

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.032

东北地区春玉米作物系数时空分布特征研究

李波 景竹然 魏新光 孙君 付诗宁 葛东
(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 基于东北地区 1951—2018 年 107 个气象站点的气象资料和春玉米观测资料,利用不同作物系数修正公式,对作物系数模型计算的春玉米作物系数进行了验证,并利用空间插值法对全生育期及各生长阶段作物系数年际变化趋势和空间分布特征进行了分析。结果表明:考虑风速、湿度影响的单作物系数法对春玉米生育初期作物系数的模拟效果最好($R^2=0.65$)。东北地区全生育期春玉米作物系数在 0.756~0.815 范围内变化,在空间分布上,高值区主要分布在东北地区西部,低值区主要分布于黑龙江省北部的局部地区和辽宁省的东南部。不同生育阶段的作物系数,在生育中期最大,快速生长期次之,生育初期和末期总体较小。近 70 年东北地区春玉米全生育期作物系数年际变化呈显著下降趋势($R^2=0.38$),作物系数倾向率达到 $-0.004/(10\text{ a})$ 。在各个生育阶段,作物系数年际变化均呈下降趋势,黑龙江省下降最为明显,吉林省和内蒙古自治区东部次之,辽宁省变化不明显。东北地区绝大部分站点作物系数基本呈下降趋势,呈下降趋势和显著下降趋势的站点占比分别达到 92.5%、64.5%。就不同生育阶段而言,快速生长期下降趋势最为明显(呈显著下降趋势站点占比为 46.7%);在生育中期及末期,下降趋势也较为明显(呈显著下降趋势站点占比分别为 41.1% 和 34.6%),在生育初期下降趋势不显著。

关键词: 春玉米; 作物系数; 趋势变化; 时空分布; 东北地区

中图分类号: S274.4; S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0279-12 OSID: 

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Spring Maize Coefficients in Northeast China

LI Bo JING Zhuran WEI Xinguang SUN Jun FU Shining GE Dong
(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Crop coefficient is an important parameter for estimating the change of water demand in crop growing season. Based on the meteorological and spring maize observations of 107 meteorological stations in the Northeast China from 1951 to 2018, the spring maize coefficients calculated by the model of crop coefficients were validated by using different crop coefficient correction formulas. The interannual variation trends and spatial distribution characteristics of crop coefficients during the whole period and each growth stage were analyzed by using spatial interpolation. The results showed that the single crop coefficient method considering the influence of wind speed and humidity had the best effect on the simulation of crop coefficient in the early stage of spring maize ($R^2=0.65$). The coefficient of spring maize crops in the full growth period in the Northeast China was varied from 0.756 to 0.815. The spatial distribution of high-value areas was mainly distributed in the western part of Northeast China, and the low-value areas were mainly distributed in the northern part of Heilongjiang Province and the southeastern part of Liaoning Province. Crop coefficients at different fertility stages were the largest in the middle of fertility, followed by the rapid growth period, and the early and late stages of childbearing were generally small. In the past 70 years, the interannual variation of crop coefficient of spring maize in the Northeast China showed a significant downward trend ($R^2=0.38$), and the tendency rate of crop coefficient reached $-0.004/(10\text{ a})$. In each reproductive period, the interannual changes of K_c showed a declining trend, Heilongjiang Province had the most obvious decline, followed by Jilin Province and eastern part of Inner Mongolia Autonomous region, changes of Liaoning Province were not obvious. The crop coefficient of most stations in Northeast China showed a decreasing trend, the decreasing trend and the significant

收稿日期: 2019-08-12 修回日期: 2019-09-06
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303125)
作者简介: 李波(1969—),女,教授,主要从事节水灌溉理论和技术研究, E-mail: 250077704@qq.com
通信作者: 魏新光(1984—),男,副教授,博士,主要从事作物高效用水与蒸散发尺度效应研究, E-mail: weixg_wi@163.com

个阶段:生长初期、快速生长期、生长中期、生长末期。根据实测春玉米生育期观测资料,假定研究时段内春玉米品种保持不变,确定了研究区域内春玉米的平均生育期见表1。

表1 东北地区春玉米生育时期划分结果
Tab.1 Division of growth periods of spring maize in Northeast China

研究区域	春玉米生育阶段				文献序号
	生育初期	快速生长期	生长中期	生长末期	
辽宁省	4月15日—5月15日	5月16日—6月15日	6月16日—7月16日	7月17日—8月15日	[7,26]
吉林省	5月1日—6月4日	6月5日—7月21日	7月21日—8月28日	8月28日—9月20日	[27]
黑龙江省	5月1—30日	6月1日—7月10日	7月11日—8月20日	8月21日—9月21日	[28]
内蒙古自治区东部	5月10—30日	6月1日—7月10日	7月11日—8月20日	8月21日—9月21日	[29]

1.2.2 玉米各生育期作物系数的确定方法

(1)生育初期

FAO-56 推荐了标准条件下(即最小空气相对湿度 $R_{H_{min}} \approx 45\%$, 2 m 高度风速 $u_2 \approx 2$ m/s, 供水充足, 管理良好, 生长正常, 大面积高产的作物条件)不同作物系数修正公式, 生育初期作物系数修正公式主要为推荐值法、考虑土面蒸发影响的单作物系数法以及考虑风速、湿度影响的单作物系数法3种。各类作物的作物系数典型值为 K_{cTab} , 并要求根据作物高度和气候条件对其进行修正。

推荐值法^[30]: 当平均湿润深度小于 10 mm 时, 参考文献[31]确定 K_c ; 当平均湿润深度大于 40 mm 时, 土壤质地为细壤土或中壤土, 同样参考文献[31]确定 K_c ; 当平均湿润深度在 10~40 mm 之间时, 计算式为

$$K_{cini} = K_{c(a)} + \frac{I - 10}{40 - 10} (K_{c(a)} - K_{c(b)}) \tag{1}$$

式中 K_{cini} ——生育初期修正后的作物系数

$K_{c(a)}$ 、 $K_{c(b)}$ ——生育初期平均作物系数

I ——平均湿润深度, mm

考虑土面蒸发影响的单作物系数法^[10] K_{cini} 计算式为

$$K_{cini} = \begin{cases} \frac{E_{so}}{ET_0} & (t_w \leq t_1) \\ \frac{T_{EW} - (T_{EW} - R_{EW}) \exp\left(\frac{-(t_w - t_1)E_{so}\left(1 + \frac{T_{EW}}{T_{EW} - R_{EW}}\right)}{T_{EW}}\right)}{t_w E_{so}} & (t_w > t_1) \end{cases} \tag{2}$$

式中 R_{EW} ——大气蒸发力控制阶段蒸发水量, mm

T_{EW} ——一次降雨或灌溉后总蒸发水量, mm

E_{so} ——潜在蒸发率, mm/d

ET_0 ——参照作物腾发量, mm/d

t_w ——灌溉或降雨的平均间隔时间, d

t_1 ——大气蒸发力控制阶段的时间, d

当 $t_w \leq t_1$ 时, $K_{cini} = 1.15$, 为生育初期平均作物系数。

考虑风速、湿度影响的单作物系数法^[22] K_{cini} 计算式为

$$K_{cini} = K_{cTab} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(R_{H_{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{3}$$

式中 h ——各生育阶段作物的平均高度, m

(2)快速生长期

单作物系数计算式为

$$K_{cdev} = K_{cprev} + \frac{i - \sum L_{cprev}}{L_{cstage}} (K_{cnext} - K_{cprev}) \tag{4}$$

式中 K_{cdev} ——快速生长期作物系数

K_{cprev} ——前一时段的作物系数

K_{cnext} ——后一时段的作物系数

L_{cprev} ——前一时段的生长时间, d

L_{cstage} ——当前生长时段的持续时间, d

(3)生育中、末期

单作物系数计算式为

$$K_{cmid} = K_{cend} = K_{cTab} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(R_{H_{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{5}$$

式中 K_{cmid} 、 K_{cend} ——生育中、末期修正后的作物系数

1.3 作物系数变化趋势及突变分析方法

利用线性倾向估计法对 1951—2018 年东北地区春玉米作物系数变化趋势进行分析。线性倾向估计是一条合理的直线, 表示变量之间的关系, 建立 Y 与时间 t 之间的一元线性回归方程

$$Y = a + bt \tag{6}$$

式中 a ——回归常数 b ——倾向率

以 $10b$ 表示作物系数每 $10a$ 的倾向率, 其正值表示增加趋势, 负值表示减少趋势。判断变化趋势的程度是否显著, 需要计算相关系数 r 并对其进行显著性检验, 选定显著性水平值 α , 若 $|r| > r_\alpha$ (r_α 为 α 对应的相关系数), 说明 Y 随时间 t 的变化趋势显著,

否则不显著。

Mann - Kendall (M - K) 趋势分析检验法是一种非参数统计检验方法,通过计算统计量,可以分析得到变化趋势、突变时间区域及突变开始时间。能很好地揭示时间序列的趋势变化,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。

1.4 数据处理

数据的处理采用 SPSS 统计分析软件,并进行相关性分析。利用 ArcGIS 克里金插值方法进行空间插值,产生空间栅格数据,并对栅格数据进行分类。

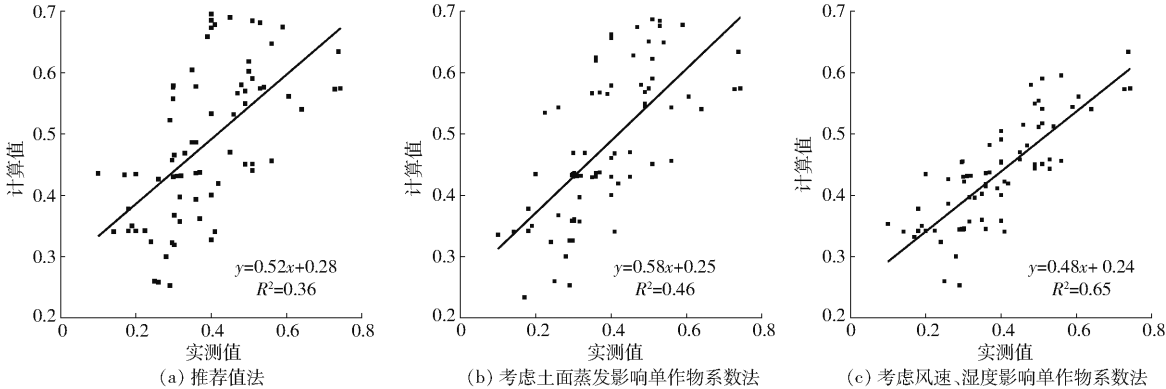


图 2 不同修正方法下生育初期作物系数与各地试验站实测值比较结果

Fig. 2 Comparison of early fertility period crop coefficient and measurement values of experimental stations by different methods of correction

米生育初期的作物系数进行估算,其中考虑风速、湿度影响的单作物系数法拟合精度最高,决定系数达 0.65,高于推荐值法 ($R^2 = 0.36$) 和考虑土面蒸发的单作物系数法 ($R^2 = 0.46$),同时,3 组线性回归方程的斜率分别为 0.52、0.58、0.48,即 3 种方法均会对春玉米生育初期的作物系数产生不同程度的低估,需要用回归方程进行修正。总体而言,考虑风速、湿度影响的单作物系数法是估算东北地区春玉米生育初期作物系数的最佳方法。

2.2 春玉米快速生长期、中期、末期作物系数计算值与实测值比较

采用式(4)、(5)计算了东北地区春玉米快速生

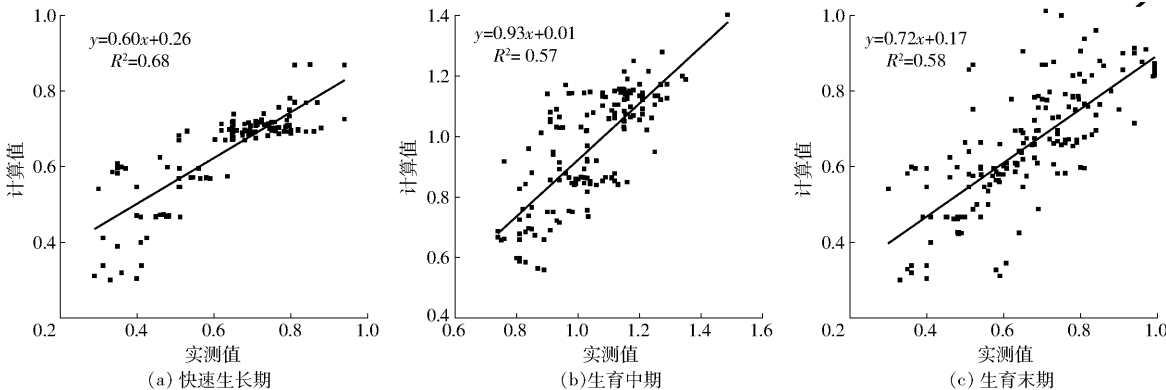


图 3 不同生育阶段作物系数计算值与实测值比较结果

Fig. 3 Comparison of crop coefficient calculated and measured values in different growth stages

2 结果与分析

2.1 春玉米生育初期作物系数的不同修正方法精度比较

春玉米生育初期作物系数的计算值采用 FAO - 56 常用的推荐值法、考虑土面蒸发影响的单作物系数法和考虑风速、湿度影响的单作物系数法 3 种常用方法确定,即采用式(1)~(3)进行确定。本研究中作物系数实测值引用文献[17, 32 - 38]中的数据。由图 2 可知,上述 3 种方法均能较好地对春玉

米生育初期的作物系数进行估算,其中考虑风速、湿度影响的单作物系数法拟合精度最高,决定系数达 0.65,高于推荐值法 ($R^2 = 0.36$) 和考虑土面蒸发的单作物系数法 ($R^2 = 0.46$),同时,3 组线性回归方程的斜率分别为 0.52、0.58、0.48,即 3 种方法均会对春玉米生育初期的作物系数产生不同程度的低估,需要用回归方程进行修正。总体而言,考虑风速、湿度影响的单作物系数法是估算东北地区春玉米生育初期作物系数的最佳方法。

2.3 春玉米全生育期作物系数计算值与实测值比较分析

东北地区幅员辽阔,气候、物候期等差异较大,导致不同地区作物系数数值差异较大,为了进一步验证方法的精度和适用性,需要对 2.1 节和 2.2 节确定的春玉米生育初期、快速生长期、生长中期和末

长期、中期和末期的作物系数,如图 3 所示。由图可知,在 3 个生育阶段,单作物系数法均可较好地模拟春玉米的作物系数,回归方程的决定系数分别达到 0.68、0.57 和 0.58,拟合精度较高,由此可以利用该方法对研究区域内的春玉米快速生长期、中期、末期的作物系数和作物需水量进行估算。

期的作物系数计算方法获得的结果分区域进行验证。根据东北地区的区划分布将东北地区划分为黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部4个子区域,并对各个子区域内的实测值结果与计算结果进行比较,本研究的实测值来源于前人研究文献(表2),前人文献实测值与本研究计算值的对比结果如图4所示,作物系数偏差见表2。

表2 东北地区不同区域春玉米全生育期作物系数
Tab.2 Crop coefficient of spring maize in different regions of Northeast China

研究区域	作物系数	计算值	实测值	绝对偏差	相对偏差/%	文献序号
辽宁省	K_{cini}	0.320	0.354	0.034	9.6	[7,17,32-34]
	K_{cdev}	0.715	0.773	0.058	7.5	
	K_{cmid}	1.132	1.167	0.035	3.0	
	K_{cend}	0.599	0.615	0.016	2.6	
吉林省	K_{cini}	0.378	0.420	0.042	10.0	[35-36]
	K_{cdev}	0.689	0.753	0.064	8.5	
	K_{cmid}	1.185	1.288	0.103	8.0	
	K_{cend}	0.759	0.769	0.010	1.3	
黑龙江省	K_{cini}	0.746	0.797	0.051	6.4	[37,39-40]
	K_{cdev}	0.756	0.869	0.113	13.0	
	K_{cmid}	1.108	1.170	0.062	5.3	
	K_{cend}	0.784	0.800	0.016	2.0	
内蒙古自治区东部	K_{cini}	0.335	0.356	0.021	5.9	[15,20,38,41-46]
	K_{cdev}	0.585	0.621	0.036	5.8	
	K_{cmid}	1.448	1.521	0.073	4.8	
	K_{cend}	0.662	0.686	0.024	3.5	

从图4可以看出,内蒙古自治区东部(图4a)该

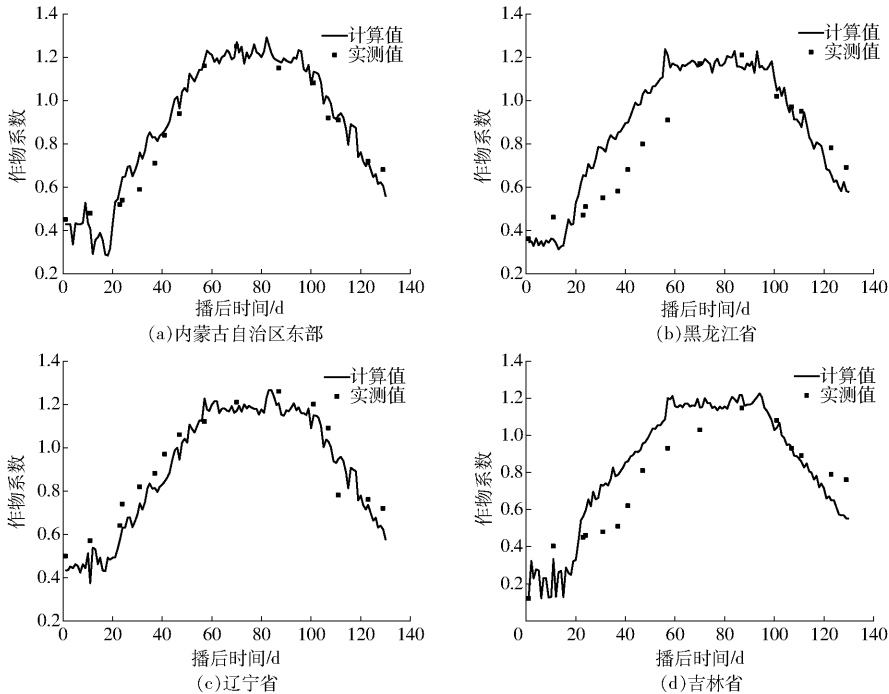


图4 东北地区不同区域春玉米生育期内作物系数的计算值与实测值比较结果
Fig.4 Comparison between calculated and measured values of crop coefficients in spring maize growth period in different regions of Northeast China

方法计算结果与实测结果最为接近,但其生育初期计算值偏小,其相对偏差为5.9%。快速生长期计算值偏大,相对偏差为5.8%,其他生育阶段吻合度较高;辽宁省(图4c)次之,在生育初期和快速生长期计算结果偏小,但偏差均小于10%;黑龙江省(图4b)和吉林省(图4d)误差相对较大,误差主要集中在快速生长期,在快速生长期本方法计算结果普遍偏大,相对偏差范围在1.3%~13%之间。总体而言,由计算方法带来的误差主要集中于春玉米的生育初期和快速生长期,其他生育时期计算精度较高。这种差异主要是由于生育初期作物叶面积较少、土地没有被完全郁闭、植物冠层和土壤水热传输特性不同所造成的。对区域内所有研究站点不同生育期作物系数的计算值和实测值进行对比(图5)发现,回归图的散点沿回归线方向呈锥型分布,误差较大的点主要集中于 K_c 比较小的时期,这与分生育期研究结果相一致(图4)。总体而言,本方法拟合效果良好, $R^2=0.69$,可以利用该方法对研究区域内的春玉米作物系数进行确定。

2.4 春玉米作物系数的空间分布特征

2.4.1 春玉米全生育期作物系数的空间分布特征
根据1951—2018年气象资料,利用2.1节和2.2节确定的春玉米不同生育阶段作物系数计算方法,对研究区域内107个站点的全生育期作物系数进行计算,并利用ArcGIS高斯克里金法进行空间插值,得到东北地区春玉米全生育期作物系数及其标

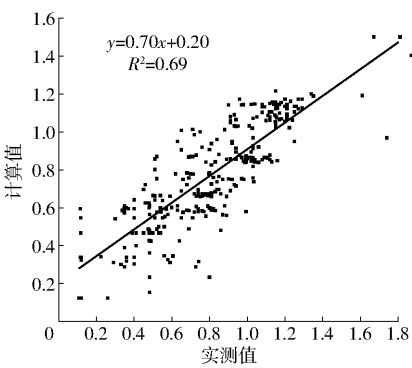


图5 东北地区春玉米作物系数的计算值与实测值结果比较

Fig. 5 Comparison between calculated and measured crop coefficient of spring maize in Northeast China

准差的空间分布,如图6所示。由图6a可知,东北地区春玉米全生育期作物系数在0.756~0.815之

间变化,全区域平均值为0.785。其中高值区主要分布在东北地区的西部,所在区域内黑龙江省最西端和内蒙古自治区东部的大部分地区内作物系数普遍大于0.8。与此同时,在东北地区的中部,包括哈尔滨、长春和沈阳一带,存在一个作物系数较高的狭长地带,区域内作物系数在0.789~0.795之间变化;作物系数的低值区主要分布于黑龙江省北部、内蒙古自治区东部的局部地区和辽宁省的东南部地区,该区域的作物系数普遍小于0.769。东北地区春玉米全生育期作物系数标准差如图6b所示,标准偏差可以很好地反映作物系数的年际波动与变异情况,由图6b可知,区域内作物系数的标准差在0.01~0.02之间变化,且其空间分布与作物系数的空间分布状况基本相同,作物系数比较高的地区其标准差也较大,反之亦然。

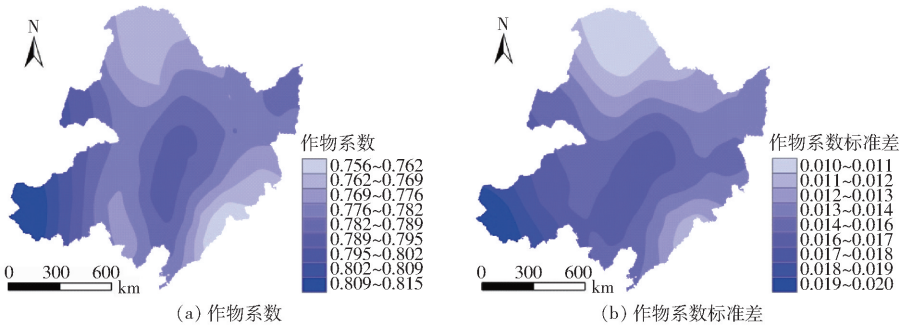


图6 1951—2018年东北地区春玉米全生育期作物系数

Fig. 6 Spatial distributions of crop coefficient of spring maize in Northeast China from 1951 to 2018

2.4.2 春玉米各个生育期作物系数的空间分布特征

为进一步研究东北地区春玉米作物系数的空间分布特征,分别确定了其各生长阶段作物系数,其空

间分布特征如图7所示。由图可知,春玉米在不同生育阶段,其作物系数的变化规律与全生育期基本类似,最高值区域仍然集中于东北地区的最西部,即

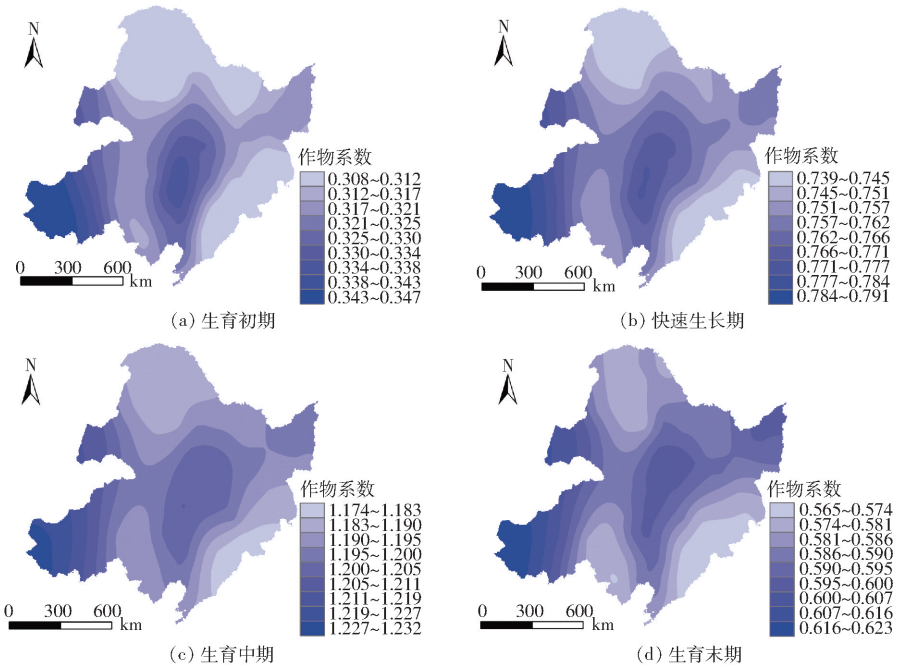


图7 1951—2018年东北地区春玉米不同生育阶段作物系数空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of crop coefficients in different growth periods of spring maize in Northeast China (1951—2018)

内蒙古自治区东部一带。中部高值区的范围有所扩展,以东北地区正中心的长春为核心,向四周扩展。但不同生育阶段的扩展范围略有不同:在生育初期,整个地区的作物系数总体较小,在 0.308 ~ 0.347 之间波动;快速生长期作物系数逐渐增大,在 0.739 ~ 0.791 之间变化;生育中期的作物系数最高,在 1.174 ~ 1.232 之间变化,整个区域的平均值达 1.204;在生育末期,各站点的作物系数均明显下降,作物系数的分布范围在 0.565 ~ 0.623 之间。总体而言,东北地区春玉米不同生育阶段的作物系数在生育中期最大,快速生长期次之,生育初期和末期总体较小。作物系数的高值区域主要分布在东北地区的内蒙古自治区东部和中部。不同生育阶段区域分布略有差异,但总体分布特征差异不大。

2.5 春玉米作物系数的时间变化规律

2.5.1 春玉米全生育期的作物系数年际变化

为进一步分析区域内春玉米作物系数的年际变化特征,对研究区域内春玉米全生育期作物系数进行综合分析,其变化趋势如图 8 所示。由图可知,东北地区近 70 年春玉米全生育期作物系数总体呈下降趋势($R^2 = 0.38$)。就数值而言,从 20 世纪 50 年代到 80 年代,区域内作物系数总体较大,其中 1959 年最大,全区域平均作物系数达 0.825。自 20 世纪 80 年代末期以来,东北地区春玉米全生育期作物系数有明显下降趋势,到 2010 年达到最低,作物系数为 0.775。2011 年以来,区域内作物系数又有一定上升趋势,但总体而言,近 70 年来,春玉米作物系数下降趋势十分明显,作物系数倾向率达 $-0.004/(10\text{ a})$ 。

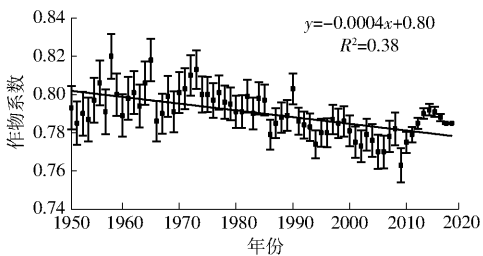


图 8 东北地区春玉米全生育期作物系数年际变化趋势
Fig. 8 Interannual variation trend of crop coefficient of spring maize in Northeast China during whole growth period

2.5.2 不同生育阶段作物系数年际变化趋势

对东北地区不同区域内各站点的数据进行综合分析,得到其不同生长阶段作物系数年际变化情况如图 9 所示,回归参数与 M-K 趋势检验结果如表 3 所示。由表 3 可知,在生育初期(图 9a)黑龙江省($Z = -1.683$)和吉林省($Z = -1.414$)作物系数下降最为明显,气候倾向率为 $-0.008/(10\text{ a})$ 、 $-0.006/(10\text{ a})$,内蒙古自治区东部次之,辽宁省($Z = -0.202$)则无显著变化趋势。快速生长期(图 9b)以及生育末期(图 9d)变化趋势与生育初期趋势较为相同,这两个生育期黑龙江省下降显著, Z 分别为 -1.967 、 -1.844 ,辽宁省无明显变化趋势。生育中期(图 9c)黑龙江省、内蒙古自治区东部、吉林省 3 个地区气候倾向率较为相似,都为 $-0.005/(10\text{ a})$,辽宁省倾向率为 $-0.001/(10\text{ a})$ 。黑龙江省变化最为显著, Z 值为 -2.284 。总体而言,在不同生育阶段,各区域变化趋势基本相同,即黑龙江省 K_c 下降最为明显,吉林省和内蒙古自治区东部次之,辽宁省变化不明显。

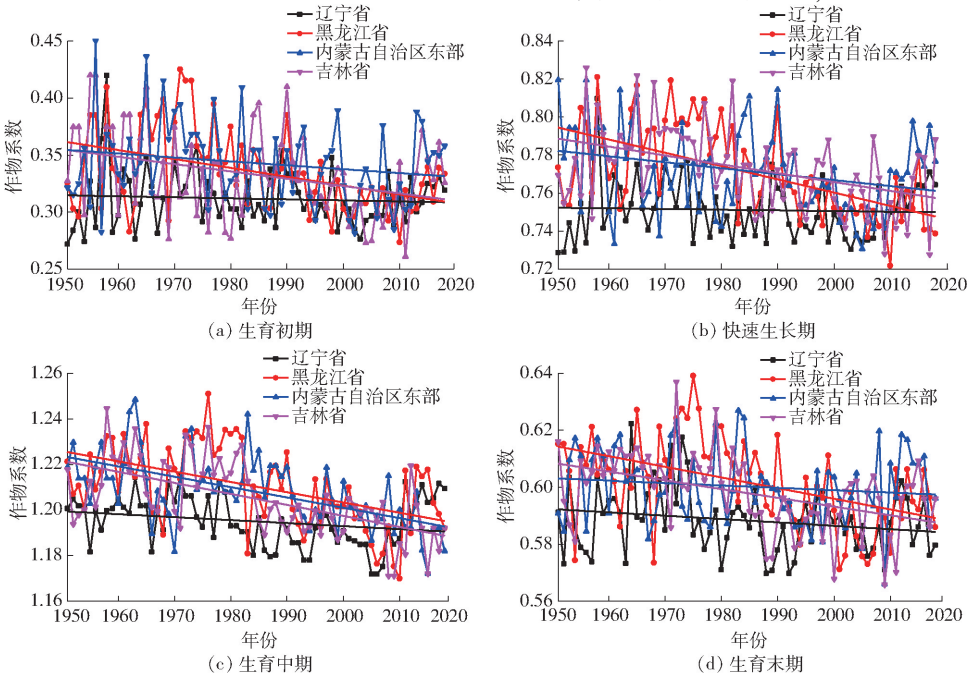


图 9 东北地区春玉米不同生育阶段作物系数变化曲线

Fig. 9 Change of crop coefficient in different growth periods of spring maize in Northeast China

表 3 东北地区不同生育阶段春玉米作物系数序列变化 M-K 趋势检验

Tab.3 Change of crop coefficient M-K sequence of maize in different breeding periods in Northeast China				
生育期	研究区域	统计量 Z	倾向率/(10a) ⁻¹	趋势性
初期	辽宁省	-0.202	-0.005	未通过显著检验
	黑龙江省	-1.683	-0.008	0.05
	内蒙古自治区东部	-0.875	-0.003	未通过显著检验
	吉林省	-1.414	-0.006	0.1
快速生长期	辽宁省	-0.637	-0.005	未通过显著检验
	黑龙江省	-1.967	-0.007	0.05
	内蒙古自治区东部	-1.554	-0.003	0.1
	吉林省	-1.997	-0.005	0.05
中期	辽宁省	-1.010	-0.001	0.1
	黑龙江省	-2.284	-0.005	0.01
	内蒙古自治区东部	-1.869	-0.005	0.05
	吉林省	-1.580	-0.005	0.1
末期	辽宁省	-0.735	-0.001	未通过显著检验
	黑龙江省	-1.844	-0.004	0.05
	内蒙古自治区东部	-1.347	-0.005	0.1
	吉林省	-1.643	-0.003	0.05

注:Z 绝对值大于等于 1.28、1.64 及 2.32 时,分别表示序列通过置信度为 0.1、0.05 和 0.01 的显著性检验。

为进一步研究 K_c 的变化特征,对区域各站点年际变化空间变化趋势进行分析(图 10)。可以看到,除黑龙江省的北部及内蒙古自治区东部等区域呈现无显著变化外,东北地区绝大部分区域均呈下降趋

势且趋势显著,呈下降趋势的站点以及显著下降站点分别达到 99 和 69 个,站点占比分别达 92.5%、64.5%。整个东北地区作物系数倾向率在 $-0.002 \sim 0.021/(10a)$ 之间变化,中部地区倾向率最小,在 $-0.002 \sim 0.003/(10a)$ 之间变化,北部地区倾向率最大,在 $0.018 \sim 0.021/(10a)$ 之间。

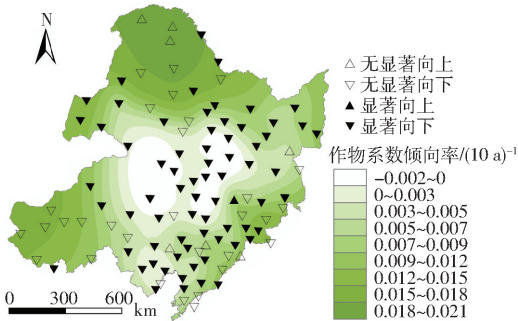


图 10 东北地区春玉米全生育期作物系数变化趋势空间分布
Fig.10 Spatial distribution of change trend of crop coefficient in full growing period of spring maize in Northeast China

由图 11 发现,东北地区大部分站点均呈下降趋势,但不同生育阶段下降存在差异。其中快速生长期(图 11b)下降趋势最为明显,研究区中有 96 个站点呈下降趋势,占总站点数的 89.7%,其中显著下降的站点 50 个,占总站点数的 46.7%,倾向率在 $-0.022 \sim -0.010/(10a)$ 之间,显著下降的区域主要集中于东北地区中北部到中南部的狭长地带,其他地区零星分布。在黑龙江省北部也有部分站点呈上升趋势,其中显著上升的有 2 个,占总站点数的 1.9%,且倾向率在 $0.022 \sim 0.028/(10a)$ 之间。在生育初期(图 11a)和生育中期(图 11c),下降趋势

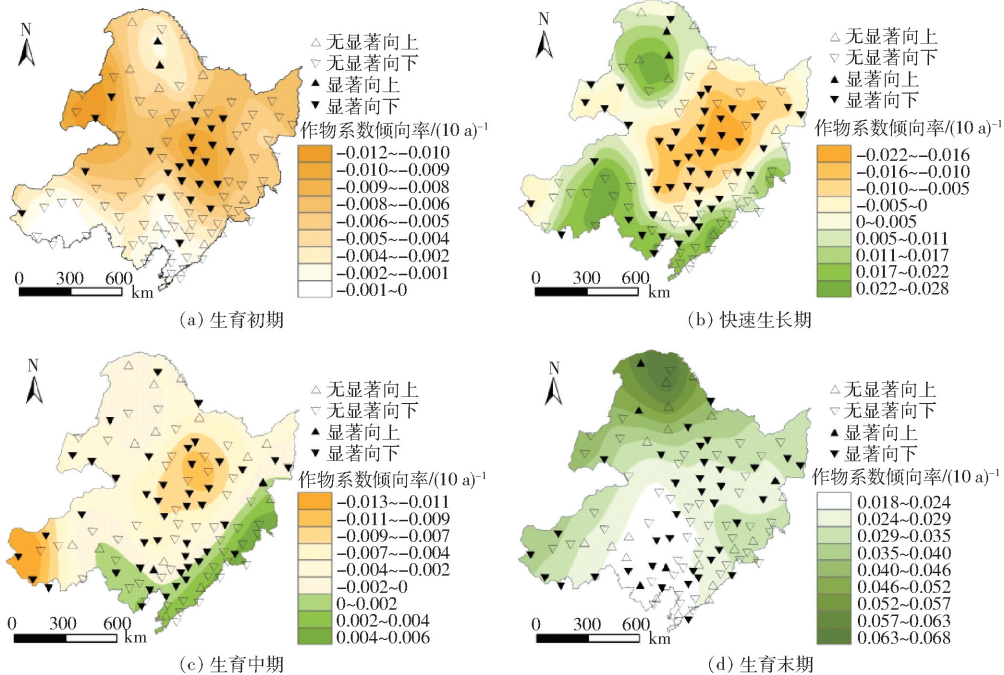


图 11 东北地区春玉米不同生育阶段作物系数变化趋势空间分布

Fig.11 Spatial distributions of changes in crop coefficients in different growth periods of spring maize in Northeast China

也较为明显,倾向率分别在 $-0.012 \sim 0/(10a)$ 以及 $-0.013 \sim 0.006/(10a)$ 之间,下降站点数为 26 和 46 个,显著下降站点数分别为 24 个和 44 个,占总站点数的 22.4% 和 41.1%。下降比较明显的区域主要分布在黑龙江省南部以及辽宁省等地。在生育末期(图 11d)大部分站点的 K_c 呈现一定的下降趋势,同样也有各别站点作物系数呈显著下降趋势,占比为 34.6%,且呈零星分布,倾向率在 $0.018 \sim 0.068/(10a)$ 之间。

3 讨论

在确定东北地区春玉米作物系数时,本文采用计算值与实测值拟合较好的考虑风速、湿度影响方法计算春玉米初期作物系数。所得结果与张淑杰等^[17]在研究不受水分胁迫条件下玉米逐日作物系数较为相似。修正后的数值与试验站提供的作物系数观测值最为一致。但春玉米作物系数计算值与实测值还是呈现了一定的差异。分析其原因,是因为在单作物系数计算的过程中,将土面蒸发系数与基础作物系数放在一起进行考虑,这在一定程度上削弱了蒸发对作物系数的影响。特别在降雨和灌溉后,作物系数较大的情况尤为明显。此外由于东北地区建立了较完善的防护林,风速较低,造成风速修正之后的作物系数略低于实测值。张建平^[9]在计算东北地区玉米全生育期需水量时,区域内各站作物系数 K_c 取值均为 0.8,略高于本研究结果 0.781,黄志刚等^[28]研究发现,松嫩平原春玉米作物系数在 0.3~1.18 之间。本研究根据春玉米不同生长阶段对 K_c 进行划分并校正,增加了计算的准确性。针对没有准确作物系数的观测地区的计算,根据分析实验值与理论值的关系,消除品种、气象条件、土壤和管理水平等的影响,进行临近站点作物系数的代替使用。这样即使某些地区没有观测资料以及准确的作物系数,也可通过出苗后的逐日资料计算得到玉米田的实际蒸散量。本文得出的结果与上述结论在变化趋势上是一致的,但总体 K_c 值偏高。

作物系数时空分布规律受多种气象因素综合作用的影响,采用不同的分析方法可能计算结果略有差异。本研究发现近 70 年平均春玉米作物系数呈波动减少趋势,这与刘晓英等^[47]发现华北地区 6 个站点近 50 年作物系数总体呈下降趋势相一致。东北地区从南至北跨越暖温带、中温带和寒温带,四季分明,夏季闷热多雨,冬季寒冷干燥,形成明显的温带季风性气候。气温变化较大,日照时间长,空气干燥。70 年间东北绝大部分区域春玉米各个生育期

作物系数均呈下降趋势,下降速率总体呈现北部小于南部、西部大于东部的空间分布特征,与侯琮等^[20]研究得出的作物系数空间分布结论相吻合。同时利用线性倾向估计和 M-K 检验法研究东北地区春玉米作物系数趋势变化,发现近 70 年东北地区春玉米作物系数全生育期呈极显著下降趋势,这与前人研究^[2,15,32]得出的结论基本一致。当前正处于全球变暖的时期,东北地区气温升高趋势明显,但作物系数却呈现下降趋势,最主要原因是气象因素(湿度和风速)对作物系数的影响。作物系数和研究区域的地形、地貌、环境有关,区域差异性比较大,因此应综合考虑各种计算方法的特点和使用范围,结合研究区域的具体要求、可行性、数据获取的难易程度以及计算的精度需要等,从而选取最适宜的方法。

4 结论

(1)在春玉米生育初期,利用考虑风速、湿度影响的单作物系数法估算春玉米作物系数精度最高($R^2=0.65$),在快速生长期、生育中期和后期采用 FAO-56 推荐的单作物系数法精度也较高,不同生育期 R^2 在 0.57~0.68 之间变化。利用上述方法对东北地区不同区域逐日作物系数进行估算,内蒙古自治区东部拟合效果最好,辽宁省和黑龙江省次之,吉林省最差。但各区域总体拟合效果均较好($R^2=0.69$)。

(2)东北地区全生育期春玉米作物系数平均值为 0.785,各站变化范围为 0.756~0.815。在空间分布上,高值区主要分布在东北地区的西部,低值区主要分布于黑龙江省的北部、内蒙古自治区东部的局部地区和辽宁省的东南部地区。在生育初期,作物系数在 0.308~0.347 之间波动;在快速生长期,作物系数逐渐增大,在 0.739~0.791 之间变化;生育中期的作物系数最高,在 1.174~1.232 之间变化,整个区域的平均值达 1.204;在生育末期,各站点的作物系数均有明显的下降,作物系数的分布范围在 0.565~0.623 之间。

(3)近 70 年春玉米全生育期作物系数总体呈下降趋势($R^2=0.38$)。在不同生育阶段,各区域 K_c 变化趋势基本相同,均表现为黑龙江省下降最为明显,吉林省和内蒙古自治区东部次之,辽宁省变化不明显。在不同生育阶段,快速生长期下降趋势最为明显,显著下降的站点 50 个,占比 46.7%;在生育中期和生育末期,下降趋势也较为明显,显著下降站点的占比达 41.1% 和 34.6%,在生育初期下降趋势不显著。

参考文献

- [1] 聂堂哲,张忠学,林彦宇,等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7): 217–227.
NIE Tangzhe,ZHANG Zhongxue,LIN Yanyu,et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018, 49(7):217–227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180726&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)
- [2] 高晓容,王春乙,张继权,等. 近50年东北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.
GAO Xiaorong,WANG Chunyi,ZHANG Jiquan,et al. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(12):101–109. (in Chinese)
- [3] YUAN B, GUO J, YE M, et al. Variety distribution pattern and climatic potential productivity of spring maize in Northeast China under climate change[J]. Science Bulletin,2012,57(26):3497–3508.
- [4] 肖俊夫,刘战东,陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究[J]. 玉米科学,2008,16(4):21–25.
XIAO Junfu,LIU Zhandong,CHEN Yumin. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China[J]. Journal of Maize Sciences,2008,16(4):21–25. (in Chinese)
- [5] 王振龙,顾南,吕海深,等. 基于温度效应的作物系数及蒸散量计算方法[J]. 水利学报,2019,50(2):242–251.
WANG Zhenlong,GU Nan,LÜ Haishen,et al. Calculation of crop coefficient and evapotranspiration based on temperature effect[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(2):242–251. (in Chinese)
- [6] 卢晓鹏,段顺琼,马显莹,等. 单双作物系数法计算玉米需水量的对比研究[J]. 节水灌溉,2012(11):18–21.
LU Xiaopeng,DUAN Shunqiong,MA Xianying,et al. A comparative study between single crop coefficient method and double crop coefficient in calculation of water requirement of maize[J]. Water Saving Irrigation,2012(11):18–21. (in Chinese)
- [7] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰. 辽宁地区玉米作物系数的确定[J]. 中国农学通报,2004,20(3):246–248.
JI Ruipeng,BAN Xianxiu,ZHANG Shujie. Ascertainment of crop coefficients of maize in Liaoning area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2004,20(3):246–248. (in Chinese)
- [8] 罗那那,巴特尔·巴克. 北疆地区棉花作物需水量时空演变及其气象影响因子[J]. 应用生态学报,2017,28(10):3305–3313.
LUO Nana,BATUR Bake. Spatio-temporal variation of water requirement and meteorological impact factors of cotton in North Xinjiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(10):3305–3313. (in Chinese)
- [9] 张建平,王春乙,杨晓光,等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报,2009,25(7):50–55.
ZHANG Jianping,WANG Chunyi,YANG Xiaoguang,et al. Future climate change on the influence of the three provinces in Northeast China corn water demand forecasting[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(7):50–55. (in Chinese)
- [10] 汪顺生,费良军,高传昌,等. 不同沟灌方式下夏玉米单作物系数试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):105–111.
WANG Shunsheng,FEI Liangjun,GAO Chuanchang,et al. Experiment on single crop coefficient of summer maize under different furrow irrigations[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):105–111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.019. (in Chinese)
- [11] 李丰琇,马英杰. 基于双作物系数法的新疆覆膜滴灌夏玉米蒸散量估算[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):268–274.
LI Fengxiu,MA Yingjie. Evapotranspiration estimation of summer maize with plastic mulched drip irrigation based on dual crop coefficient approach in Xinjiang[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):268–274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181131&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.031. (in Chinese)
- [12] 魏新光,王铁良,刘春成,等. 基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):193–202.
WEI Xinguang,WANG Tieliang,LIU Chuncheng,et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water budget based on combined model in Liaoning Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(6):193–202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170625&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.025. (in Chinese)
- [13] 解文娟,杨晓光,杨婕,等. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征[J]. 生态学报,2014,34(21):6232–6243.
XIE Wenjuan,YANG Xiaoguang,YANG Jie,et al. Spatio-temporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(21):6232–6243. (in Chinese)
- [14] 胡永翔,李授农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(11):87–91.
HU Yongxiang,LI Yuannong,ZHANG Ying. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation jujube in Loess Plateau of China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(11):87–91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.

- issn. 1000-1298. 2012. 11. 016. (in Chinese)
- [15] 云文丽,侯琼,王永利,等. 内蒙古自治区典型草原作物系数和实际蒸散量的时空分布特征[J]. 自然资源学报,2013,28(2):300-311.
YUN Wenli, HOU Qiong, WANG Yongli, et al. Spatial and temporal distribution of crop coefficient and actual evapotranspiration in typical steppe of Inner Mongolia [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2): 300-311. (in Chinese)
- [16] 樊引琴,蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002,33(3):50-54.
FAN Yinqin, CAI Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 50-54. (in Chinese)
- [17] 张淑杰,周广胜,李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. 应用气象学报,2015,26(6):695-704.
ZHANG Shujie, ZHOU Guangsheng, LI Rongping. Daily crop coefficient of spring maize using eddy covariance observation and its actual evapotranspiration simulation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(6): 695-704. (in Chinese)
- [18] 冯禹,龚道枝,王罕博,等. 基于双作物系数的旱作玉米田蒸散估算与验证[J]. 中国农业气象, 2017,38(3):141-149.
FENG Yu, GONG Daozhi, WANG Hanbo, et al. Estimating rainfed maize evapotranspiration using the FAO dual crop coefficient method on the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(3): 141-149. (in Chinese)
- [19] 曹永强,李晓瑞,朱明明. 河北省主要作物系数时空分布特征[J]. 水利水电科技进展, 2019,39(2):37-45.
CAO Yongqiang, LI Xiaorui, ZHU Mingming. Spatial and temporal distribution characteristics of main crop coefficients in Hebei Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 37-45. (in Chinese)
- [20] 侯琼,王海梅,云文丽,等. 内蒙古自治区河套灌区春玉米作物系数试验研究[J]. 应用气象学报, 2016,27(4):417-425.
HOU Qiong, WANG Haimei, YUN Wenli, et al. Experimental study on crop coefficient of spring mazing in Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(4): 417-425. (in Chinese)
- [21] 孙爽,杨晓光,李克南,等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2013,29(15):72-82.
SUN Shuang, YANG Xiaoguang, LI Ke'nan, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 72-82. (in Chinese)
- [22] 刘钰,汪林,倪广恒,等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009,25(12):6-12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese)
- [23] ZHANG D, HONG H. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013, 27(8): 1871-1881.
- [24] LIU Y, TEIXEIRA J L, ZHANG H J, et al. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain [J]. Agricultural Water Management, 1998, 36(3): 233-246.
- [25] QIANG Z, SUN P, SINGH V P, et al. Spatial-temporal precipitation changes (1956-2000) and their implications for agriculture in China [J]. Global & Planetary Change, 2012, 82-83(1): 86-95.
- [26] 刘江,潘宇弘,王平华,等. 1966-2015年辽宁省玉米气候生产潜力的时空特征[J]. 生态学杂志, 2018,37(11):221-231.
LIU Jiang, PAN Yuhong, WANG Pinghua, et al. Spatial and temporal characteristics of climatic potential productivity of maize in Liaoning Province from 1966 to 2015 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(11): 221-231. (in Chinese)
- [27] 王蕊,张继权,郭恩亮,等. 近55 a吉林中西部玉米生长季旱涝时空特征分析[J]. 自然灾害学报,2018,27(1):186-197.
WANG Rui, ZHANG Jiquan, GUO Enliang, et al. Spatiotemporal characteristics of drought and waterlogging during maize growing season in midwestern Jilin Province for recent 55 years [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 186-197. (in Chinese)
- [28] 黄志刚,肖烨,张国,等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. 生态学报,2017,37(7):2368-2381.
HUANG Zhigang, XIAO Ye, ZHANG Guo, et al. Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2368-2381. (in Chinese)
- [29] 杜斌,屈忠义,于健,等. 内蒙古自治区河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014,33(增刊1):16-20.
DU Bin, QU Zhongyi, YU Jian, et al. Experimental study on crop coefficient under mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(Sup. 1): 16-20. (in Chinese)
- [30] 刘浏,商崇菊,蔡长举,等. 黔中地区玉米作物系数及作物需水量研究[J]. 安徽农业科学, 2010,38(19):10121-10123.
LIU Liu, SHANG Chongju, CAI Changju, et al. Experiment in the crop coefficient in central Guizhou and its requirement to water [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(19): 10121-10123. (in Chinese)
- [31] ALLEN R G. FAO irrigation and drainage paper [J]. Irrigation & Drainage, 1998, 300: 64-65.
- [32] 靳春香. 近50年辽宁省玉米全生育期有效降水与需水量变化特征研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.
JIN Chunxiang. Variation characteristics of maize effective precipitation and water requirement in Liaoning during 1960-2014 [D]. Beijing: Journal of Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese)

- [33] 李新红. 全国农业灌溉需水量及区域特性研究[D]. 北京:清华大学,2005.
LI Xinhong. Agricultural irrigation water requirement and its regional characteristic in China [D]. Beijing: Tsinghua University,2005. (in Chinese)
- [34] 李晶,张运福,班显秀. 辽宁玉米作物系数研究[J]. 辽宁气象, 2000(1):18-20.
LI Jing,ZHANG Yunfu,BAN Xianxiu. Liaoning corn crop coefficient of research [J]. Liaoning Meteorological Quarterly,2001(1):18-20. (in Chinese)
- [35] 邱美娟,郭春明,王冬妮,等. 1960—2015年吉林省玉米生长季有效降水 and 水分亏缺指数的变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2018,36(1):237-243.
QIU Meijuan, GUO Chunming, WANG Dongni, et al. Variation of effective precipitation and water deficit index in maize growing season in Jilin Province during 1960—2015 [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2018,36(1):237-243. (in Chinese)
- [36] 刘钰,谭军利,李王成,等. 吉林四平地区玉米和大豆灌溉需水量分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015,13(6):1225-1228.
LIU Yu, TAN Junli, LI Wangcheng, et al. Analysis of irrigation water requirement for maize and soybean in Siping region of Jilin Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(6):1225-1228. (in Chinese)
- [37] 白静. 黑龙江西北部玉米膜下滴灌试验研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2011.
BAI Jing. The experimental study of corn growing using drip irrigation under plastic membrane in northwestern area of Heilongjiang Province [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2011. (in Chinese)
- [38] 冯良山,孙占祥,曹敏建,等. 科尔沁沙地南缘地区主要作物耗水规律及水分利用评价[J]. 作物杂志,2010(4):10-14.
FENG Liangshan,SUN Zhanxiang,CAO Minjie, et al. Water consumption and use effective of main crops on the Southern Kerqin sandy land [J]. Crops,2010(4):10-14. (in Chinese)
- [39] 高野,李树森,王立刚,等. 嫩江中游段草原耗水量的试验[J]. 防护林科技,2007(1):32-33.
GAO Ye,LI Shusen,WANG Ligang, et al. Experiment in water consumption for meadow of the middle reaches of Nenjiang River [J]. Protection Forest Science and Technology, 2007(1):32-33. (in Chinese)
- [40] 李秀芬,赵慧颖,朱海霞,等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2016,27(8):2561-2570.
LI Xiufen, ZHAO Huiying, ZHU Haixia, et al. Evolution of maize climate productivity and its response to climate change in Heilongjiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(8):2561-2570. (in Chinese)
- [41] 陈素华,王志春,李丹. 内蒙古通辽市、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.
CHEN Suhua, WANG Zhichun, LI Dan. The water deficit evaluation and regional difference of spring maize in Tongliao and Chifeng in Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2016,37(4):20-25. (in Chinese)
- [42] 戴佳信,史海滨,田德龙,等. 内蒙古河套灌区主要粮油作物系数的确定[J]. 灌溉排水学报, 2011,30(3):23-27.
DAI Jiaxin,SHI Haibin,TIAN Delong, et al. Determined of crop coefficients of main grain and oil crops in Inner Mongolia Hetao Irrigated Area [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(3):23-27. (in Chinese)
- [43] 商艳. 计算饲草料基地青贮玉米腾发速率的作物系数法[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
SHANG Yan. The crop coefficient approach for estimating evapotranspiration of maize harvested green in the forage base [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2005. (in Chinese)
- [44] 闫浩芳,史海滨,薛铸,等. 内蒙古河套灌区 ET_0 不同计算方法的对比研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):103-106.
YAN Haofang,SHI Haibin,XUE Zhu, et al. Comparison of estimating ET_0 with different methods in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):103-106. (in Chinese)
- [45] 闫浩芳. 内蒙古河套灌区不同作物腾发量及作物系数的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2008.
YAN Haofang. The study of crop evapotranspiration and crop coefficient in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2008. (in Chinese)
- [46] 戴佳信. 内蒙古自治区河套灌区间作作物需水量与生理生态效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.
DAI Jiaxin. Crop water requirement and physiological and ecological effects in intercropping patterns in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2011. (in Chinese)
- [47] 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.
LIU Xiaoying,LI Yuzhong,HAO Weiping. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(10):155-159. (in Chinese)