.黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J].中国生态农业学报,2012,20(3):356-362
Yang X L, Song Z W, Wang H, Shi Q H, Chen F, Chu Q Q. Spatio-temporal variations of winter wheat water requirement and climatic causes in Huang-Huai-Hai Farming Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3):356-362 (in Chinese)
- [22] 杨晓琳,黄晶,陈阜,褚庆全.黄淮海农作区玉米需水量时空变化特征比较研究[J].中国农业大学学报,2011,16(5):26-31
Yang X L, Huang J, Chen F, Chu Q Q. Comparison of temporal and spatial variation of water requirements of corn in Huang-Huai-Hai farming system region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 26-31 (in Chinese)
- [23] 薛颖,霍治国,李世奎,叶彩玲.华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J].自然灾害学报,2003,12(1):131-139
Xue C Y, Huo Z G, Li S K, Ye C L. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of North China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 131-139 (in Chinese)
- [24] 丁浩,汪志农,尚虎君,张有功.武功地区气候变化及其对夏玉米单产的影响[J].排灌机械工程学报,2013,(31)2:167-172
Ding H, Wang Z N, Shang H J, Zhang Y G. Climate change and its impacts on summer maize yield in Wugong region[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, (31)2: 167-172 (in Chinese)
- [25] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,蔡福,武晋雯.东北地区玉米干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):231-236
Zhang S J, Zhang Y J, Ji R P, Cai F, Wu J W. Analysis of spatio-temporal characteristics of drought for maize in Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1):231-236 (in Chinese)
- [26] Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, Liu C M. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. *Industrial Crops and Products*, 2007, 25(3): 239-247
- [27] 张胜全,方保婷,王志敏,周顺利,张英华.春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J].生态学报,2009,29(4):2035-2044
Zhang S Q, Fang B T, Wang Z M, Zhou S L, Zhang Y H. Influence of different spring irrigation treatments on water use and yield formation of late-sowing winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2035-2044 (in Chinese)
- [28] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, Chen F, Chu Q Q. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124: 20-27
- [29] 杨雪,逢焕成,李轶冰,任天志,董国豪,郭智慧,王湘峻.深旋松耕作法对华北缺水地区壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J].中国农业科学,2013,46(16):3401-3412
Yang X, Pang H C, Li Y B, Ren T Z, Dong G H, Guo Z H, Wang X J. Effects of deep rotary sub-soiling tillage on the physical properties and crop growth of the sticky loamy soil in North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3401-3412 (in Chinese)

[30] 孔凡磊,张海林,翟云龙,袁继超,陈阜. 耕作方式对华北冬小麦-夏玉米周年产量和水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 749-756

Kong F L, Zhang H L, Zhai Y L, Yuan J C, Chen F. Effects of tillage methods on crop yield and water use characteristics in winter-wheat/summer-maize rotation system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(7): 749-756 (in Chinese)

[31] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,穆心愿,李潮海. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3359-3371

Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, Mu X Y, Li C H. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359-3371 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅