

黄淮海农作区玉米需水量时空变化特征比较研究

杨晓琳 黄晶 陈阜 褚庆全*

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要 鉴于作物需水量变化趋势对制定灌溉策略与区域水资源配置的重要作用,依据黄淮海农作区 50 个标准气象站点 50 年逐日气象数据资料,基于 SIMETAW 模型,分析了黄淮海各农作亚区夏玉米、春玉米生育期需水量、灌溉需要量的时空变化趋势,主要气象因子时间变化趋势以及需水量与气象因子的相关性。结果表明:1)该地区夏玉米、春玉米生育期需水量平均值分别为 321.70 和 456.70 mm 且近 50 年均呈下降趋势,两者降水耦合度分别为 0.78、0.72; 2)与夏玉米生育期灌溉需要量相比,春玉米生育期灌溉需要量地区差异大且下降更显著,但两者在豫西丘陵山地早坡地一熟水浇地二熟区均呈上升趋势; 3)夏玉米、春玉米需水量下降受太阳辐射、温度、平均风速、平均相对湿度、降水的综合影响,其中最主要气候原因为太阳辐射、温度;平均风速、降水量与之呈显著负相关,其他各因素为显著正相关。

关键词 玉米; 需水量; 气候变化; 黄淮海农作区

中图分类号 S 512

文章编号 1007-4333(2011)05-0026-06

文献标志码 A

Comparison of temporal and spatial variation of water requirements of corn in Huang-huai-hai farming system region

YANG Xiao-lin, HUANG Jing, CHEN Fu, CHU Qing-quan*

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

Abstract Information of crop water requirement and its temporal and spatial change are important for irrigation scheduling, water resources planning and future decision-making. Based on the observed daily meteorological data in 1960 – 2009 of 50 normal meteorological codes in Huang-huai-hai farming region, the water requirements and irrigations of summer corn and spring corn were calculated by SIMETAW model. The results showed that water requirements of summer corn and spring corn are 321.70 and 456.70 mm respectively, which showed a significant downtrend in the past 50 years and the rainfall coupling degrees of summer corn and spring corn were 0.78 and 0.72 respectively. Compared with irrigations of summer corn, irrigations of spring corn had a significant downtrend and had significant differences in different regions, which showed a significant uptrend in the south of Shaanxi and Shanxi provinces; The downtrend of corn water requirement in Huang-huai-hai farming region mainly attributed to the reduction of solar radiation, which was also affected by other climatic factors. Wind speed, precipitation had negative correlations with the water requirements of summer corn and spring corn, while other climatic factors had positive effects.

Key words corn; water requirement; climate change; Huang-huai-hai farming system

收稿日期: 2011-04-23

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903003); 现代农作制模式构建与配套技术研究与示范资助项目(201103001); 国家“973 计划”项目(2009CB118608)

第一作者: 杨晓琳, 硕士研究生, E-mail: yangxiaolin429@163.com

通讯作者: 褚庆全, 副教授, 主要从事农作制度与作物模型模拟研究, E-mail: cauchu@cau.edu.cn

黄淮海农作区属温带大陆性季风气候区,是我国气候变化敏感区之一,也是重要的粮食生产基地之一^[1]。该区人口及耕地分别占全国的35%和39%,而水资源量却只占全国的8%。人均水资源量不足500 m³,已低于联合国定义的极端稀缺水平(500 m³/人)。农业灌溉用水占区域用水总量的70%左右,由于长期抽取地下水灌溉,导致了地下水位下降、河流干枯、陆地景观多样性破坏等一系列水环境问题^[2-6]。如何充分利用自然降水,提高农业水资源利用效率成为人们关注水资源的一个重要方面。

作物需水量在空间和时间上存在变异性 and 规律性。刘晓英等^[7-8]用6个城市站分析了华北平原冬小麦和夏玉米近50年作物需水量的变化趋势和原因。杨晓光等^[9-10]利用华北平原1961—2007年气象数据分析了参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素。李保国等^[11]分析了河北省近35年(1965—1999年)农作物需水量变化趋势,认为河北省冬小麦、玉米近35年需水量呈减少趋势。康绍忠等^[12]用关中地区30个气象站41年(1961—2001年)气象资料,探讨了关中地区主要作物冬小麦和夏玉米需水量与相应生育期内气候因子的变化趋势,分析了气候变化对作物需水量的影响。国内外预测参考作物需水量的模型较多,目前认为比较精确且应用最多的是FAO推荐的Penman-Montieth法^[13],此法在我国得到了验证^[14]。宋振伟^[15]及孔管铎等^[16]对SIMETAW模型进行了参数校正并对北京地区主要作物需水量进行了估算,认为作物需水量(ET_c)和作物系数(K_c)在作物全生育期均呈现“单峰型”曲线变化。夏玉米、春玉米是黄淮海农作区的主要粮食作物,但对于黄淮海农作区夏玉米、春玉米的降雨利用效率、需水特性比较及气候因素相关性等研究报道较少。

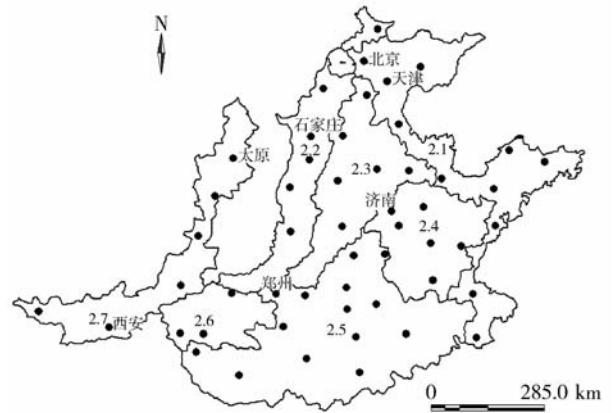
为了分析比较夏玉米、春玉米需水特性及降水利用率,发展更合理的节水农作制度、优化作物布局,本文利用黄淮海农作区50个标准气象站点50年标准气象数据,计算分析了1960—2009年不同年代间不同亚区夏玉米、春玉米生育期需水量,生育期有效降水量、生育期灌溉需要量时空变化特征,并对其气象原因做了同步相关分析,并在此基础上对夏玉米、春玉米做了比较,为该区域气候变化对玉米生产的影响研究提供了基础依据,为在气候变化影响

下提高有效降水利用率与灌溉水利用率提供理论依据;为进一步研究广义农业水资源以及水分生产力、水分利用效率奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄淮海农作区属于温带大陆性季风区,光热资源丰富,雨热同季,降水量年际间变化大且多集中在夏季,依据《中国农作制》分区方法和原则^[17],将黄淮海平原半湿润暖温灌溉集约农作区可分为7个亚区(图1)。



2.1区为环渤海山东半岛滨海外向型二熟农渔区,2.2区为燕山太行山山前平原水浇地二熟区,2.3区为海河低平原缺水水浇地二熟兼旱地一熟区,2.4区为鲁西平原鲁中丘陵水浇地旱地二熟区,2.5区为黄淮平原南阳盆地水浇地旱地二熟区,2.6区为汾渭谷地水浇地二熟旱地一熟兼二熟区,2.7区为豫西丘陵山地旱坡地一熟水浇地二熟区。

图1 黄淮海农作区亚区及典型站点的分布情况

Fig. 1 Distribution of sub-zone in Huang-huai-hai farming system region and selected stations

1.2 数据来源

本研究选取黄淮海农作区内平均分布的50个标准气象站点1960—2009年50年的逐日气象数据,包括:日最高气温、日最低气温、日平均气温、大气压强、平均相对湿度、平均风速、日照时数、降水量等,以及各气象站点的经纬度,海拔高度等地理特征数值。气象数据来源于国家气象数据共享网,主要作物参数,包括播种日期、收获日期及播种面积、密度来源于实地调研采集的数据、中国农业统计年鉴、以及行业科研专项《现代农作制模式构建与示范研究》项目的试验数据。

1.3 作物需水量、蒸腾蒸散量、有效降水量计算方法

利用 SIMETAW (Simulation Evapotranspiration of Applied Water) 模型对黄淮海农作区夏玉米、春玉米生育期作物需水量 CET_c 、有效降水 CE_r 、灌溉需要量 ET_{aw} 等指标进行了计算,该模型开发原理基于 Penman-Montieth 公式^[18],在模型中需要的源数据除了上述逐日气象资料外,还需要各个站点海拔、纬度,以及各种不同地区夏玉米、春玉米生育期的起止日期,不同地区夏玉米、春玉米生育期的起止日期参考陈玉民等^[19]。SIMETAW 模型的校正与使用方法见参考文献^[15-16]。

1.4 统计方法

利用 SAS 8.0 软件进行 ANOVA 方差分析与 GLM 相关回归分析。

2 结果与分析

2.1 黄淮海农作区玉米需水量时间变化趋势

黄淮海农作区夏玉米、春玉米生育期需水量 CET_c 。近 50 年总体均呈下降趋势,夏玉米 CET_c 。在 60 年代为 343.93 mm 左右,70 年代到 90 年代显著下降 9.61~10.75mm,春玉米 CET_c 。在 60 年代为 414.26 mm,60 年代到 80 年代每 10 年分别显著下降 17.19 mm、4.43 mm,90 年代至今下降趋势不显著。夏玉米生育期有效降水 CE_r 呈显著下降趋势,由 60、70 年代的 237.58 mm 下降 17.49 mm 后基本保持不变;由于生育周期较短且集中在降水高峰期,春玉米 CE_r 基本保持在 240.46~254.67 mm。夏玉米生育期灌溉需要量 ET_{aw} 平均值呈不显著上升趋势,60、70 年代为 96.74 mm,70 年代到 90 年代上升了 11.04 mm,90 年代至今差异不显著,春玉米 ET_{aw} 则呈下降趋势,60 年代为 169.28 mm 左右,60 年代到 70 年代、90 年代至今每 10 年分别显著下降 26.88 mm、17.85 mm,其他年代间差异不显著(图 2、3)。

夏玉米、春玉米需水量年际变化趋势在空间上差异不显著,均呈下降趋势;灌溉需要量年际变化因地区不同而不同。夏玉米、春玉米灌溉需要量在 2.7 亚区即陕西南部、山西中南部均呈上升趋势,其他亚区呈下降趋势,但春玉米灌溉需要量下降显著。

夏玉米灌溉需要量平均值在 2.1、2.4 亚区即河北东部、山东东南部在 80 年代最高为 109.66~

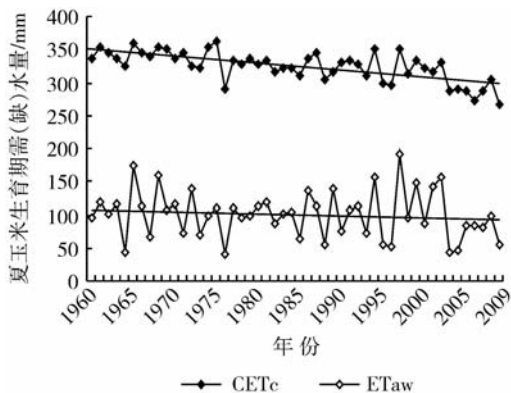


图 2 夏玉米需(缺)水量历年变化趋势

Fig. 2 Yearly variation of water requirement and deficiency of summer corn in growing season

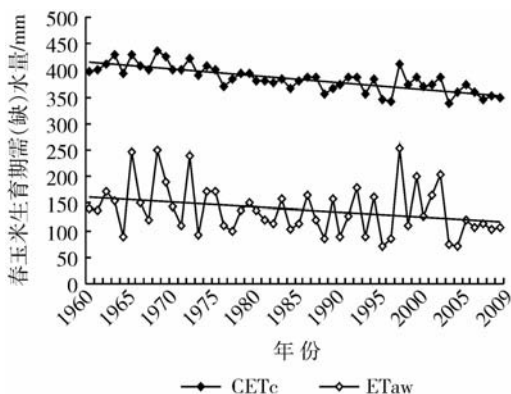


图 3 春玉米需(缺)水量历年变化趋势

Fig. 3 Yearly variation of water requirement and deficiency of spring corn in growing season

120.91 mm,其他年代差异不显著;2.2 亚区即河北西部在 80、90 年代为 99.69~104.13 mm,高于其他年代。2.3、2.5、2.6 亚区即河北南部、山东西北部、河南南部大部分地区呈下降趋势,但在 90 年代出现小峰值,其他年代每 10 年下降 7.13~23.02 mm;2.7 亚区即陕西南部、山西中南部呈上升趋势,每 10 年上升 7.30 mm 左右。春玉米灌溉需要量平均值在 2.1、2.4 亚区即河北东部、山东东南部呈显著下降,每 10 年下降 5.24~18.28 mm;在 2.2、2.3、2.5、2.6 亚区即河北东南部、河南大部分地区呈不显著下降趋势,在 90 年代出现小峰值;在 2.7 亚区即陕西南部、山西中南部灌溉量呈先下降后上升趋势,80 年代最低为 169.95 mm(表 1)。

表 1 1960—2009 年黄淮海农作区各亚区夏玉米、春玉米灌溉需要量变化趋势

Table 1 Spatially variation of irrigation of summer corn and spring corn in Huang-huai-hai farming system region during 1960—2009 mm

类型	时段	黄淮海农作区亚区													
		2.1		2.2		2.3		2.4		2.5		2.6		2.7	
		CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}	CET_c	ET_{aw}
夏玉米	1960—1969 年	329.81	97.09	317.00	78.39	397.35	141.57	363.60	117.85	352.19	106.76	341.77	115.36	309.09	97.65
	1970—1979 年	317.46	91.83	303.42	78.72	377.40	118.55	363.35	83.37	341.72	97.57	332.38	91.64	313.14	83.49
	1980—1989 年	357.38	109.66	310.15	104.13	332.33	110.63	335.57	120.91	315.38	86.21	317.34	84.51	296.81	108.25
	1990—1999 年	337.60	92.22	311.21	99.69	325.86	132.76	332.36	95.92	328.64	103.08	328.64	112.05	307.09	115.90
	2000—2009 年	307.07	85.98	300.68	83.32	321.18	112.52	321.77	81.29	312.10	72.75	309.11	83.37	294.98	107.17
春玉米	1960—1969 年	433.78	163.81	376.21	139.44	388.50	135.63	463.06	159.55	382.47	145.43	420.94	196.40	442.03	216.69
	1970—1979 年	416.95	147.89	361.59	113.91	368.23	117.24	447.99	148.89	363.37	104.87	402.33	142.61	432.20	195.64
	1980—1989 年	441.98	139.16	391.64	134.93	325.80	113.02	394.98	143.64	333.74	88.17	351.14	101.88	397.13	169.95
	1990—1999 年	415.72	118.82	387.35	129.94	316.53	127.63	387.63	120.67	338.33	98.99	365.47	139.19	412.03	212.93
	2000—2009 年	382.78	118.49	375.60	124.43	310.33	104.86	369.80	95.04	322.59	62.43	354.40	102.08	404.95	215.64

2.2 夏玉米、春玉米需水与降水耦合度比较

作物需水量与自然降水的耦合程度反映了作物对自然降水的利用程度,研究作物需水与降水耦合度关系,对区域作物合理利用降水资源,减少灌溉用水量有重要意义。水资源严重短缺是目前限制黄淮海地区农业发展的首要因素,因此在考虑优先节水农作制发展时,应以水资源为限制条件,优先选择需水与降水耦合度高的作物的种植模式,以最大程度的减少灌溉水应用,缓解黄淮海的水资源紧俏压力^[15]。作物需水量与自然降水的耦合度,数值上介于 0~1 之间,采用以下公式计算:

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

其中, λ_i 表示第 i 阶段(月)的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); ET_{ci} 代表第 i 阶段(月)内作物需水量(mm);

全生育期作物需水与自然降水的耦合度等于各阶段(各月)耦合度的以其需水模数(ET_{ci}/ET_c)为权重的加权平均值:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{ET_{ci}}{ET_c} \lambda_i \quad (2)$$

受作物生理特性及区域生态环境的影响,黄淮海地区夏玉米、春玉米多年平均需水量差异较明显,夏玉米需水量为 321.70 mm,春玉米为 456.70 mm。夏玉米、春玉米降水耦合度较高且差异不大,分别为 0.78、0.72,夏玉米生育期比春玉米短,多集中在 7、8 月份的降水高峰期,自然降水利用效率较

高。在 2.1、2.3 和 2.7 亚区春玉米平均降水耦合度显著低于夏玉米。夏玉米降水耦合度在 2.2 亚区即河北西部最低为 0.71,2.3 亚区即河北南部、山东西部最高为 0.82,其他亚区在 0.75~0.80。春玉米降水耦合度空间差异显著,在 2.1 亚区即山东南部最低为 0.56,在 2.5 亚区即河南南部大部分地区最高为 0.85(表 2)。春玉米在各亚区降水耦合度的差异与当地的气候条件、播种收获日期以及农业技术推广等有密切关系。

表 2 黄淮海农作区夏玉米、春玉米生育期多年逐月平均降水耦合度

Table 2 Coupling degree between rainfall and water requirement in growing season of summer corn and spring corn in Huang-huai-hai farming system region

类型	黄淮海农作区亚区						
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
夏玉米	0.77	0.71	0.82	0.75	0.80	0.79	0.81
春玉米	0.56	0.72	0.67	0.74	0.84	0.80	0.70

2.3 夏玉米、春玉米需水量空间变化趋势

夏玉米生育期需水量 CET_c 近 50 年平均值在黄淮海各农作区差异不显著,在 2.1、2.3、2.4、2.5 和 2.6 亚区即山东、河南、河北东部为 326.17~336.79 mm,而 2.2 和 2.7 亚区即河北西部、陕西南部、山西中南部为 309.75 mm 左右。生育期有效降水 CE_r 平均值在 2.3 亚区即河北东部、山东西部为 202.63 mm,显著低于其他各区,其余各区在

220.64~238.18 mm。生育期灌溉要量 ET_{aw} 在 2.3 区即河北东部最高为 138.03 mm, 其他亚区在 93.27~103.29 mm。春玉米生育期需水量 CET_c 近 50 年平均值在 2.1、2.7 亚区即山东东部、陕西南部、山西中南部为 417.67~421.87 mm 显著高于其他各区; 2.3、2.5 亚区即河北东部、河南南部在 330.85~340.79 mm 显著低于其他各区。生育期有效降水量 CE_r 在 2.1、2.4 亚区即山东大部分地区最高为 272.64~282.49 mm, 在 2.3、2.7 亚区即河北东部、陕西南部、山西中南部为 215.49~218.79 mm 最低, 差异显著。生育期灌溉要量 ET_{aw} 在 2.7 亚区即陕西南部、山西中南部为 202.17 mm 显著高于其他各亚区, 在 2.5 亚区即河南南部大部分地区为 96.69 mm 显著低于其他各区(表 3)。

2.4 夏玉米、春玉米需水量变化的气候因素分析

夏玉米、春玉米需水量与气候因素相关性趋势一致。影响其下降最主要的气象因素为太阳辐射, 温度、日照时数、平均相对湿度以及风速也不同程度的影响需水量的变化, 平均风速、降水量与之呈显著负相关, 其他各因素为显著正相关(表 4)。

表 3 黄淮海农作区夏玉米、春玉米需水量空间变化趋势

Table 3 Spatially variation of water requirements of summer corn and spring corn in Huang-huai-hai farming system region mm

亚区	类型	CET_c	CE_r	ET_{aw}
2.1	夏玉米	327.32 a	230.79 a	96.52 b
	春玉米	421.87 a	282.49 a	139.37 b
2.2	夏玉米	309.75 a	220.64 a	89.10 b
	春玉米	368.05 b	253.64 b	114.41 b
2.3	夏玉米	329.71 a	191.68 b	138.03 a
	春玉米	340.79 c	218.79 c	122.00 b
2.4	夏玉米	336.79 a	238.18 a	98.62 b
	春玉米	392.15 b	272.64 a	119.50 b
2.5	夏玉米	329.99 a	236.72 a	93.27 b
	春玉米	330.85 c	234.17 b	96.69 c
2.6	夏玉米	326.17 a	228.09 a	98.07 b
	春玉米	376.18 b	241.55 b	134.63 b
2.7	夏玉米	305.92 a	202.63 b	103.29 ab
	春玉米	417.67 a	215.49 c	202.17 a

注: 显著水平 $\alpha=0.05$, 不同的字母表示差异显著。

表 4 生育期作物需水量与气象因子相关分析

Table 4 Correlation of crop water requirement with meteorological factors

作物	亚区	平均气温	平均风速	日照时数	平均相对湿度	太阳辐射	降水
夏玉米	2.1	0.366**	-0.074**	0.328**	0.063**	0.404**	0.031
	2.2	0.215**	-0.050**	0.029*	0.047**	0.424**	-0.003
	2.3	0.2138**	-0.120**	0.011*	0.137**	0.382**	-0.058*
	2.4	0.247**	0.095**	0.061**	-0.048**	0.403**	-0.085**
	2.5	0.388**	-0.036*	0.031**	0.110**	0.431**	-0.075**
	2.6	0.572**	0.270**	-0.007	-0.340**	0.669**	-0.001
	2.7	0.397**	0.007	0.383**	0.102**	0.352**	-0.092**
春玉米	2.1	0.024	-0.078**	0.020	0.058	0.098**	-0.056**
	2.2	0.215**	-0.050	0.029	0.047	0.424**	-0.029
	2.3	0.288**	-0.120**	0.017	0.192**	0.355**	-0.068**
	2.4	0.397**	0.046**	0.055**	0.070	0.362**	-0.103**
	2.5	0.424**	-0.054**	0.417**	0.196**	0.385**	-0.142**
	2.6	0.447**	0.219**	0.013	0.051	0.450**	-0.088
	2.7	0.631**	-0.053*	0.370**	0.065**	0.397**	-0.088

注: ** 显著水平 $\alpha=0.01$, 表示差异极显著; * 显著水平 $\alpha=0.05$, 表示差异显著。

太阳辐射、温度是影响夏玉米需水量最主要的气象因素, 其中 2.7 亚区首要因素为温度, 而其余各亚区为太阳辐射; 平均风速、降水量与之呈显著负相关, 2.4、2.6 亚区平均相对湿度也与夏玉米需水量呈显著负相关, 其他各因素为显著正相关。

太阳辐射、温度同样是影响春玉米生育期需水量最主要的气象因素, 平均风速、降水量与之呈显著负相关, 其他各因素为显著正相关, 其中在 2.4、2.6 亚区平均风速与春玉米需水量呈正相关, 在 2.4、2.5、2.6、2.7 亚区降水量影响程度增大, 2.5 亚区日

照时数相关性提高。

3 讨论与结论

夏玉米、春玉米是黄淮海农作区的主要粮食作物,与前人研究^[7-16]相比,本研究不仅对两者需水量、灌溉量的年际变化趋势作了相关研究,还重点揭示了其在黄淮海7个农作亚区的空间分布特征。夏玉米、春玉米需水量近50年呈下降趋势,最主要受气候变化背景下太阳辐射下降的影响,这与Roderick等^[20-22]人的研究结果一致。本研究得出夏玉米生育期需水量平均值低于春玉米,且夏玉米生育期需水量空间变化差异不显著、降水耦合度较高空间差异也不显著,生育期比春玉米短、但从作物灌溉需要量年际变化趋势看,春玉米灌溉需要量下降趋势比夏玉米显著,由于实际生产中栽培管理措施的加强,如何从节水农作制度与粮食安全的角度,量化黄淮海农作区夏玉米与春玉米的种植,如何对黄淮海农作区主要种植模式的节水效益进行评估,需要在以此基础上做进一步的研究。本研究基于SEMITAW模型计算了夏玉米、春玉米的理论需水量和灌溉需要量,实际生产当中的灌水量数值可能和本研究计算的理论值会存在差异,需要在今后的试验中进一步验证和完善。在黄淮海地区水资源紧缺的情况下,分析夏玉米、春玉米需水量的时空变化趋势,从粮食安全与节水农业的角度上,为后续优化作物布局、节水农作制的研究提供了重要资料。

经过对多年数据的整理分析,利用SIMETAW模型对黄淮海农作区夏玉米、春玉米生育期需水量进行计算,主要结论如下:

1)黄淮海农作区夏玉米、春玉米生育期需水量近50年呈下降趋势,夏玉米在1970—1990年显著下降9.61~10.75 mm,春玉米在1960—1980年显著下降4.43~17.19 mm。夏玉米灌溉需要量在2.3、2.5和2.6亚区呈下降趋势,春玉米灌溉需要量在2.1、2.4亚区呈显著下降趋势,两者在2.7亚区均呈上升趋势。

2)夏玉米生育期需水量平均值在黄淮海各农作区差异不显著,除2.2、2.7亚区外在326.17~336.79 mm。夏玉米灌溉需要量在2.3区为138.03 mm,显著高于其他各区。春玉米生育期需水量平均值在各农作区差异显著,在2.1、2.7亚区最高为417.67~421.87 mm;春玉米生育期灌溉需要量在2.7亚区最高为202.17 mm。

3)太阳辐射、温度是影响夏玉米、春玉米需水量

的最重要气象因素,两者相关系数均为0.6左右;平均风速、降水量与之呈显著负相关,其他各因素为显著正相关。

参 考 文 献

- [1] 汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报,2000,31(11):21-33
- [2] 刘昌明. 南水北调与节水并举可望缓解华北水危机[EB/OL]. [2006-11-13]. <http://www.hwcc.com.cn>
- [3] 蒋业放. 华北地区缺水分析[J]. 中国水利,2000(1):23-25
- [4] 林耀明,任鸿遵,于静洁,等. 华北平原的水土资源平衡研究[J]. 自然资源学报,2000,15(3):252-258
- [5] 范广洲,吕世华,程国栋. 华北地区夏季水资源特征分析及其对气候变化的响应(II)[J]. 高原气象,2002,21(1):45-50
- [6] 王道波,张广录,周晓果. 华北水资源利用现状及其宏观调控对策研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(2):46-49
- [7] 刘晓英,李玉中,郝卫平. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报,2005,21(10):155-159
- [8] 刘晓英,林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报,2004,35(2):77-82
- [9] 刘园,王颖,杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报,2010,30(4):0923-0932
- [10] 马洁华,刘园,杨晓光,等. 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
- [11] 李春强,李保国,洪克勤. 河北省近35年农作物需水量变化趋势分析[J]. 中国生态农业学报,2009,17(2):359-363
- [12] 曹红霞,粟晓玲,康绍忠. 关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):6-9
- [13] Allen R G. An update for the definition of reference evapotranspiration[M]. ICID Bulletin,1994,43(2):64-92
- [14] 刘钰,Pereira L S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报,2000,16(5):26-30
- [15] 宋振伟. 基于模型与情景分析的节水型种植模式构建—以北京市为例[D]. 北京:中国农业大学,2006
- [16] 孔管铎,张海林,陈阜. 基于SIMETAW模型的北京地区主要作物需水量估算[J]. 中国农业大学学报,2009,14(5):109-115
- [17] 刘巽浩,陈阜. 中国农作制[M]. 北京:中国农业出版社,2003:58-72
- [18] Allen R G, Luis S Pereira, Dirk Raes. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [J]. FAO Irrig and Drain Paper, Rome, 1998, 56: 89-102
- [19] 陈玉民,郭国双. 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
- [20] 赵俊芳,郭建平,张艳红. 气候变化对农业影响研究综述[J]. 中国农业气象,2010,31(2):200-205
- [21] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan, Israel, 1964 ~ 1998 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 83-91
- [22] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(15): 1410-1411