

河北省主要作物系数时空分布特征

曹永强,李晓瑞,朱明明

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘要:为进一步提高农田蒸散量和灌溉量计算的准确性以及优化农业灌溉水资源配置,基于河北省 1955—2014 年逐日气象数据,借助分段单值平均作物系数法分析河北省冬小麦、夏玉米和棉花作物系数的时空分布特征。结果表明:1955—2014 年冬小麦、夏玉米和棉花作物系数均呈不显著下降趋势,全生育期内年际间平均作物系数分别为 0.86、0.85 和 0.83;不同生育期内,3 种作物系数变化区间分别为 $[0.40,1.29]$ 、 $[0.49,1.24]$ 、 $[0.30,1.29]$ 。全生育期内,冬小麦和夏玉米作物系数均呈以邢台为低值中心向四周逐渐增大的空间分布特征,棉花则是由西向东逐渐增大;不同生育期内,冬小麦和棉花的大部分生育期作物系数呈由西向东逐渐增大的空间分布特征,而夏玉米则是由邢台向四周逐渐增大。风速和日照时数的降低是引起 3 种作物系数减小的主要原因。

关键词:作物系数;时空分布;生育期;气候因子;河北省

中图分类号:S512.1;S513 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)02-0037-09

Spatial and temporal distribution characteristics of main crop coefficients in Hebei Province//CAO Yongqiang, LI Xiaorui, ZHU Mingming (College of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: To further improve the calculation accuracy of farmland evapotranspiration and irrigation, and to optimize agricultural irrigation water resources allocation, the spatial and temporal distribution characteristics of the crop coefficients of winter wheat, summer maize and cotton in Hebei Province are analyzed using the segment single value averaged crop coefficient method based on the daily meteorological data from 1955 to 2014 in Hebei Province. The results show that from 1955 to 2014, the coefficients of winter wheat, summer maize and cotton crop has a non-significant downward trend, and the average crop coefficients during the whole growth period are 0.86, 0.85 and 0.83, respectively. In different periods of birth, the coefficient for winter wheat, summer maize and cotton crop are in the variation interval of $[0.40, 1.29]$, $[0.49, 1.24]$ and $[0.30, 1.29]$, respectively. In the whole growth period, the crop coefficients of both winter wheat and summer maize show an increasing trend at Xingtai as the center. The cotton crop coefficient increases gradually from west to east with unobvious spatial differences. In different growth periods, the crop coefficient in most reproductive periods of wheat and cotton gradually increase from west to east, but the crop coefficient of summer maize gradually increases from Xingtai to all round. The decrease of wind speed and sunshine duration are the main reasons for the decrease of crop coefficient.

Key words: crop coefficients; spatial and temporal distribution; growth period; climatic factors; Hebei Province

作物系数 K_c 是作物的实际蒸散量与参考作物蒸散量的比值,是计算与分析区域农田蒸散量的重要参数,其不仅能反映作物本身的生物学特征,也能反映作物所在区域的土壤肥力状况以及田间管理水平对农田蒸散量的影响^[1],作物系数的准确性在很大程度上决定了农田实际蒸散量的理论计算精度。河北省作为我国重要粮食产区,人均水资源量 307 m^3 ,仅为全国平均值的 $1/7$ ^[2-3],而农业灌溉用水占到总用水量的 70% 以上^[4-5],是我国水资源严重

短缺的地区之一。计算作物系数是估计作物需水量等农业灌溉指标的基础,因此,准确计算作物系数对提高农田水分利用率、制定科学和合理的灌溉制度具有重要的现实意义。

国内外学者针对不同地区、不同作物的作物系数确定方法和数值计算进行了大量的研究,如 Sammis 等^[6]和 Stegman^[7]利用生长期积温作为变量构建了玉米和高粱作物系数曲线;Steele 等^[8]以播后日数为变量,采用 5 次多项式进行回归分析,确定

了玉米的作物系数曲线。目前国外主要是通过测量作物实际蒸发蒸腾量,进而计算作物系数,应用较为广泛的方法主要有土壤水量平衡法、蒸渗仪法、波文比能量平衡法和遥感法^[9-10]。国内学者多是在试验的基础上,利用田间水量平衡原理对作物的作物系数进行计算^[11],或是对作物系数确定方法进行修正,比如马建琴等^[12]在利用 IrriMax 软件对夏玉米根深进行修正的基础上计算作物系数,并结合土壤水分预测模型,对作物根区土壤水分进行模拟分析。在影响作物系数的相关因子研究中,高晓丽等^[13]对比了贵州地区不同灌溉模式下的作物系数,结果表明常规灌溉和各种节水模式,多种作物系数差值较大,且后者的作物系数均低于前者;韩淑敏等^[14]对比了不同降水年型下小麦生长期作物系数,计算结果基本一致,但是为了准确估算作物需水量,建议尽量采用长序列观测数据;环海军等^[15]利用土壤水分平衡方程对比了鲁中地区不同地形的作物系数,结果表明冬小麦和夏玉米的山区作物系数比平原低。

目前,作物系数多是基于单个试验站单种作物的试验数据,而作物系数时间和空间上存在差异,故该方法的普适性较差。因此,本文选取河北省 13 个典型气象站的气象和土壤资料,基于分段单值平均作物系数法,分析河北省近 60 年冬小麦、夏玉米和棉花作物系数的时空分布特征,并提出相关建议。在此基础上对作物系数与气象要素进行相关性分析,并探讨水文年型与作物系数的关系,以期为应对不同气候变化环境下作物需水量计算提供参考以及为灌溉制度的完善提供理论依据。

1 研究区概况与资料方法

1.1 研究区概况

河北省地处华北平原,地势西北高东南低,地貌复杂多样,主要为坝上高原、燕山和太行山山地、河北平原三大地貌单元。属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候,大部分地区四季分明。降水量分布特

点为东南多西北少,年均降水量 484.5 mm,年日照时数为 2303.1 h,多年平均气温为 11.8℃。主要种植作物类型有小麦、玉米、薯类、豆类、棉花、蔬菜和油料等。

1.2 数据来源与处理

本文选取河北省 13 个气象站点的气象数据及所对应地区的土壤数据,时间范围为 1955—2014 年。气象数据来源于中国气象数据网,包括日照时数、平均相对湿度、平均风速、降水量、最低气温、最高气温、平均气温、平均气压等。土壤数据主要来源于中国土壤数据库,包括土壤蒸发层深度、蒸发层土壤的田间持水量、蒸发层土壤的凋萎点含水率、蒸发层土壤的砂粒含量和黏粒含量。受自然条件的影响,除了张家口和承德以外,冬小麦主要种植在长城以南地区;夏玉米主要分布在廊坊以南地区;河北省除张家口、承德及秦皇岛以外,其他地区均为棉花种植的主要区域。具体气象站点分布情况如图 1 所示。作物生育期数据来源于当地农业气象试验站,经过整理得到的生育期划分如表 1~3 所示。

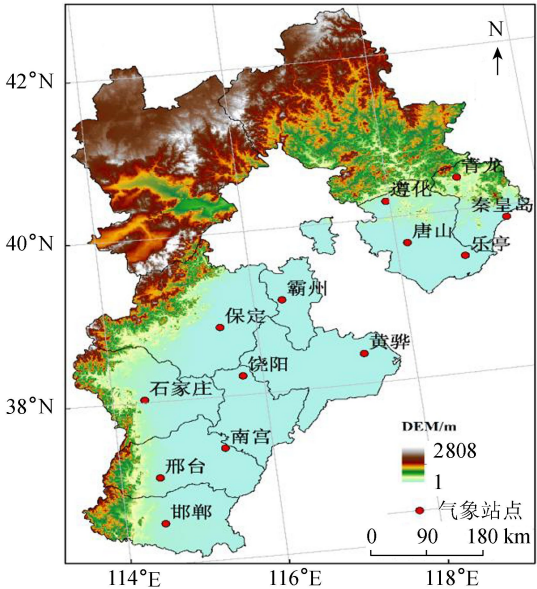


图 1 各气象站点及主要作物种植区域分布

表 1 河北省 13 个气象站点冬小麦生育期划分情况统计

站台名称	初始生长期	冻融期	越冬期	快速发育期	生育中期	成熟期
石家庄	9月28日—11月28日	11月29日—12月7日	12月8日—3月21日	3月22日—4月30日	5月1日—6月1日	6月2日—6月17日
邢台	9月28日—11月29日	11月30日—12月7日	12月8日—3月21日	3月22日—5月2日	5月3日—6月1日	6月2日—6月16日
邯郸	10月8日—11月28日	11月29日—12月5日	12月6日—3月19日	3月20日—4月28日	4月29日—5月31日	6月1日—6月8日
遵化	9月15日—11月25日	11月24日—12月1日	12月2日—3月11日	3月12日—4月28日	4月29日—5月28日	5月29日—6月21日
青龙	9月16日—11月28日	11月29日—12月6日	12月7日—3月23日	3月24日—5月1日	5月2日—6月3日	6月4日—6月21日
秦皇岛	9月21日—11月29日	11月30日—12月7日	12月8日—3月19日	3月20日—5月2日	5月3日—6月3日	6月4日—6月20日
霸州	9月24日—11月26日	11月27日—12月4日	12月5日—3月23日	3月24日—5月2日	5月3日—6月4日	6月5日—6月18日
唐山	9月21日—11月15日	11月16日—12月7日	12月8日—3月21日	3月22日—5月1日	5月2日—5月27日	5月28日—6月25日
乐亭	9月22日—11月28日	11月29日—12月6日	12月7日—3月17日	3月18日—5月3日	5月4日—6月2日	6月3日—6月20日
保定	9月23日—11月29日	11月30日—12月4日	12月5日—3月19日	3月20日—4月30日	5月1日—6月2日	6月2日—6月15日
饶阳	9月28日—11月29日	11月30日—12月13日	12月14日—3月27日	3月28日—5月4日	5月5日—6月3日	6月4日—6月20日
黄骅	9月29日—12月1日	12月2日—12月13日	12月14日—3月27日	3月28日—5月6日	5月7日—6月7日	6月8日—6月21日
南宫	9月30日—11月24日	11月25日—12月3日	12月4日—3月21日	3月22日—5月1日	5月2日—5月30日	5月31日—6月11日

表2 河北省8个气象站点夏玉米生育期划分情况统计

站台名称	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期
石家庄	6月16日—7月2日	7月3日—7月30日	7月31日—8月30日	8月31日—9月23日
邢台	6月17日—7月3日	7月4日—8月2日	8月3日—9月3日	9月4日—9月21日
邯郸	6月9日—7月4日	7月5日—8月2日	8月3日—9月6日	9月7日—9月12日
霸州	6月20日—7月6日	7月7日—8月5日	8月6日—9月2日	9月3日—9月27日
保定	6月17日—7月3日	7月4日—8月1日	8月2日—9月1日	9月2日—9月25日
饶阳	6月19日—7月6日	7月7日—8月4日	8月5日—9月4日	9月5日—9月28日
黄骅	6月17日—7月4日	7月5日—8月6日	8月7日—9月9日	9月10日—9月30日
南宫	6月17日—7月6日	7月7日—8月2日	8月3日—8月29日	8月30日—9月22日

表3 河北省11个气象站点棉花生育期划分情况统计

站台名称	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期
石家庄	4月25日—5月20日	5月21日—6月28日	6月29日—8月11日	8月12日—9月17日
邢台	4月25日—5月22日	5月23日—7月3日	7月4日—8月13日	8月14日—9月16日
邯郸	4月23日—5月18日	5月19日—6月29日	6月30日—8月14日	8月15日—9月12日
遵化	4月25日—5月14日	5月15日—6月25日	6月26日—8月18日	8月19日—9月22日
霸州	4月27日—5月28日	5月29日—7月7日	7月8日—8月19日	8月20日—9月24日
唐山	4月24日—5月11日	5月12日—6月24日	6月25日—8月13日	8月14日—9月21日
乐亭	4月25日—5月21日	5月22日—7月2日	7月3日—8月17日	8月18日—9月21日
保定	4月25日—5月20日	5月21日—6月31日	7月1日—8月15日	8月16日—9月21日
饶阳	4月26日—5月25日	5月26日—6月30日	7月1日—8月20日	8月21日—9月23日
黄骅	4月28日—5月27日	5月28日—7月9日	7月10日—8月22日	8月23日—9月28日
南宫	4月20日—5月23日	5月24日—7月3日	7月4日—8月16日	8月17日—9月16日

1.3 研究方法

1.3.1 分段单值平均作物系数法

分段单值平均作物系数法是一种无需大量数据支持的较为简单的作物系数计算方法。该方法根据不同生育期叶面蒸腾和土面蒸发的变化规律,取同一生育期内逐日作物系数的平均值表示该时期的作物系数^[16]。该方法将作物生育期分为4个阶段:①初始生长期,从播种到作物覆盖率10%左右。②快速发育期,从覆盖率10%到75%左右。③生育中期,从充分覆盖到成熟期开始,叶片逐渐变黄。④成熟期,从叶片开始变黄到生理成熟或收获。由于冬小麦具有越冬特性,因此还有冻融期和越冬期共6个阶段。分段单值平均作物系数的计算主要包括以下步骤:

$$K_{cini} = \begin{cases} \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 & t_w \leq t_1 \\ \frac{T_{EW} - (T_{EW} - R_{EW}) \exp \left[\frac{-(t_w - t_1) E_{so} \left(1 + \frac{R_{EW}}{T_{EW} - R_{EW}} \right)}{T_{EW}} \right]}{t_w ET_0} & t_w > t_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$R_{EW} = \begin{cases} 20 - 0.15 S_a & S_a \geq 80\% \\ 11 - 0.06 C_1 & C_1 \geq 50\% \\ 8 + 0.08 C_1 & S_a < 80\% \text{ 且 } C_1 < 50\% \end{cases}$$
$$T_{EW} = \begin{cases} Z_e (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) & ET_0 \geq 5 \text{ mm/d} \\ Z_e (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) \frac{ET_0}{5} & ET_0 < 5 \text{ mm/d} \end{cases}$$

步骤1 从联合国农业与粮食组织(FAO)编写的

《作物需水计算指南》中查找标准条件下3种作物系数。①冬小麦: $K_{cini(Tab)} = 0.7$; $K_{cfro(Tab)} = 0.4$; $K_{cmid(Tab)} = 1.15$; $K_{cend(Tab)} = 0.4$ 。②夏玉米: $K_{cini(Tab)} = 0.3$; $K_{cmid(Tab)} = 1.2$; $K_{cend(Tab)} = 0.6$ 。③棉花: $K_{cini(Tab)} = 0.35$; $K_{cmid(Tab)} = 1.2$; $K_{cend(Tab)} = 0.7$ 。式中 $K_{cini(Tab)}$ 、 $K_{cfro(Tab)}$ 、 $K_{cmid(Tab)}$ 、 $K_{cend(Tab)}$ 分别为标准条件下初始生长期、越冬期、生育中期、成熟期的作物系数。

步骤2 根据当地气候条件调节 $K_{cmid(Tab)}$ 和

$K_{cend(Tab)}$, 计算公式为

$$K_{cmid} = K_{cmid(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (1)$$

$$K_{cend} = \begin{cases} K_{cend(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \\ K_{cend(Tab)} \geq 0.45 \\ K_{cend(Tab)} < 0.45 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{cmid} 、 K_{cend} 分别为调节后的生育中期、成熟期的作物系数; U_2 为对应生育期内2m高处的平均风速; RH_{min} 为对应生育期内最低相对湿度的平均值; h 为该生育阶段内作物的平均高度,冬小麦、夏玉米、棉花的 h 分别为1m、2m和1.5m。若缺少最低相对湿度的实测资料, RH_{min} 可用最高气温 T_{max} 和最低气温 T_{min} 计算。

$$RH_{min} = 100 \times \frac{\exp \left(\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right)}{\exp \left(\frac{17.27 T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right)} \quad (3)$$

步骤3 计算 K_{cini} , 由于作物初始生长期的土

面蒸发量占总蒸发量的比例较大,因此计算 K_{cini} 时必须考虑土面蒸发的影响,其计算公式为

式中: R_{EW} 为大气蒸发力控制时期蒸发的水量; T_{EW} 为一次降雨或灌溉后总计蒸发的水量; E_{so} 为潜在蒸发率; ET_0 为逐日作物蒸散量; t_w 为灌溉或降雨的平均间隔天数; t_1 为大气蒸发力控制时期的天数($t_1 = R_{EW}/E_{so}$); Z_e 为土壤蒸发层的深度,通常为100~150mm; θ_{FC} 和 θ_{WP} 分别为蒸发层土壤的田间持水量和凋萎点含水率; S_a 和 C_1 分别为蒸发层土壤中的砂粒

1.3.2 普通克里金 (Kriging) 插值法

普通克里金插值法假设采样点值不存在潜在的全局趋势,只用局部因素就可以较好地预测未知值,相比传统插值方法精度较高^[17]。本文利用该方法模拟河北省 K_e 空间变化。

1.3.3 曼-肯德尔 (M-K) 法

曼-肯德尔法是一种非参数统计检验方法。利用该方法得到 UF 与 UB 两列数据,将其绘制成两条曲线,用于检验序列的变化趋势。若这两列数据大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当 UF、UB 曲线超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。若 UF 与 UB 两条曲线出现交点,且交点在临界值之间则表示该时刻为突变开始时刻。本文选定显著水平 $\alpha=0.05$,对应的临界值为 ± 1.96 ^[18]。

1.3.4 偏相关分析

偏相关分析也称净相关分析,该方法在控制其他变量的影响下分析两变量间的线性相关性,利用偏相关系数(净相关系数)进行分析^[19]。本文利用该方法探讨影响 K_e 的主要气候因子。

2 结果与分析

2.1 作物系数时间变化特征分析

2.1.1 年际间变化特征分析

河北省冬小麦、夏玉米、棉花的作物系数年际变化如图 2 所示。3 种作物的 K_e 均呈不显著下降趋势,变化倾向率分别为 $-0.000\ 2a^{-1}$ 、 $-0.000\ 6a^{-1}$ 和 $-0.000\ 6a^{-1}$ 。具体表现为:①冬小麦 K_e 在 1968 年最大(0.88),1956 年最小(0.83),年际间平均 K_e 为 0.86。1955—1989 年,冬小麦 K_e 呈增减交替的趋势变化;1989 年以后, K_e 呈显著下降趋势。韩淑敏等^[14]的研究结果表明,1995—2001 年冬小麦 K_e 存在较明显的下降趋势,多年 K_e 均值为 0.90,这与本文的结果较为一致。在近 60 年的变化过程中 UF 和 UB 曲线仅出现 1 个交点,但并未在临界线范围内(± 1.96),因此可判定冬小麦 K_e 并未出现显著突变现象^[20]。②夏玉米 K_e 在 1972 年最大(0.88),1988 年最小(0.82),年际间平均 K_e 为 0.85。

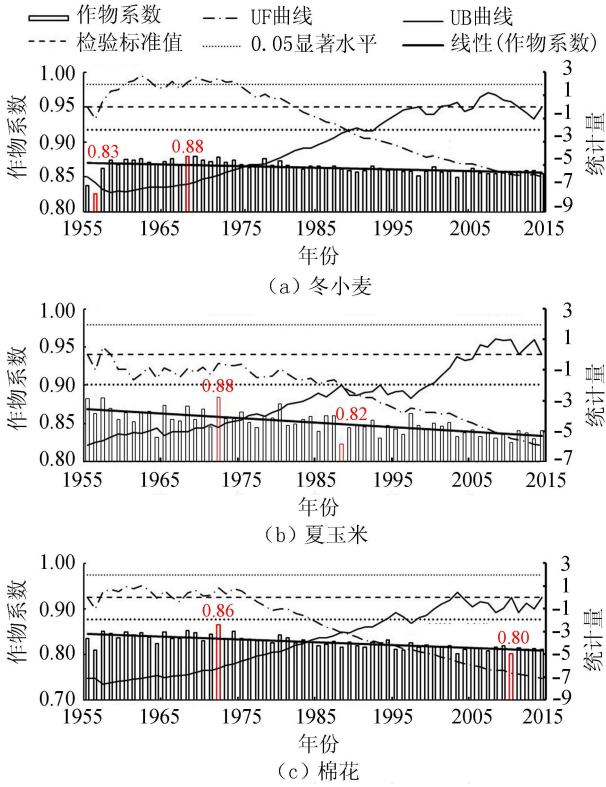


图 2 河北省 3 种主要作物系数年际趋势变化

1955—1988 年, K_e 呈不显著下降趋势;1990 年以后, K_e 呈显著下降趋势。M-K 突变分析发现,近 60 年夏玉米 K_e 并未出现显著突变。③棉花在年际间的平均 K_e 为 0.83,1955—1976 年 K_e 呈增减交替的趋势变化,在 1972 年达到最大(0.86);1977—1984 年 K_e 呈不显著下降趋势;1985 年以后 K_e 呈显著下降趋势,且在 2010 年降至最小(0.80)。M-K 突变分析发现,近 60 年棉花 K_e 并未出现显著突变现象。

2.1.2 不同生育期变化特征分析

表 4 为不同生育期 3 种 K_e 近 60 年平均值变化趋势。6 个时期内,①冬小麦 K_e 在[0.40,1.29]之间,这与宿梅双等^[21]的研究结果较一致。 K_e 经历了先减小后增大再减小的变化过程,初期冬小麦生长缓慢, K_e 较小且基本不变,入冬后气温低,蒸散量减小, K_e 逐渐减小,1 月达到最低值;3 月气温回升,作物快速生长, K_e 逐渐增大,4 月底 5 月初达到最大值,之后随籽粒形成,植株衰老, K_e 迅速减小。②夏

表 4 不同生育期平均作物系数及方差

生育期	K_e			V_{AR}		
	冬小麦	夏玉米	棉花	冬小麦	夏玉米	棉花
初始生长期	0.60	0.49	0.30	0.00009	0.0017	0.00038
冻融期	[0.40,0.60]			0.00002		
越冬期	0.40			0.00001		
快速发育期	[0.40,1.29]	[0.49,1.24]	[0.30,1.29]	0.00070	0.0004	0.00071
生育中期	1.29	1.24	1.29	0.00300	0.0008	0.00270
成熟期	[1.05,1.29]	[0.56,1.24]	[0.66,1.29]	0.00050	0.0005	0.00029

玉米 K_c 在 $[0.49, 1.24]$ 之间,与赵娜娜等^[22] 的研究结果 K_c 在 $[0.45, 1.28]$ 之间有些出入,分析其原因是赵娜娜等的研究区是北京,且是实测数据,而本文是基于分段单值作物系数计算出的河北省 K_c 理论均值,体现了空间差异和研究方法差异。③棉花 K_c 在 $[0.30, 1.29]$ 之间,初期 K_c 较小,随着作物的生长,作物叶面积快速增大,需水量增大, K_c 迅速上升;后期作物生长较缓慢,蒸散量较少, K_c 迅速减小。由于表 4 显示的是多个站点的多年平均值,因此引入 K_c 的方差 V_{AR} ,方差越大,说明 K_c 与平均值偏离程度越大。由表 4 可知,冬小麦和棉花生育中期 K_c 与平均值偏离程度最大,说明各站点差值较大,而夏玉米各站点 K_c 在初始生长期差值最大。整体来看,3 种 K_c 有所差异,取值范围较为接近,且均在生育中期达到最大值。

2.2 作物系数空间变化特征分析

2.2.1 全生育期变化特征分析

图 3 为 3 种作物近 60 年全生育期平均 K_c 空间变化,冬小麦 K_c 和夏玉米 K_c 均整体以邢台为中心向四周逐渐增大;棉花 K_c 由西向东逐渐增大,且空间差异较小。陈玉民等^[23] 的研究结论中,保定和邢台冬小麦平均 K_c 与本文结果一致,而石家庄 K_c 与本文结果差异较大;保定夏玉米 K_c 与本文结果一致;保定、邢台和邯郸棉花 K_c 与本文结果较一致。整体来看,3 种作物的 K_c 均是东部高于西部,且低值区集中在河北省南部。

2.2.2 不同生育期变化特征分析

不同生育期冬小麦 K_c 空间变化如图 4 所示。初始生长期高值区集中在沿海地区,其中秦皇岛 K_c 最大,为 0.62,低值区集中在邢台和南宫;冻融期和越冬期作物基本处于停滞生长状态,故各站点 K_c 值均为 0.40;快速发育期 K_c 平均值为 1.17;生育中期 K_c 平均值为 1.29,霸州、乐亭等 6 个站点大于 1.29;成熟期 K_c 平均值为 1.05,遵化、青龙等 5 个站点达到 1.05。除了冻融期和越冬期,冬小麦不同生育期 K_c 大致呈东部大于西部的空间分布特征。

不同生育期夏玉米 K_c 空间变化见图 5。初始生长期邯郸 K_c 值最大,为 0.55,南宫 K_c 值最小,为 0.42,平均值为 0.49;快速发育期 K_c 平均值为 1.15;生育中期 K_c 平均值为 1.24,霸州、保定等 6 个站点超出平均值;成熟期 K_c 平均值为 0.56,邯郸、霸州等 6 个站点在平均值以上。除了初始生长期,其他 3 个生育期夏玉米 K_c 在空间上均呈自东向西逐渐减小的变化趋势,并且较低值大致集中在邢台一带。

不同生育期棉花 K_c 空间变化如图 6 所示。初始生长期石家庄、邢台以及南宫 K_c 值最大,为 0.33,邯

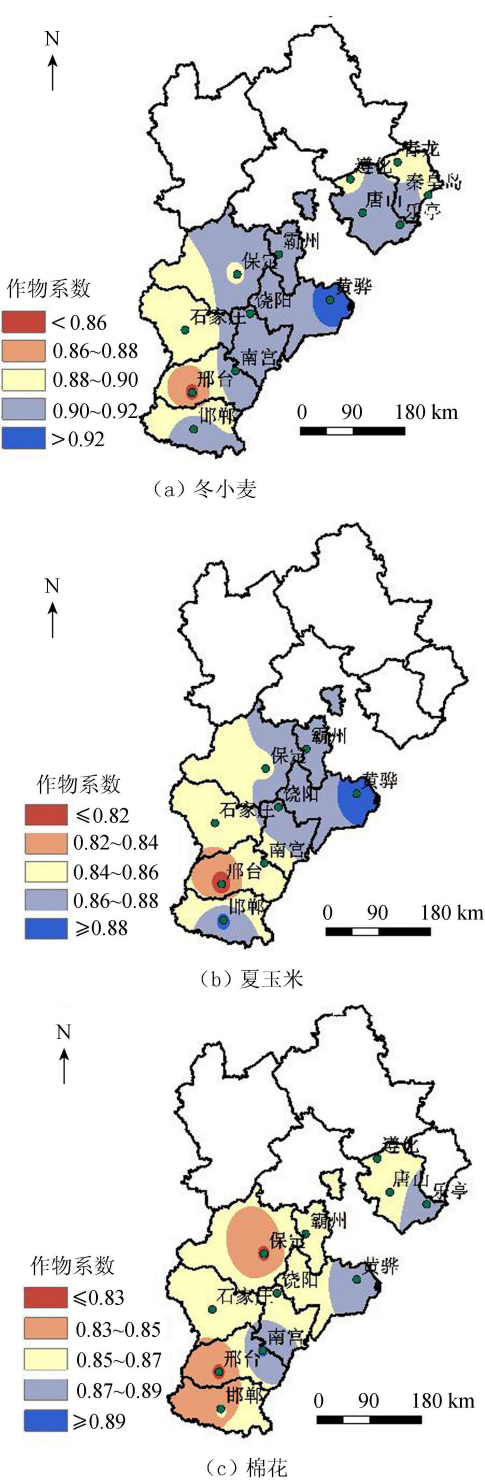


图 3 全生育期 3 种主要作物系数空间分布

郸等 3 个站点 K_c 值最小,为 0.28,平均值为 0.30;快速发育期 K_c 平均值为 1.20;生育中期 K_c 在 1.17 ~ 1.35 之间,差值较大,平均值为 1.29;成熟期 K_c 平均值为 0.66,南宫、黄骅等 7 个站点在平均值以上。除了初始生长期,其他 3 个生育期 K_c 大致呈东部大于西部的空间分布特征,这与冬小麦较一致。

综上所述,3 种 K_c 空间差异特征明显,而河北省降水量和水资源量空间分布不均,最终导致作物缺水空间差异较大,故在缺少作物系数基站实测

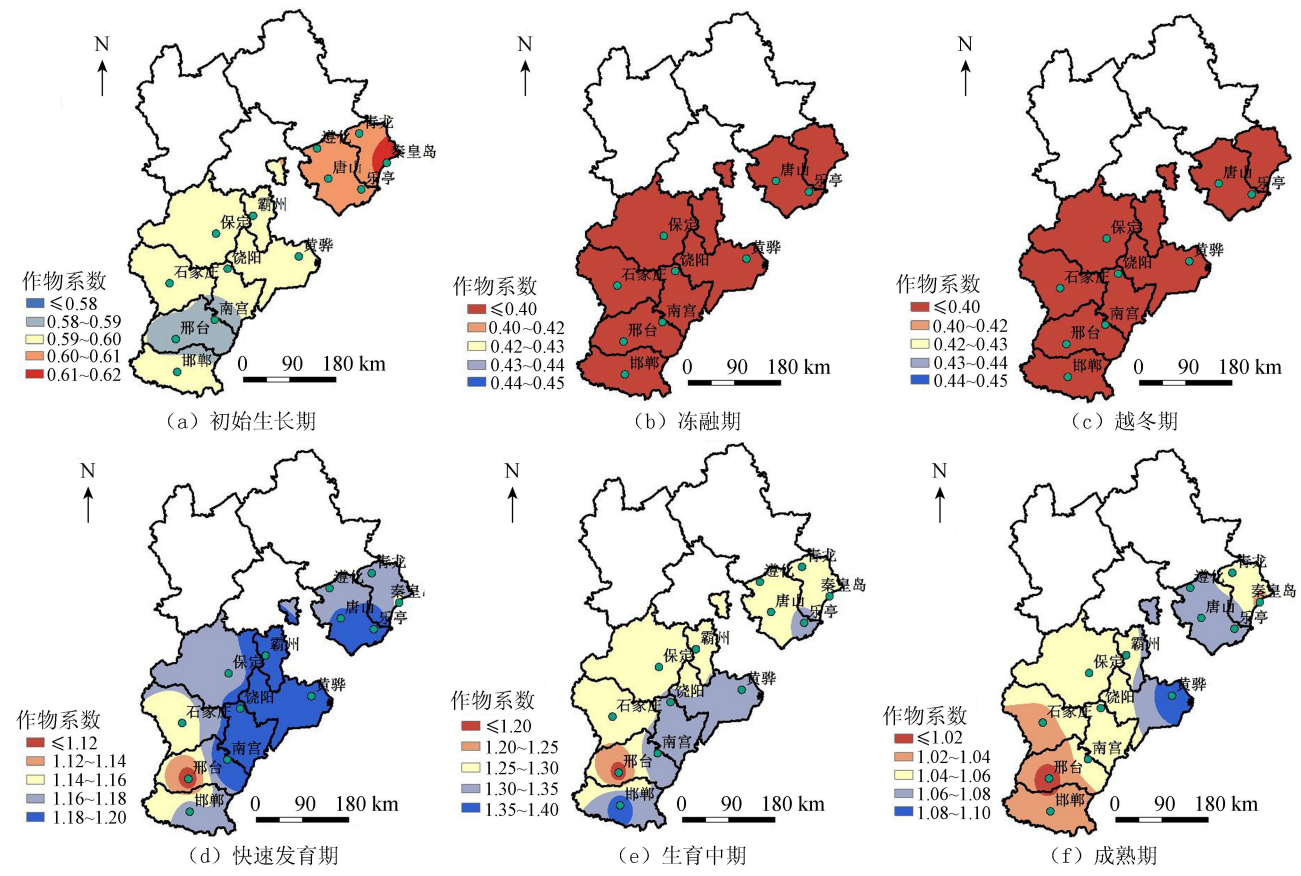


图4 不同生育期内冬小麦作物系数空间分布

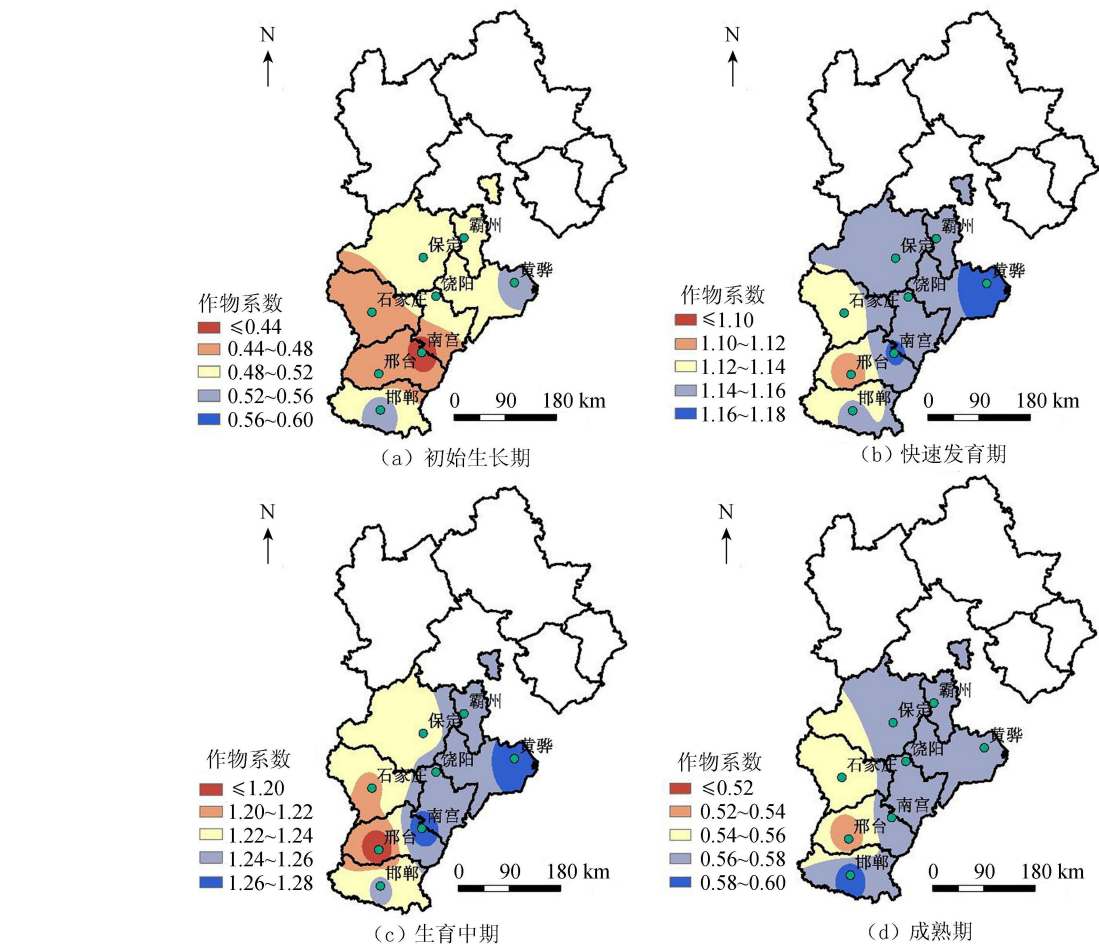


图5 不同生育期内夏玉米作物系数空间分布

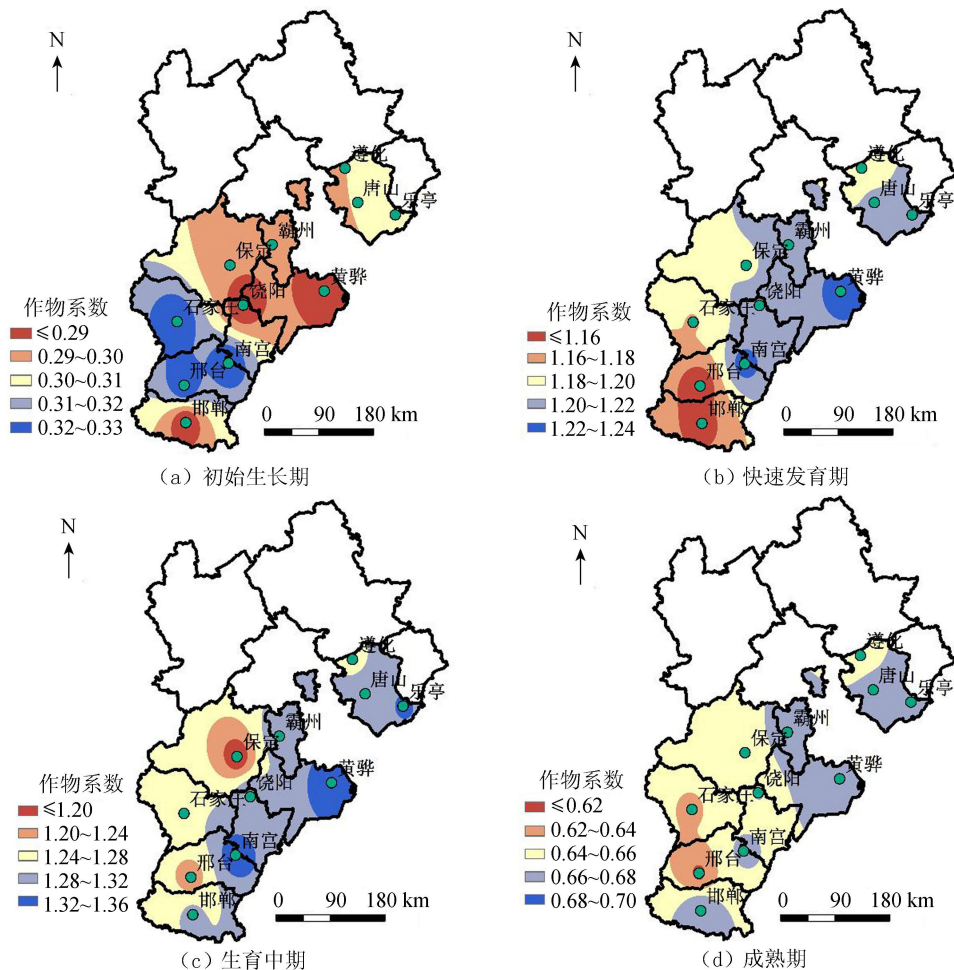


图6 不同生育期内棉花作物系数空间分布

值的情况下,可考虑将本文 K_c 计算结果推广到当地,以降低仅利用单站试验结果的计算误差。另外,农作物所含虚拟水量较多,为缓解缺水形势,河北省可在保证粮食安全的前提下,使水资源丰富地区种植单位质量虚拟水含量高的农产品,水资源匮乏区域种植单位质量虚拟水含量低且效益较高的农产品。

2.3 对作物系数可能产生影响的关键气候因子辨识
为探讨气候因素与 K_c 的相关性,计算 K_c 与气候因素之间的相关系数。由于3种作物的初始生长期和冬小麦的越冬期和冻融期 K_c 基本不变,故仅对全生育期、快速发育期、生育中期和成熟期进行分析。

冬小麦(表5)全生育期 K_c 与风速 u 和降水量 P 的相关系数较大,与 u 呈显著正相关,与 P 呈显著负相关;最高气温 $T_{\max}$ 仅与快速发育期 K_c 呈较显著正相关; u 和日照时数 N 与生育期 K_c 相关性显著。夏玉米(表6)全生育期 K_c 与最低气温 $T_{\min}$ 以及 $T_{\max}$ 、 u 和 N 相关系数较大,且较为显著; u 与快速发育期和生育中期 K_c 存在较显著的正相关。棉花(表7)全生育期 K_c 与最低气温 $T_{\min}$ 呈较显著负相关,而与 u 呈较显著正相关。各生育期 K_c 与 N 均呈显著正相关,且相关系数在快速发育期高达

表5 冬小麦作物系数与各气候要素的相关系数

气候要素	不同时期的冬小麦作物系数与气候要素的相关系数			
	全生育期	快速发育期	生育中期	成熟期
$T_{\max}$	-0.254	0.471 **	0.239	-0.013
$T_{\min}$	-0.121	-0.238	-0.125	-0.144
RH	0.148	-0.152	0.210	-0.288 *
u	0.480 **	0.804 **	0.473 **	0.600 **
N	0.004	0.504 **	0.395 **	0.223 *
P	-0.330 *	0.010	-0.175	0.043

注:*/** 分别表示在0.05/0.01水平(双侧)上显著相关,下同。

表6 夏玉米作物系数与各气候要素的相关系数

气候要素	不同时期的夏玉米作物系数与气候要素的相关系数			
	全生育期	快速发育期	生育中期	成熟期
$T_{\max}$	0.615 **	0.540 **	-0.115	0.335 *
$T_{\min}$	-0.272 *	0.048	-0.571 **	-0.253
RH	-0.124	-0.377 **	-0.328 *	-0.182
u	0.415 **	0.708 *	0.445 **	0.075
N	0.387 **	0.555 **	0.281 *	0.799 **
P	-0.036	-0.171	-0.059	-0.255 *

0.902; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 仅与成熟期 K_c 相关性显著。整体来看, u 和 N 是引起3种 K_c 变化的主要因素, $T_{\max}$ 和相对湿度 RH 是影响夏玉米 K_c 的次要因素, $T_{\min}$

表 7 棉花作物系数与各气候要素的相关系数

气候要素	不同时期的棉花作物系数与气候要素的相关系数			
	全生育期	快速发育期	生育中期	成熟期
$T_{\max}$	0.114	-0.130	0.046	0.276 *
$T_{\min}$	-0.310 *	-0.227	0.011	-0.396 **
RH	0.152	0.137	0.253	-0.232
u	0.329 *	0.378 **	0.531 **	0.174
N	0.059	0.902 **	0.334 *	0.538 **
P	-0.045	-0.584 **	-0.142	-0.188

是影响棉花 K_c 的次要因素。

考虑到各地区 K_c 影响因素有所差异,将河北省各站点气候要素与 3 种作物全生育期 K_c 做偏相关分析(表略)。结果发现:除了霸州和唐山, u 与各地区冬小麦 K_c 相关性均较强, RH 仅与石家庄相关性较强,而与 N 相关性较强的主要集中山前平原区。夏玉米有所不同, u 是影响 K_c 的最主要因素;除了南宫, $T_{\max}$ 对各地区 K_c 影响较大。 u 是影响河北省棉花 K_c 的最主要因素,受 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 影响较大的分别集中在河北省南部和东北部沿海地区。

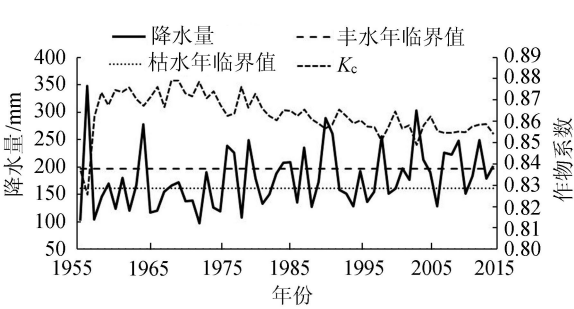
相关研究表明近 50 年河北省风速和日照时数整体上均存在下降趋势^[24-25],而本文中的 3 种 K_c 均呈不显著下降趋势,说明风速和日照时数与 K_c 确实存在一定的正相关关系。另外,作物品种和灌溉方式的不同也会影响 K_c ,有研究表明降雨和灌溉对 K_c 影响较大,尤其在作物植株较小的前期阶段,同时土壤含水量变化、盖度和叶面积指数也是影响 K_c 的重要因素^[26]。

2.4 作物系数与降水年型关系探讨

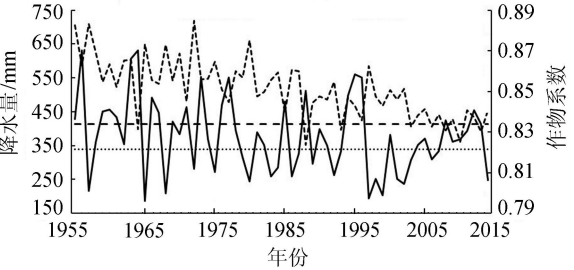
为探讨冬小麦、夏玉米和棉花 K_c 与降水年型是否有关,首先对 1955—2014 年 3 种作物生长季降水量进行计算,并采用张北赢等^[27]的研究方法划分水文年型,结果如图 7 所示。从冬小麦 K_c 与水文年型变化关系可知,丰水年 K_c 偏低,而平、枯水年 K_c 相差不大。夏玉米 K_c 与降水量呈显著反向变化,丰水年 K_c 偏低,枯水年 K_c 偏高。棉花 K_c 随降水量也呈反向变化,丰水年与枯水年 K_c 相差较大,而平水年与丰、枯水年相差较小。整体来看,3 种 K_c 与降水年型呈负相关。

3 结 论

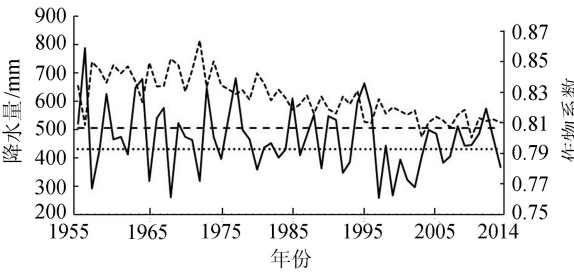
a. 时间上,全生育期内,冬小麦、夏玉米和棉花在 1995—2014 年际间平均 K_c 分别为 0.86、0.85 和 0.83,均呈不显著下降的变化趋势;3 种作物的 K_c 最大值均出现在 1970 年左右,且在临界范围内均无突变点。不同生育期内,冬小麦、夏玉米和棉花 K_c 分别在[0.40,1.29]、[0.49,1.24]、[0.30,1.29]区间内变化,且均在生育中期达到最大。



(a) 冬小麦



(b) 夏玉米



(c) 棉花

图 7 作物系数与同期降水量年际变化

b. 空间上,全生育期内,冬小麦和夏玉米 K_c 空间分布较一致,均呈以邢台为中心向四周逐渐增大的空间分布特征;棉花呈从西向东逐渐增大的空间分布特征,且空间差异不明显。不同生育期内,除了冻融期和越冬期,冬小麦不同生育期 K_c 大致呈东部大于西部的空间分布特征;夏玉米不同生育期 K_c 低值区大致集中在邢台一带,并由邢台向周围逐渐增大;除了初始生长期,棉花各生育期 K_c 也大致呈东部大于西部的空间分布特征。

c. 从整体来看,风速和日照时数的降低在一定程度上引起了冬小麦、夏玉米和棉花 K_c 的减小,同时最高气温与夏玉米 K_c 存在显著正相关,最低气温与棉花 K_c 存在较显著负相关。3 种作物的 K_c 与降水年型均呈负相关,但负相关程度有所差异。

参考文献:

[1] 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.
[2] 马磊. 河北省地下水超采综合治理实践及启示[J]. 中国水利, 2017 (7): 51-54. (MA Lei. Comprehensive management for groundwater over-exploitation in Hebei Province[J]. China Water Resources, 2017 (7): 51-54. (in Chinese))

- [3] 户艳领,陈志国,刘振国. 基于熵值法的河北省农业用水利用效率研究[J]. 中国农业资源与区划,2015(3): 136-142. (HU Yanling, CHEN Zhiguo, LIU Zhenguo. Study of the utilization efficiency of water resources in Hebei Province based on the entropy method[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015(3):136-142. (in Chinese))
- [4] 盖东海. 河北省水资源可持续利用研究[D]. 保定:河北农业大学,2012.
- [5] 刘志国. 河北平原地下水资源可持续利用研究[D]. 沈阳:东北大学,2007.
- [6] SAMMIS T W, MAPEL C L, LUGG D G, et al. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days [J]. Transactions of the ASAE, 1985,28(3):773-780.
- [7] STEGMAN E C. Corn crop curve comparisons for the Central and Northern Plains of the U. S [J]. Applied Engineering in Agriculture,1988,4(3):226-233.
- [8] STEELE D D, SAJID A H, PRUNTY L D. New corn evapotranspiration crop curves for southeastern North Dakota [J]. Transactions of the Asae,1996,39(3):931-936.
- [9] ITENFISU D, ELLIOTT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering,2003,129(6):440-448.
- [10] 刘国水. 作物蒸散量测定与计算方法研究[D]. 保定:河北农业大学,2008.
- [11] 左余宝,田昌玉,唐继伟,等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. 中国农业气象,2009,30(1):70-73. (ZUO Yubao, TIAN Changyu, TANG Jiwei, et al. Study on ET_c and K_c of main crop in Northern Shandong Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2009,30(1):70-73. (in Chinese))
- [12] 马建琴,李鹏飞,刘蕾. 河南地区夏玉米作物系数试验研究[J]. 节水灌溉,2016(4):24-27. (MA Jianqin, LI Pengfei, LIU Lei. An experimental study on crop coefficient of summer maize in Henan Province[J]. Water Saving Irrigation,2016(4):24-27. (in Chinese))
- [13] 高晓丽,徐俊增,杨士红,等. 贵州地区主要作物需水规律与作物系数的研究[J]. 中国农村水利水电,2015(1):11-14. (GAO Xiaoli, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Water requirement pattern and crop coefficient of main crops in Guizhou Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1):11-14. (in Chinese))
- [14] 韩淑敏,程一松,胡春胜. 太行山山前平原作物系数与降水年型关系探讨[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):152-158. (HAN Shumin, CHENG Yisong, HU Chunsheng. Relationship between crop coefficient and precipitation pattern in the piedmont of Mt. Taihang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2005,23(5):152-158. (in Chinese))
- [15] 环海军,姚丹丹,刘岩,等. 鲁中地区作物系数确定及土壤水分预报模型研究[J]. 山东农业科学,2017,49(6):143-147. (HUAN Haijun, YAO Dandan, LIU Yan, et al. Research on crop coefficient determination and soil moisture forecast models in the middle area of Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(6):143-147. (in Chinese))
- [16] 刘钰, PEREIRA 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(5):26-30. (LIU Yu, PEREIRA S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2000(5):26-30. (in Chinese))
- [17] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:13-14.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:37-38.
- [19] 曾五一. 统计学概论[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2003:189-191.
- [20] 朱明明. 河北省主要作物全生育期有效降雨量及需水规律研究[D]. 大连:辽宁师范大学,2017.
- [21] 宿梅双,李久生,饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报,2005(8):25-29. (SU Meishuang, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005(8):25-29. (in Chinese))
- [22] 赵娜娜,刘钰,蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报,2010,41(8):953-959. (ZHAO Nana, LIU Yu, CAI Jiabing. Calculation of crop coefficient and water consumption of summer maize[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8):953-959. (in Chinese))
- [23] 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,1993:19-47.
- [24] 向亮,胡波,谷永利. 1961—2010 年河北省日照变化分析[J]. 干旱区研究,2012,29(3):503-509. (XIANG Liang, HU Bo, GU Yongli. Analysis on change of sunshine duration in Hebei Province during the period from 1961 to 2010 [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3):503-509. (in Chinese))
- [25] 张素云. 近 47a 河北省风速演变特征[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
- [26] 侯琼,王英舜,杨泽龙,等. 典型草原作物系数控制因子分析[J]. 中国草地学报,2010,32(4):58-64. (HOU Qiong, WANG Yingshun, YANG Zelong, et al. Analysis of control factors of crop coefficient in typical steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(4):58-64. (in Chinese))
- [27] 张北赢,徐学选,刘文兆,等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1234-1240. (ZHANG Beiying, XU Xuexuan, LIU Wenzhao, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(6):1234-1240. (in Chinese))

(收稿日期:2018-01-25 编辑:骆超)