



太行山前平原40年冬小麦作物系数变化及影响因素研究

李昊天, 李璐, 闫宗正, 高聪帅, 韩琳娜, 张喜英

Changes in and influencing factors of crop coefficient of winter wheat during the past 40 years on the Taihang Piedmont Plain

LI Haotian, LI Lu, YAN Zongzheng, GAO Congshuai, HAN Linna, and ZHANG Xiying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210342>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北地区设施茄子蒸散量估算模型及作物系数确定

Evapotranspiration model and crop coefficient of greenhouse eggplant in North China

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1819–1827

基于基尼系数的全球重要农业文化遗产空间分布特征及其影响因素研究

Gini coefficient-based spatial distribution features of Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) and their influence factors

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(9): 1465–1474

华北平原多目标约束下冬小麦最优施氮量

Optimal nitrogen application rate for winter wheat under multi-objective constraints in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1512–1523

不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响

Annual soil salt balance and crop performance under brackish water irrigation during the winter wheat season

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 809–820

华北平原灌溉麦田水分利用效率的SEM多因素影响研究

Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 876–886

北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究

Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1413–1422



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210342

李昊天, 李璐, 闫宗正, 高聪帅, 韩琳娜, 张喜英. 太行山前平原 40 年冬小麦作物系数变化及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 747-760

LI H T, LI L, YAN Z Z, GAO C S, HAN L N, ZHANG X Y. Changes in and influencing factors of crop coefficient of winter wheat during the past 40 years on the Taihang Piedmont Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5): 747-760

太行山前平原 40 年冬小麦作物系数变化及影响因素研究*

李昊天^{1,2}, 李璐^{1,2}, 闫宗正^{1,2}, 高聪帅^{1,2}, 韩琳娜³, 张喜英^{1,2**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北省水利工程局 石家庄 050021)

摘要:作物系数是计算作物需水量的基本参数,准确确定作物系数在优化灌溉管理方面具有重要作用。作物系数随作物生长及环境条件发生变化,研究作物系数如何受生产条件和气象条件变化的影响,可为准确确定作物系数提供依据。本研究基于中国科学院栾城农业生态系统试验站 1980—2020 年 40 余年间冬小麦在充分灌溉条件下的实际蒸散量,研究冬小麦作物系数的变化规律;并利用最近 3 年的试验数据,明确现代生产水平下影响冬小麦作物系数的主导因素。结果表明,1980—2020 年间冬小麦在充分供水条件下的实际蒸散量及参考作物蒸散量多年平均值分别为 434.7 mm 和 550.8 mm,参考作物蒸散量年际相对稳定,冬小麦实际蒸散量增加 17.6%。作物系数多年平均值为 0.80,其中 1980—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2020 年平均分别为 0.76、0.80、0.81 和 0.84;40 年间冬小麦产量增加 42.4%,作物系数增加 11.6%,作物产量提升是作物系数升高的主要原因。本研究表明在现状生产条件下,叶面积指数、生物量是影响作物系数的重要因素,在叶面积指数较高的情况下作物系数主要受饱和水汽压差及环境温度的影响,2017—2020 年冬小麦 3 个生育期作物系数分别是 0.79、0.86 和 0.79;生育期蒸散量均值为 442.3 mm,主要生育期 3 年平均作物系数分别为播种—越冬前 0.70、越冬期间 0.42、返青—拔节期 0.76、拔节—抽穗期 1.18、抽穗—灌浆期 1.39、成熟期 0.96。本研究结果显示作物系数并不是稳定不变的,而是受作物生产力和大气蒸散力的影响。因此,在利用作物系数和参考作物蒸散量评价作物需水量时,需要综合考虑上述因素。

关键词:太行山前平原;冬小麦;蒸散量;作物系数;作物生产力;气象因子

中图分类号: S512.11

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Changes in and influencing factors of crop coefficient of winter wheat during the past 40 years on the Taihang Piedmont Plain*

LI Haotian^{1,2}, LI Lu^{1,2}, YAN Zongzheng^{1,2}, GAO Congshuai^{1,2}, HAN Linna³, ZHANG Xiyong^{1,2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-Saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hebei Water Conservancy Engineering Bureau, Shijiazhuang 050021, China)

* 国家重点研发计划项目(2017YFE0130500)、河北省创新团体项目(D2021503001)和国网河北省电力有限公司项目(SGHEYX00SCJS2100077)资助

** 通信作者: 张喜英,主要从事农田节水机理与技术研究。E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn

李昊天,主要从事农田节水机理与技术研究。E-mail: lihaotian19@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2021-06-02 接受日期: 2021-07-29

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFE0130500), Hebei Innovation Group Project (D2021503001), and the Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (SGHEYX00SCJS2100077).

** Corresponding author, E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn

Received Jun. 2, 2021; accepted Jul. 29, 2021

Abstract: The crop coefficient (K_c) is defined as actual evapotranspiration (ET) under sufficient water supply divided by the reference crop ET (ET_0), which can be calculated using meteorological factors. The K_c is used as a basic parameter to calculate the crop water requirements. The accurate determination of K_c plays an important role in optimizing irrigation management. The K_c changes with crop growth and environmental conditions. The purpose of this study was to assess how K_c varied with crop production and weather conditions by using a long-term field experiment of field management measures of winter wheat. The actual ET of winter wheat under sufficient irrigation and ET_0 derived from daily meteorological parameters at Luancheng Agro-ecosystem Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences from 1980 to 2020 were used to calculate the seasonal K_c . Additionally, the dominant factors affecting the K_c of winter wheat under the current production conditions were identified from experimental data of three recent years (2017–2020). The results showed that for winter wheat with sufficient water supply from 1980 to 2020, the average ET and ET_0 were 434.7 mm and 550.8 mm, respectively. The ET_0 was relatively stable, and the ET increased by 17.6%. The average K_c was 0.80 during the past four decades, with an average value of 0.76 in 1980–1990, 0.80 in 1991–2000, 0.81 in 2001–2010, and 0.84 in 2011–2020, indicating a continuously increasing trend. In the past four decades, the yield of winter wheat had increased by 42.4%, and K_c had increased by 11.6%. The increase in ET was the main reason for the increase in K_c . The ET during the past four decades increased with increasing crop production, and with a relatively stable ET_0 , the K_c increased. Therefore, the K_c varied with changes in crop grain production, which was related to biomass production and canopy size. Under the current growing conditions, leaf area index and biomass were important factors that affected K_c . When the leaf area index reached a certain level, K_c was mainly affected by the atmospheric evaporation potential determined by the saturated water vapor pressure difference and atmospheric temperature. The K_c during the recent three years was 0.79 for 2017–2018, 0.86 for 2018–2019, and 0.79 for 2019–2020. The average ET was 442.3 mm during the three years, and the average K_c at different growing stages of winter wheat were 0.70 from sowing to winter dormancy, 0.42 during winter dormancy, 0.76 from recovery to jointing, 1.18 from jointing to heading, 1.39 during heading to grain-fill, and 0.96 during maturity. Thus, the water requirements for winter wheat after winter dormancy increased sharply and reached the highest values during the heading to earlier grain-filling stages. The results from this study indicate that K_c varies with changes in the crop growing conditions and should not be taken as a constant value. K_c developed during three recent seasons in this study could be used to determine the crop water requirements for irrigation scheduling under the current growing conditions.

Keywords: Taihang Piedmont Plain; Winter wheat; Evapotranspiration; Crop coefficient; Crop productivity; Meteorological factor

淡水资源匮乏是全球农业生产面临的重大问题,随着气候变化带来的干旱发生频率和严重程度的增加^[1],优化农田水分管理,提升水资源利用效率显得尤为重要。太行山前平原是中国华北平原冬小麦(*Triticum aestivum* L.)产区的重要组成部分^[2]。然而,由于冬小麦生育期降雨无法满足作物需水要求,一般生育期需要灌水 2~4 次,依赖于抽取地下水的灌溉造成地下水位显著降低,威胁到了区域灌溉农业的可持续发展^[3]。因此,合理确定作物需水量,实行限水灌溉对于保护太行山前平原地下水资源具有重要意义^[4]。

作物系数(K_c)定义为作物的实际蒸散量(ET)与参考作物蒸散量(ET_0)比值,常用于估算作物需水量,该系数在农田水分管理中发挥着重要作用。作物系数受土壤、气候、作物生长状况及农业管理方式等因素影响,需通过相应实地数据进行计算^[5]。蒸发造成的土壤表面水分损失和作物叶面蒸腾造成的水分损失合称为蒸散发,是水循环过程中一个重要的通量参数,也是灌溉水消耗的重要组成部分^[6]。作物系数在作物生育期的变化反映了作物在整个生长季耗水的变化规律,可以根据作物系数变化曲线对蒸散量进行估算^[7]。当前对于作物实际蒸散量的研

究,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^[8-12]。综合考虑更多的土壤类型及作物水分应用特征,联合国粮农组织(FAO)也扩大了对作物各生育期作物系数的估算方案^[13]。陈玉民^[14]提出尽管不同生育阶段作物系数年际间不稳定,但全生育期的作物系数年际间较为稳定,同时存在一定的地域性特征。然而近年来的研究表明作物系数随时间尺度改变,例如曹永强等^[15]提出河北省 1955—2014 年冬小麦作物系数呈不显著下降趋势。李波等^[16]研究发现近 70 年东北地区春玉米(*Zea mays* L.)全生育期作物系数年际变化呈显著下降趋势。空间尺度上,关于作物系数的变化规律研究近年来逐渐增多,且多集中在省域尺度^[17-18]。上述实例表明作物系数在时间及空间尺度上存在差异,需结合实际情况进行具体计算。宋妮等^[19]证明实测方法是获取作物系数最可靠的途径,但实测资料的地区分布和时间系列均十分有限,实际研究中需要通过基于有限实测资料空间上的插补和系列上的延长以估算作物系数。以往研究对于长周期产量变化对作物系数影响的关注度不足,针对华北平原温带季风气候区的作物系数研究资料也较少。

作物产量通过育种和田间管理措施的改进逐渐增加,由此带来的需水量提升会对作物系数产生重要影响,例如 Zhang 等^[20]发现,1979—2009 年华北平原作物产量提高 50%,而年均作物蒸散量仅略有增加。作物系数也受到气候因素影响,各气象因子贡献值变化同样会改变作物系数^[21]。联合国粮农组织作物需水量计算指南(FAO-56)中所提出的作物系数计算方法,需要满足标准气候(日间平均相对湿度 45%,平均风速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,半湿润性气候)下无水分胁迫、田间管理水平高的条件^[6]。然而,实际生产中作物种植密度、土壤质地及盐分含量、品种更新等因素往往会对作物系数产生影响。此外,以往研究中所采用的气象及产量数据多为地方气象站及相关部门公开数据,缺少特定区域长周期田间气象、产量变化数据。作物品种、养分投入、耕作措施等田间管理措施随着生产条件的改变而改变,对作物生产、产量、耗水等产生影响而影响作物系数。

本研究基于中国科学院栾城农业生态系统试验站冬小麦长期定位灌溉试验,通过长期气象及产量数据,计算并分析 1980—2020 年充分供水条件下作物系数变化规律及影响因素。同时基于该站 2017—2020 年现状生产条件下冬小麦生长季试验数据,分析各生育期作物系数的主要影响因素,为确定

冬小麦作物系数和制定合理灌溉制度提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

田间试验研究在中国科学院栾城农业生态系统试验站($37^{\circ}50'N$, $114^{\circ}40'E$,海拔高度 50.1 m)进行。试验站位于太行山前平原,属于暖温带半湿润半干旱季风气候区,光热资源丰富。作物种植模式为冬小麦和夏玉米一年两熟,其中冬小麦一般于 10 月初播种,苗期从 10 月中旬持续至 11 月底,12 月至次年 2 月为越冬期,3 月初进入返青期,拔节期于 4 月初开始,抽穗期发生在 4 月底,扬花灌浆期从 5 月初至 5 月下旬,成熟期通常在 5 月底至 6 月 10 日左右。冬小麦收获后立即播种夏玉米并于当年 9 月底收获。1980—2020 年试验站多年平均降水量为 480 mm。受季风气候影响,华北地区约 70% 的降水量集中于每年的 7—8 月份即夏玉米生长季,而冬小麦整个生长季需水量在 450 mm 左右,而同期多年平均降水量为 115 mm 左右,灌溉补水是本地区保证冬小麦稳产高产的重要措施^[22]。试验地点 2 m 土壤剖面土壤物理特征如表 1 所示。0~90 cm 土层主要为壤土,90 cm 以下土壤为黏壤土。0~2 m 土壤剖面平均田间持水量为 35.6% (体积含水率, $v\cdot v^{-1}$),凋萎系数为 13.1% (体积含水率, $v\cdot v^{-1}$),pH 为 8。

表 1 试验地点不同层次土壤物理特征
Table 1 Soil physical characteristics at different soil layers for the experimental site

深度 Depth (cm)	土壤质地 Texture	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持水量 Field capacity (%)	凋萎系数 Wilting point (%)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
0~20	沙壤土 Sand loam	1.41	36.1	9.6	1.090
20~35	沙壤土 Sand loam	1.51	35.0	11.4	0.434
35~65	轻壤土 Light loam	1.47	33.4	13.9	0.730
65~90	中壤土 Middle loam	1.51	34.2	13.9	0.713
90~145	砂质黏壤土 Sandy clay loam	1.54	34.7	12.9	0.020
145~170	黏壤土 Clay loam	1.64	39.3	13.9	0.003
170~200	砂质黏壤土 Sandy clay loam	1.59	38.5	16.4	0.016

定点试验田管理措施与当地农田相同。1980—2020 年期间冬小麦管理中的具体秸秆处理、耕作、化肥施用和品种变化如表 2 所示。每季冬小麦播种前,将全部磷肥和钾肥及总量 1/4 的氮肥作为基肥撒施于土壤表层。翻耕整地后播种小麦,播量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,行距为“4 密 1 稀”播种方式,平均行距 15 cm。其余氮肥分为等量两部分,在冬小麦拔节期及夏玉米大喇叭口期施入农田。

本研究所用数据来源于中国科学院栾城农业生态系统试验站的一个长期灌溉定位试验,该试验包

括冬小麦和夏玉米各生育期从不灌水到灌水 5 次的 6 个处理,每个处理 4 次重复。试验小区随机排列,每个小区面积 $5\text{ m}\times 9\text{ m}$ 。各小区之间及试验地周边用 2 m 宽的保护行隔开,保护行不灌水,减少相邻小区之间水分影响。灌溉水来源于地下水,通过低压管道输送到小区,用水表计量每个小区的灌水情况。由于每个生育期降水条件的差异,故采用 6 个处理中获得最高产量的灌溉处理作为满足作物需水要求的处理(生育期灌溉 5 水,共计 360 mm),进行作物系数的计算。所选处理冬小麦各关键生育期灌溉量分

表 2 试验地点冬小麦田间管理措施变化(1980—2020年)
Table 2 Field management measures for the experimental plot during 1980–2020 for winter wheat

时期 Period	栽培品种 Cultivar	年总施肥量 ¹⁾ Annual fertilizer managements	耕作与秸秆处理 Tillage and straw management
1980—1990	‘冀麦22’ ‘Jimai 22’	N 150~200 kg·hm ⁻² ; P ₂ O ₅ 80~100 kg·hm ⁻²	小麦和玉米秸秆在人工收获后移除,通过安装于拖拉机上的犁在冬小麦播种前进行翻耕。 Straw of wheat and maize was removed from the field manually, soil was ploughed using a plough mounted on a tractor before sowing wheat.
1991—1998	‘冀麦24’ ‘Jimai 24’	N 250~300 kg·hm ⁻² ; P ₂ O ₅ 100~150 kg·hm ⁻²	联合收割机收获冬小麦并将秸秆覆盖于田间,夏玉米秸秆于冬小麦播种前人工清除。耕作方式不变。 Wheat was harvested by combine and wheat straw was left in the field as mulch, straw of summer maize was manually removed before winter wheat sowing. The farming method unchanged.
1998—2003	‘石4185’ ‘Shi 4185’	N 300~350 kg·hm ⁻² ; P ₂ O ₅ 130~170 kg·hm ⁻² ; K ₂ O 20 kg·hm ⁻²	两种作物全部实行秸秆还田,其中玉米秸秆机械粉碎后,于冬小麦播种前旋耕与上层土壤混合。耕种方式不变。 Straws of winter wheat and summer maize were both returned to the field, with winter wheat straw left on the soil surface after harvesting. Maize straw was cut into small pieces after maize harvesting. Before sowing winter wheat, rotary tillage was applied twice to mix the straw with the top soil layer. Other farming practices unchanged.
2004—2009	‘7221’和‘科农199’ ‘7221’ and ‘Kenong199’	N 300~350 kg·hm ⁻² ; P ₂ O ₅ 150~180 kg·hm ⁻² ; K ₂ O 20 kg·hm ⁻²	秸秆处理方式不变。使用新式旋耕法逐渐代替传统耕作法。每隔2~3年深耕一次。 The same straw and tillage management as above, with deep plough added every 2–3 years.
2009—2020	‘科农199’和‘石新633’ ‘Kenong199’ and ‘Shixin633’	N 400~425 kg·hm ⁻² ; P ₂ O ₅ 180~200 kg·hm ⁻² ; K ₂ O 90 kg·hm ⁻²	秸秆处理和耕作方式同上。 The same straw and tillage management as above.

1)年总施肥量是小麦、玉米一年两季的用量。其中N通过尿素施入, N含量约为46%; P₂O₅采用磷酸二铵, 含P₂O₅ 46%, N 16%; K₂O采用氯化钾, 含K₂O 62%。1/4的尿素、全部磷酸二铵和氯化钾在冬小麦耕种前施入, 剩余的尿素在冬小麦拔节和玉米大喇叭口等量追肥施入。The annual fertilizer application was the total amount of fertilizers applied to both winter wheat and summer maize. N fertilizer was urea containing 46% N; P₂O₅ fertilizer was diammonium phosphate containing 46% P₂O₅ and 16% N; and K₂O fertilizer was potassium chloride containing 62% K₂O. One-fourth of urea, all diammonium phosphate and potassium chloride were applied before tillage at sowing winter wheat. All the other urea was divided equally applied to winter wheat at jointing stage and summer maize at 9th leaf stage.

别为越冬前 80 mm、拔节期 90 mm、孕穗期 60 mm、开花期 70 mm 以及灌浆期 60 mm, 生育期累计灌水量 360 mm, 基本弥补了本地区冬小麦生长季降水量不足的情况。

1.2 气象因子和参考作物蒸散量计算

利用距离中国科学院栾城农业生态系统试验站约 50 m 的标准气象站, 获取逐日最高及最低温度、相对湿度、降雨量、风速、饱和水汽压差等气象因子。气象观测资料通过王鹏涛等^[23]提出的方法进行处理及订正, 采用 5 年滑动平均值对气象数据年际变化情况进行分析。利用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 方程计算参考作物蒸散量 (ET₀)。参考作物定义为面积大、高度均匀、生长旺盛、完全遮蔽地面且供水充分的绿色草地 (反射率为 0.23, 高度为 0.12 m, 表面空气阻力为 70 s·m⁻¹)^[6]。具体计算公式为:

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

式中: ET₀ 为参照作物蒸散量 (mm·d⁻¹), R_n 代表作物表面上的净辐射 (MJ·m⁻²·d⁻¹), G 为土壤热通量 (MJ·m⁻²·d⁻¹), T 是 2 m 高处日平均气温 (°C), u₂ 代表 2 m 高处的平均风速 (m·s⁻¹), e_s 为饱和水汽压 (kPa),

e_a 为实际水汽压 (kPa), Δ 代表饱和水汽压曲线的斜率 (kPa·°C⁻¹), γ 是湿度计常数。

1.3 土壤含水率

从试验开始, 每个冬小麦生长季采用土钻取土法, 于播种前、收获后及其他主要生长阶段以每 20 cm 为一层。测定 0~2 m 土壤含水率, 样品称重后放入铝盒中置于烘箱, 105 °C 烘干 12 h 后称取干重, 通过重量变化求得土壤重量含水率, 利用每层容重数据, 计算体积含水率。

从 1986 年开始, 在每个小区安装深度 2 m 的铝管, 用中子仪每周测定 0~2 m 土壤剖面体积含水率 (从 1986—2010 年, 用 IH-II, Cambridge, UK; 2011 年后利用 503DR, CPN International Inc. USA)。中子仪使用前进行了校正, 利用实际测定土壤体积含水率与中子仪测定数值建立关系。0~20 cm 上层土壤含水率利用土钻取土法获取。

2017—2020 年冬小麦生长季, 随着观测手段的进步, 每个处理选择一个小区安装智墒仪 (ET200, 东方智感科技股份有限公司, 中国), 智墒仪埋深 2 m, 以每 10 cm 为一层逐小时测定土壤体积含水率变化, 测定数据通过无线网络传输并可远程下载。

1.4 叶面积、生物量及产量测定

试验期间详细记录各生长季冬小麦播种时间、

主要生育期及收获时间。各小区单独收获,使用脱粒机脱粒并风干称重确定籽粒产量(籽粒含水量13%)。收获之前测定植株密度,每小区选取80~100穗测定生物量、粒重,获得收获指数。利用收获指数和小区籽粒产量,获得生物产量。2017—2020年冬小麦3个生育期于越冬前期、返青期、拔节期及杨花期在每个小区分别随机选取冬小麦80茎,利用台式叶面积仪(Li-3100C, LI-COR, USA)进行叶面积测定,叶面积指数(LAI)通过密度进行计算。将植株烘干称重以测定干物质量,结合密度计算单位面积生物量。冬小麦成熟时,随机选取80~100穗进行考种,获取收获指数、穗粒数及粒重。

1.5 气象因子与参考作物蒸散量相关性

关于气象因子对参考作物蒸散量的扰动情况,通常采用McCuen^[24]提出的敏感系数(S_{v_i})法进行分析。具体计算方法为:

$$S_{v_i} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0}{\Delta v_i} \times \frac{ET_0}{v_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial v_i} \times \frac{v_i}{ET_0} \quad (2)$$

式中: v_i 代表某一类型的气象因子, S_{v_i} 代表相应气象因子的敏感系数。将气象因子对 ET_0 的变化无量纲化,使得比较 ET_0 对单个气象因子的敏感性变得简单可行^[25]。敏感系数为正表明气候因子与 ET_0 呈正相关,敏感系数为负则表明气候因子与 ET_0 呈负相关。敏感系数绝对值越大,表明响应气候因子对 ET_0 的影响也越大^[26]。

采用Yin等^[27]提出的气象因子对参考作物蒸散量变化的贡献量(G_{v_i})的计算方法(公式3),即气候因子相对变化量与敏感系数乘积:

$$G_{v_i} = \frac{\Delta v_i}{v_i} \times S_{v_i} \quad (3)$$

式中: Δv_i 为研究时期内气候因子的相对变化量, \bar{v}_i 代表气候因子平均值绝对值, S_{v_i} 是 ET_0 对单个气象因子的敏感系数。

1.6 冬小麦生育期蒸散量和作物系数计算

利用水量平衡法计算1980—2020年冬小麦生育期蒸散量(ET)和2017—2020年全生育期及不同生育阶段的蒸散量(ET):

$$ET = P + I + SWD + CR - R - D \quad (4)$$

式中: P 为降水量(mm), SWD 为0~2 m土层的生育期或阶段土壤水分消耗量(mm), CR 是土壤毛管上升至根区的水量(mm), R 为地表径流(mm), D 为根区土壤水分下渗量(mm)。由于试验地1980—2020年地下水埋深在15~40 m,故毛管上升水量 CR 可以忽略不计;小区四周均设置有保护行且起垄封闭,作物

生育期内降雨和灌水没有形成地表径流,故 R 为0。根区土壤下渗量(D)根据Zhang等^[28]提出的方法计算获取:

$$D = -k(\Delta h / \Delta z) \quad (5)$$

式中: k 是土壤导水率, Δz 是土壤深度差, Δh 为对应深度差的土壤水势差。利用非饱和土壤导水率与土壤体积分含水量的指数关系 $K = K_s \times \exp[-a(\theta_s - \theta) / (\theta_s - \theta_d)]$ 计算 K ,其中 K_s 是土壤饱和导水率, θ_s 是土壤饱和体积分含水量, θ 是土壤体积分含水量, θ_d 是残余土壤体积分含水量, a 是与土壤物理性质相关的系数,该系数根据Kendy等^[29]的结果,取值14.5。计算中利用根系层相邻两个土层的土壤体积分含水量数据,依据张喜英等^[30]建立的不同深度土壤体积分含水量与土壤基质势的关系获得土壤基质势,忽略土壤溶质势,由土壤基质势和重力势获得某一层土壤水势。

作物充分供水条件下的 $ET = K_c \times ET_0$,作物系数 $K_c = ET / ET_0$ 。该公式可用于作物整个生育期或各生育阶段的作物系数计算。

1.7 统计分析

数据分析及作图通过SPSS Version 26和Excel软件完成。相同处理多个重复取平均值,采用线性回归分析各因素间相关性。

2 结果与分析

2.1 1980—2020年气象因素及参考作物蒸散量变化

图1为1980—2020年相关气象参数及其敏感系数的变化情况。从图1可知,1980—2020年冬小麦生长季多年平均温度(T_{ave})、相对湿度(RH)、平均风速(V)、日照时数(SH)分别为7.23℃、65.91%、1.13 m·s⁻¹、1258.97 h。对比气象观测资料中最高温度(T_{max})、最低温度(T_{min})和平均温度(T_{ave})多年变化情况, T_{ave} 5年滑动平均值增长7.23%, T_{ave} 每季平均增加0.05℃, T_{max} 每季平均增加0.07℃, T_{min} 每季平均增加0.03℃,特别是近年来(2011—2020年)最高气温增加速度较快,年均增速达0.20℃,表明冬小麦生长季平均温度的升高主要是由于最高温度的上升导致;平均风速总体维持稳定,5年滑动平均值下降2.6%;而日照时数及相对湿度均显著下降,5年滑动平均值分别下降了11.4%和8.4%。

相对湿度的降低和平均温度的增加对参考作物蒸散量有正面影响,而风速和日照减少对参考作物蒸散量有负面影响^[31]。敏感系数计算结果(图1)显示,日照时数敏感系数(S_{SH})最高,平均温度(S_{AT})次之,之后是平均风速(S_{WS}),3因素的敏感系数的均值

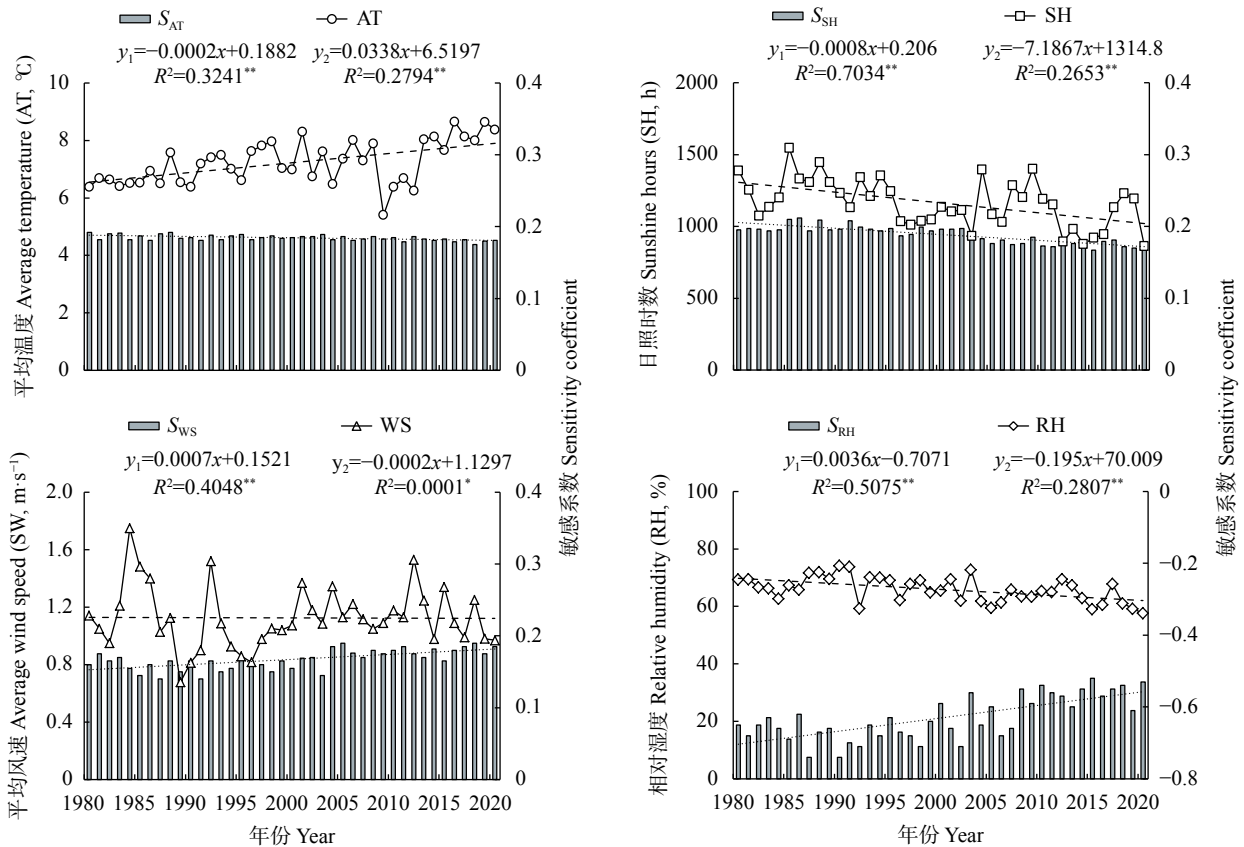


图 1 1980—2020 年冬小麦生长季气象参数及其敏感系数

Fig. 1 Changes in meteorological factors and their sensitivity coefficients during winter wheat growing seasons from 1980 to 2020

S_{AT} : 平均温度敏感系数; S_{SH} : 日照时数敏感系数; S_{WS} : 平均风速敏感系数; S_{RH} : 相对湿度敏感系数。 S_{AT} : sensitivity coefficient of average temperature; S_{SH} : sensitivity coefficient of sunshine hours; S_{WS} : sensitivity coefficient of average wind speed; S_{RH} : sensitivity coefficient of relative humidity.

为 0.16~0.18。参考作物蒸散量与相对湿度则表现为负相关,且相对湿度敏感系数 (S_{RH}) 绝对值较高,多年均值为 0.63,证明相对湿度的降低将会导致参考作物蒸散量的显著提升。

图 2 为 1980—2020 年冬小麦生育期参考作物蒸散量 (ET_0) 及降雨量的变化情况。冬小麦生长季参考作物蒸散量多年平均值为 550.8 mm,5 年滑动平均值增加 1.4%,年际间基本保持稳定 ($P=0.321$)。同期冬小麦生长季多年降水量均值为 107.4 mm,呈波动下降趋势 ($P<0.05$),40 年间 5 年滑动平均值下降 9.5%。根据韩淑敏等^[32]提出的太行山山前平原降水年型划分标准,试验区丰水年 ($P=25\%$) 冬小麦季降水量为 140 mm;平水年冬小麦季降水量 ($P=50\%$) 为 115 mm,枯水年 ($P=75\%$) 冬小麦季降水量为 105 mm,不同降雨年型对参考作物蒸散量并无显著影响。研究期内各气象因素对参考作物蒸散量的贡献值分别为平均温度 (G_{AT}) 3.86、日照时数 (G_{SH}) -6.53、平均风速 (G_{WS}) -1.89、相对湿度 (G_{RH}) 5.82,4 个因素对参考作物蒸散量贡献值总和为 1.26,与基于实测数据计算参考作物蒸散量变化情况相近。其中,冬小麦生育期

参考作物蒸散量的最低值 (428.67 mm) 出现在 2002 年,同年日照时数显著低于多年平均值;参考作物蒸散量的最高值出现于 2019 年 (635.42 mm),同年平均温度、日照时数较高,相对湿度较低,符合气象因素对参考作物蒸散量的影响规律。

2.2 充分供水条件下 40 年冬小麦产量、生育期蒸散量及作物系数变化

图 3 所示为 1980—2020 年间冬小麦产量及生育期蒸散量变化情况。20 世纪 80 年代、90 年代、2001—2010 年及 2011 年之后,充分供水条件下冬小麦产量平均值分别为 $4809.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $5570.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6279.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6964.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,同期蒸散量均值分别为 401.4 mm、417.3 mm、452.7 mm 和 471.9 mm。40 年间产量增幅达 42.4%,远高于同期蒸散量 17.6% 的增幅,表明长期品种改良、化肥施用及田间管理措施优化在提升作物产量方面发挥了积极作用。

图 4 所示为 1980—2020 年冬小麦生育期作物系数变化,通常认为作物系数反映了作物本身的性质,在生长环境稳定的情况下年际间保持稳定,但图 4 的结果反映出作物系数具有明显的年际变化,并随

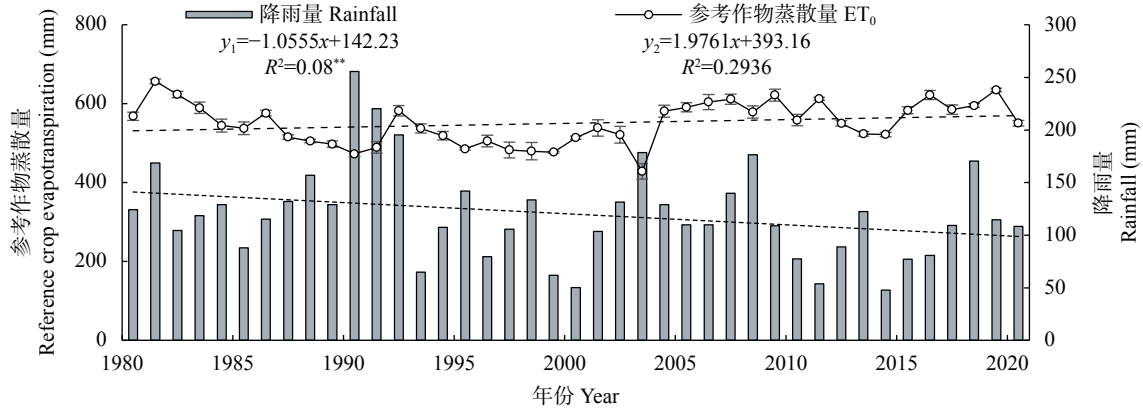


图 2 冬小麦生长季参考作物蒸散量及降雨量变化 (1980—2020 年)

Fig. 2 Changes in reference crop evapotranspiration (ET_0) and rainfall during winter wheat growing seasons from 1980 to 2020

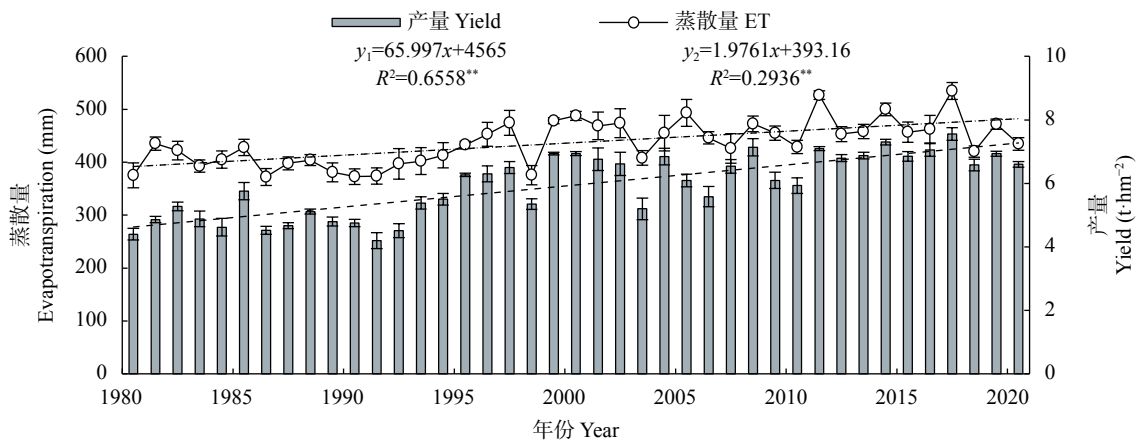


图 3 1980—2020 年充分供水条件下冬小麦产量及蒸散量的变化

Fig. 3 Variations of yield and evapotranspiration (ET) of winter wheat under sufficient water supply from 1980 to 2020

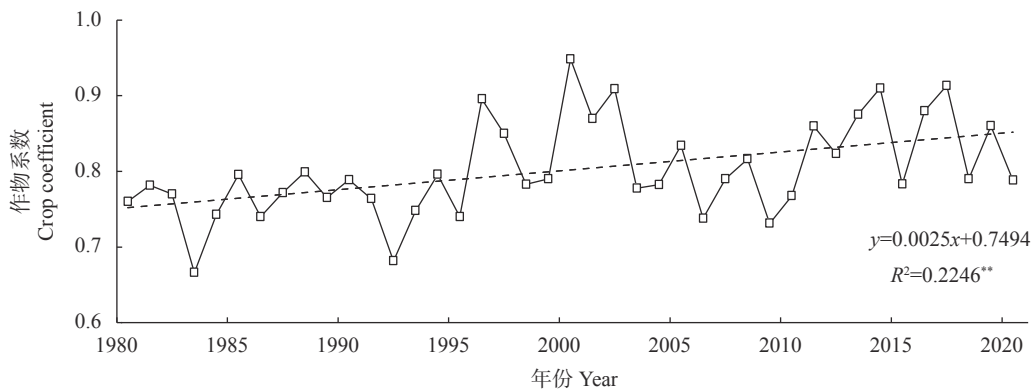


图 4 1980—2020 年充分供水条件下冬小麦作物系数的变化

Fig. 4 Variation of crop coefficient of winter wheat under sufficient water supply from 1980 to 2020

着田间管理措施的改善,作物产量提升同时需水量增加,作物系数呈现上升变化趋势。20 世纪 80 年代、90 年代、2001—2010 年及 2011 年之后,充分供水条件下冬小麦作物系数均值分别为 0.76、0.80、0.81 和 0.85,40 年间作物系数增长 11.6%,多年平均值为 0.80。

分析冬小麦生育期作物系数与实际蒸散量及参考作物蒸散量相关关系如图 5 所示。显著性分析表

明作物系数与冬小麦实际蒸散量相关性较高,与参考作物蒸散量并没有显著相关性。原因可归结为各气象因素变化维持了参考作物蒸散量相对稳定,而同期冬小麦实际蒸散量与品种改良及田间管理措施所带来的产量提升相关性较强,是影响作物系数的直接因素。2017—2018 年、2018—2019 年、2019—2020 年冬小麦生长季蒸散量分别为 420.3 mm、

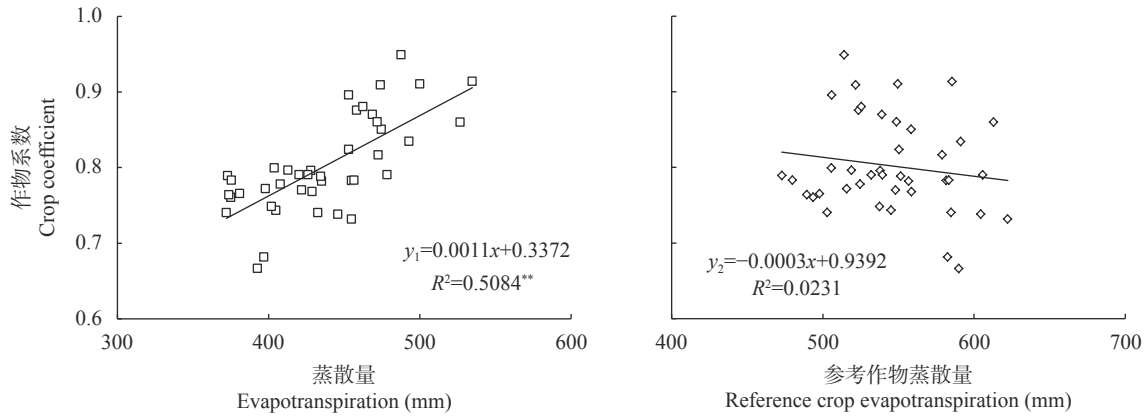


图 5 1980—2020 年充分供水冬小麦作物系数与蒸散量、参考作物蒸散量相关分析

Fig. 5 Correlation analysis of crop coefficient, evapotranspiration, and reference crop evapotranspiration during winter wheat growing seasons under sufficient water supply from 1980 to 2020

471.9 mm 和 434.7 mm, 同期作物系数为 0.79、0.86 和 0.79。

根据测定结果,进一步分析冬小麦作物系数与产量、生物量相关关系如图 6 所示。作物系数随产量及生物量变化均符合正相关关系,与生物量相关性更为显著。其原因可解释为随着冬小麦生物量增加,各生育期冠层相应增大,较大的叶面积指数提高了蒸散量,在参考作物蒸散量保持稳定的情况下导致作物系数随之增加。

2.3 2017—2020 年冬小麦生长季作物系数变化

冬小麦 3 个生育期(2017—2020 年)气象条件如表 3 所示。分析可知,2017—2018 年、2018—2019 年、2019—2020 年冬小麦生长季降水量分别较为接近丰水年、平水年、枯水年标准。3 个生长季正积温均高于多年平均值,符合近年来冬小麦生长季平均温度不断升高的趋势,平均相对湿度低于多年平均。此外,生育期累计日照时数和平均风速 2017—2018 年接近常年水平外,另外两个生长季均低于多年平

均。3 个生长季无极端天气情况出现,利用 Penman-Monteith 方程结合气象观测数据计算 2017—2020 年各生长季冬小麦生育期参考作物蒸散量分别为 542.5 mm、538.8 mm 和 551.5 mm,接近多年平均值。

现状生产条件下,2017—2020 年 3 个冬小麦生长季,对于充分灌溉即生育期灌溉 5 水共计 360 mm 的冬小麦处理,利用水量平衡法结合智墒仪监测数据计算冬小麦每日实际蒸散量,结合同期参考作物蒸散量,求得充分供水条件下作物系数 5 日均值,同期冬小麦生育期灌溉、降水量如图 7 所示。对于取得最高产量的冬小麦处理,从单个生育期来看,作物系数呈现双峰曲线变化特征,分别于越冬前期及开花—灌浆期出现峰值,且生育期后期作物系数高于前期,其中返青—拔节初期冬小麦达最大分蘖数后,部分无效分蘖枯萎,导致叶面积指数短期下降,蒸散量降低,表现为作物系数出现降低现象。3 个生长季各生育期作物系数均值分别为:播种—越冬前 0.70、越冬期间 0.42、返青—拔节期 0.76、拔节—抽穗期

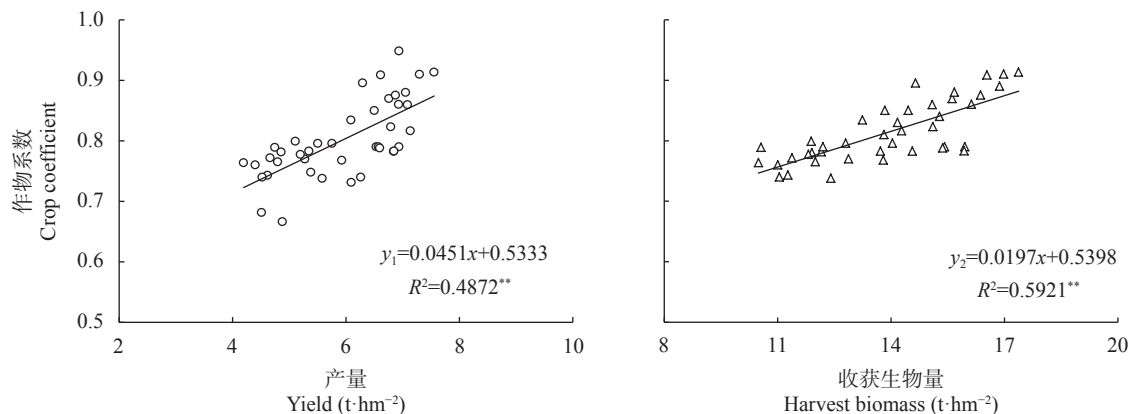


图 6 1980—2020 年充分供水冬小麦作物系数与产量、生物量相关分析

Fig. 6 Correlation analysis of crop coefficient, yield and biomass of winter wheat under sufficient water supply from 1980 to 2020

表 3 2017—2020 年冬小麦生长季气象条件
Table 3 Weather conditions during winter wheat growing seasons from 2017 to 2020

气象要素 Meteorological factors	2017—2018	2018—2019	2019—2020	多年平均 Long-term average from 1980 to 2020
降水 Precipitation (mm)	135.0	114.7	106.2	120.07
正积温 Positive accumulated temperature (°C)	2089.1	2101.9	2205.7	1941.2
日照时数 Sunshine hours (h)	1229.4	1193.8	1082.7	1263.9
日均风速 Average daily wind speed (m·s ⁻¹)	1.2	0.9	0.9	1.3
相对湿度 Relative humidity (%)	59.4	59.2	57.5	65.9
参考作物蒸散量 Reference crop evapotranspiration (mm)	542.5	538.8	551.5	542.1

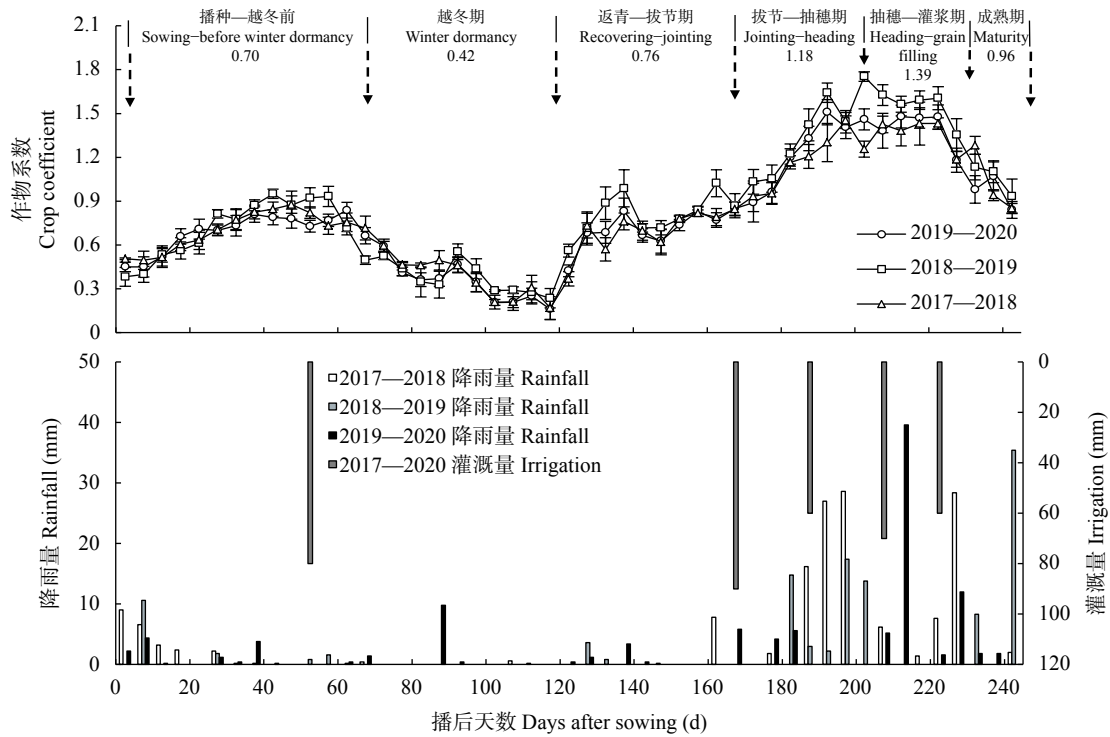


图 7 2017—2020 年充分供水处理冬小麦作物系数及降雨量的变化

Fig. 7 Changes in crop coefficients of winter wheat under sufficient water supply and distribution of rainfall and irrigation during the growing seasons of winter wheat from 2017 to 2020

1.18、抽穗—灌浆期 1.39、成熟期 0.96。各生育期作物系数变化及峰值出现时间与叶面积指数变化规律相同。从作物生长角度看,在越冬前作物已形成一定的群体,需水量维持在一定强度,作物系数从播种到越冬呈现增加趋势,并出现一个高峰。随着冬小麦进入越冬期,地上部分枯黄,不再具有蒸腾能力,这个时段农田蒸散以土壤蒸发失水为主,且维持低水平,因而这个时期的作物系数降低并维持在较低水平。越冬后,从返青期到抽穗扬花,作物叶面积指数不断增加至最大水平,同时在这个阶段随着大气温度升高、辐射增强,作物日蒸散量不断增加,作物系数出现显著增加趋势。

2017—2020 年 3 个生长季,根据主要生育期田间实测数据获取的生物量及叶面积指数,通过插值法计算获得逐日生物量和叶面积指数,结果如图 8 所示。分析不同生育阶段作物系数与生物量、叶面

积指数相关性,结果如图 9 所示。在参考作物蒸散量没有显著差异的前提下,2018—2019 年生长季作物系数整体高于其余两个生长季。在考虑气象因素对蒸散量的影响外,该生长季各生育期累计生物量及最终产量较高导致实际蒸散量增加,在参考作物蒸散量年际变化保持稳定的前提下,使得生长季作物系数均值升高。因此,作物本身生长要素即叶面积指数、生物量累积是影响作物系数年际变化的重要因素。

对于冬小麦整个生育期,作物系数与生物量相关性略高于叶面积指数。不同生育阶段分析,播种后至越冬前随着冬小麦生长,早期土壤表面蒸发占比较高,蒸散量易受降雨量影响导致不同生育期作物系数差值较大,不稳定性更为明显。作物蒸散量随叶面积指数同步增加,作物系数变化与叶面积指数呈显著正相关。本阶段末冬小麦平均生物量累计

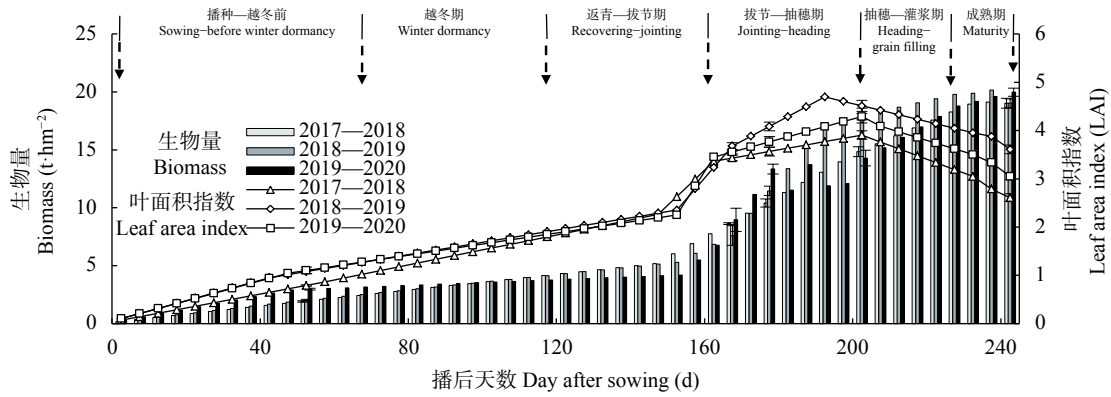


图 8 2017—2020 年充分供水处理冬小麦平均生物量及叶面积指数变化

Fig. 8 Changes in biomass and leaf area index during three growing seasons of winter wheat under sufficient water supply from 2017 to 2020

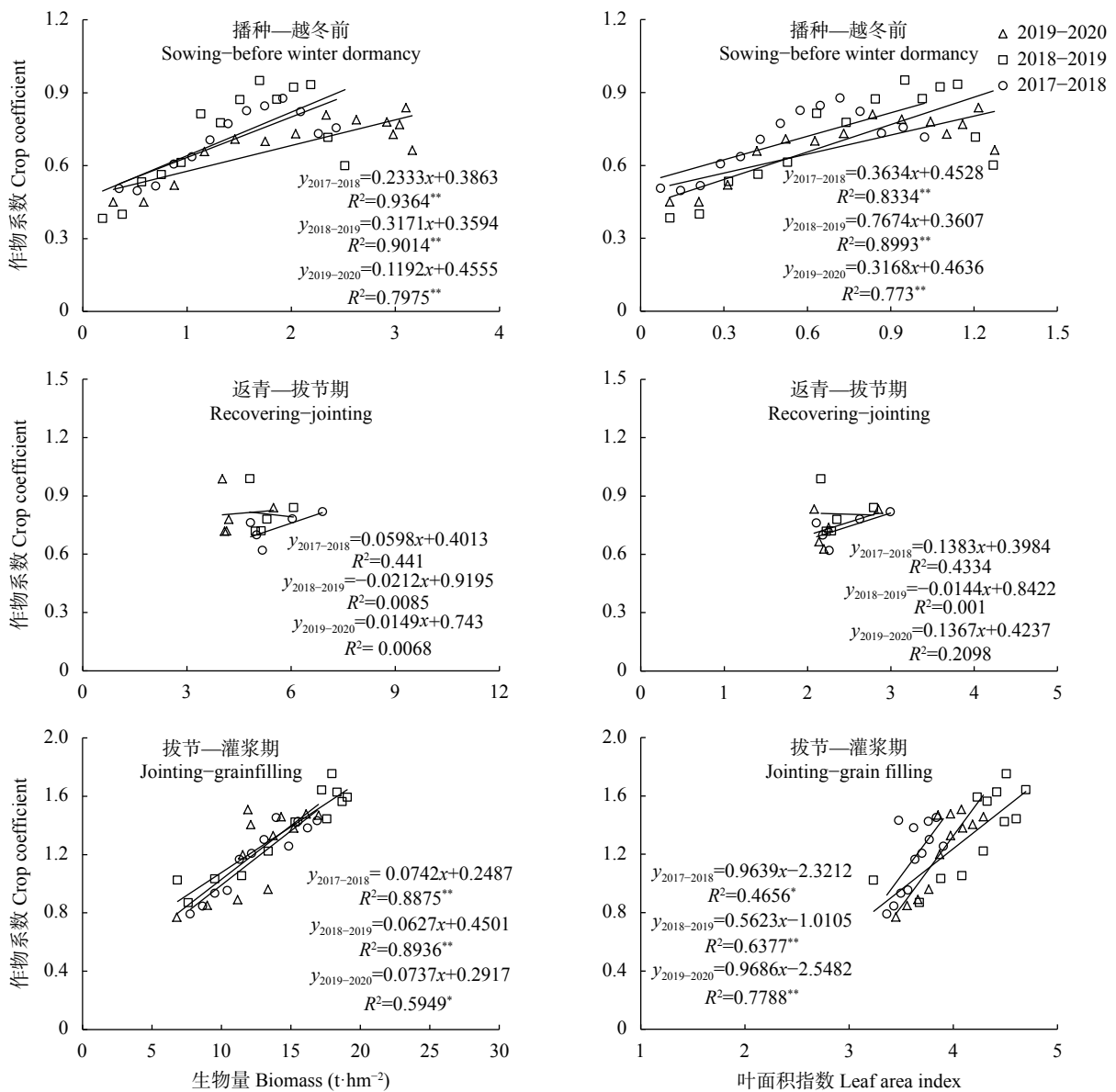


图 9 2017—2020 年冬小麦主要生育期作物系数与生物量、叶面积指数的相关关系分析

Fig. 9 Correlation analysis between crop coefficients with biomass and leaf area index of winter wheat during different growth stages for three seasons from 2017 to 2020

占全生育期的12.6%,叶面积指数达到峰值的26.5%,同时作物系数随冬小麦耗水增加而显著升高,由于冬小麦播种至越冬前期持续时间较长,3个生长季此阶段平均蒸散量占整个生育期均值的29.4%。冬小麦越冬期间农田蒸散以土壤蒸发为主,蒸散速率维持较低状态,作物系数降低。进入返青—拔节期,无效分蘖死亡导致作物系数产生较大波动,致使生物量及叶面积指数与作物系数的相关性降低。

从拔节至抽穗—灌浆期,是冬小麦干物质积累的重要阶段,此阶段蒸散量占总蒸散量的46.3%,同期积累了总生物量的80.2%,是作物系数增加并维持高水平的时期。本阶段叶面积指数逐渐达到较高水平并维持稳定,于扬花期达峰值后逐渐下降,叶片蒸散量提升使得作物系数达另一峰值且高于越冬前峰值。由于作物冠层较大,土壤蒸发占蒸散量的比例小,作物系数更多地反映了作物本身的蒸腾耗水特征。进入灌浆后期至成熟期,作物系数逐渐降低,主要是叶片生长活力降低,光合作用减弱,叶片蒸腾量降低,叶面积指数呈不断下降趋势,与作物系数变动显著相关。

选取叶面积指数达到最高时期的冬小麦抽穗—灌浆期,分析与蒸散发强度相关性较强的饱和水汽压差(VPD)及大气温度(T),进一步分析作物系数与气象因素的关系,结果如图10所示。VPD与大气湿度状况密切相关,是决定大气蒸散力的主要因素,VPD与作物系数相关性高于 T 。从显著性来看,由于2018—2019年生长季作物生物量和叶面积指数大于其他两个生长季,蒸散量与VPD及 T 相关性也高于其他两个生长季,表明作物系数的年际变化受制于大气蒸散力和作物本身的叶面积指数大小的影响。

3 讨论

本研究发现,1980—2020年试验地点参考作物蒸散量平均值为550.8 mm,平均增加1.4%,并未出现显著上升趋势。充分供水试验结果表明,40年间冬小麦蒸散量平均值为434.7 mm,增长17.6%,作物系数多年平均值为0.80,增长11.6%。Zhang等^[20]的研究表明,参考作物蒸散量(ET_0)年际变化相对稳定,而冬小麦实际蒸散量与生长状况密切相关,呈现季节性波动的特征,是影响作物系数主要因素。

作物系数变化与产量保持了一定的同步性,但40年间冬小麦产量增加42.4%,远高于作物系数同期增幅,产量随作物系数的增长速度略高于生物量,证明收获指数的增加对冬小麦产量提升有很大的贡献^[33]。在本研究区开展的其他研究表明,冬小麦产量与品种的更新和土壤养分含量的增加有关^[31]。Zhou等^[34]基于1960—2000年本地区的试验结果,指出新品种的引进使冬小麦产量年均增加0.5%~1.0%。Zhang等^[2]基于田间试验及模拟的结果表明:20世纪90年代冬小麦品种更新导致的产量增长率为24.7%,2000年后达52.0%。由于化肥投入量增加和秸秆还田的共同作用,40年来试验地点土壤养分含量显著提升,极大地促进了作物产量的提高^[35]。土壤养分增加可以调控作物叶片蒸腾效率,王艳哲^[36]研究发现,光合速率与根系可利用土壤水中氮含量呈正相关,叶片水平水分利用效率也显著提升。因此,品种更新、土壤养分含量提高带来的收获指数增加和光合效率的提升是冬小麦40年间产量和生物量增加高于耗水增加幅度的重要因素。因此,40年间冬小麦产量显著提升,而农田蒸散量提升幅度较低,作物系数缓慢增加。

对于冬小麦作物系数年际变化,FAO-56计算指

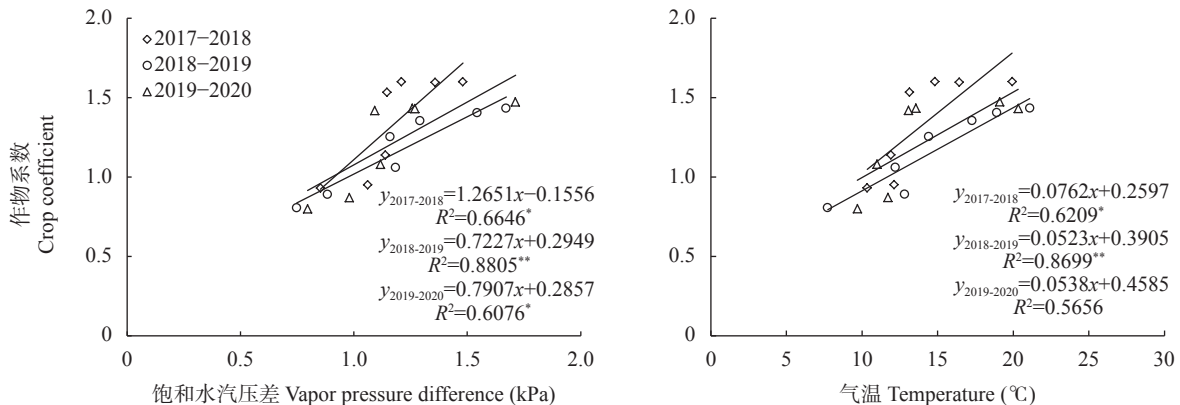


图10 2017—2020年冬小麦各生育期作物系数与饱和水汽压差、温度相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis between crop coefficient with saturated water vapor pressure difference and air temperature during different growing stages of winter wheat for three seasons from 2017 to 2020

南中推荐冬小麦(无冷冻土壤)全生育期作物系数均值为 0.75,其中冬小麦生育期前、中、后期标准作物系数分别为 0.70、1.15 和 0.20~0.40,由于指南中对作物生长环境有明确规定,实际应用中往往需要根据实际情况对作物系数计算值进行修正^[6]。例如花佳程等^[17]计算淮北平原主要地区作物系数多年均值为 0.79,全生育期波动范围为 0.56~1.02,1991—2018 年间作物系数在播种—出苗期、抽穗—灌浆期和灌浆—成熟期均呈现显著上升趋势,与产量提升所导致的需水量升高及气温、降水等气候因子显著相关。Kang 等^[37]研究表明中国西北干旱地区冬小麦 1995—2014 年间全生育期平均作物系数为 0.83。不同生育期内作物系数变化范围为 0.49~1.24,且峰值出现于生育期中后期。韩淑敏等^[32]基于中国科学院栾城农业生态系统试验站充分供水条件下冬小麦作物系数研究,计算得出 1995—2001 年间冬小麦生育期作物系数均值为 0.80,生育期内变化范围为 0.28~1.43,与本研究同期计算值基本相符,同时作物系数与降水年型无显著相关性。本地区作物系数各生育期计算值及年际变化均值高于 FAO-56 计算指南中的参考值,表明作物系数存在一定的区域性,同时从较长时间尺度看作物系数并非保持不变,而是与作物产量水平相关。

对于冬小麦各生育期作物系数变化,左余宝等^[5]计算得出鲁北地区 2006—2007 年冬小麦播种—越冬前、返青—拔节、抽穗—灌浆和成熟期作物系数均值分别为 0.84、1.05、1.58 和 1.29,略高于本试验区,原因在于该地区较浅的地下水埋深(2~3 m)及较高的降水量(547.5 mm)使得冬小麦生育期蒸散量较高,达 491.2 mm。时学双等^[12]计算了关中地区冬小麦作物系数生育期内逐月变化情况,其中 11 月、3 月、5 月和 6 月作物系数计算值分别为 1.34、0.75、1.15 和 0.54,生育期内峰值出现于分蘖期与本试验结果不一致,与该地区年日照时数达 2616 h、秋季降雨较多使得冬小麦苗期蒸散量较高相关。从作物系数影响因素来看,陈玉民^[14]研究表明作物系数主要受产量、叶面积指数及叶片性状、土壤表层水分、栽培因素影响,同时指出作物需水量过程线(或蒸散量过程线)年际间因降雨影响变化较大,而参考作物蒸散量是由同期多个气象指标求得,一定时期内较为稳定,由此二者比值即作物系数呈现出年际间不稳定的特点。雷志栋等^[38]通过计算 1980—1993 年冬小麦各生育期作物系数均值,发现作物系数与叶面积指数直接相关,在返青—拔节期后太阳净辐射、

相对湿度和风速波动对作物系数影响逐渐增强。刘海军等^[39]利用 2003 年和 2004 年两个生长季计算冬小麦拔节抽穗期作物系数均值为 1.26 和 1.35,相关性分析表明叶面积指数与株高存在显著相关性,可以利用株高进行作物系数估算。花佳程等^[17]研究表明冬小麦全生育期作物系数与气温显著相关、而在生育期中后期与相对湿度相关性较强,不同气象站点各气候因子与作物系数之间相关性差异较大。

对于作物系数计算方案的合理性及准确性,宋妮等^[19]指出基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的河南地区作物系数计算值分别为 1.02 和 0.87,后者与实测值更为接近,差异产生的原因在于参考作物蒸散量计算误差较大。陈玉民^[14]提出了冬小麦作物系数年内均值参考值,其中华北地区一般沿黄河两岸为 1.0 左右,北部的河北、山西、北京、天津等地都小于 1.0,与本研究结果基本相符,证明了作物系数年际变化的长期稳定性。

4 结论

太行山前平原作为重要的冬小麦产区,1980—2020 年来冬小麦生长季作物系数增加 11.6%,多年平均值为 0.80。作物系数与实际蒸散量相关性显著,与参考作物蒸散量无显著相关性,生产条件改善所带来的冬小麦实际蒸散量的增加是作物系数升高的直接原因,同时生物量对作物系数的影响高于经济产量。2017—2020 年生长季现状生产条件下,冬小麦作物系数均值为 0.81,略高于联合国粮农组织所提出的参考值 0.75,体现了作物系数的区域性。作物系数与生物量的相关性高于叶面积指数,各生长季间作物系数计算值范围波动较大,生育期中后期作物系数与生物量及叶面积指数相关性增强,受饱和水汽压差及温度影响较为明显。实际生产中需要结合不同品种冬小麦耗水特性及田间生长条件,对作物系数进行订正,基于能够反映生产实际的作物系数,确定作物生育期需水和耗水规律,为区域水资源管理和优化灌溉制度提供依据。

参考文献 References

- [1] JOVANOVIĆ N, PEREIRA L S, PAREDES P, et al. A review of strategies, methods and technologies to reduce non-beneficial consumptive water use on farms considering the FAO56 methods[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106–267
- [2] ZHANG X Y, WANG Y Z, SUN H Y, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water

- supply[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1103-1112
- [3] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109-120
- [4] LI J M, INANAGA S, LI Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(1): 8-23
- [5] 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, 78
- ZUO Y B, TIAN C Y, TANG J W, et al. Studies on E_{Tc} and K_c of main crops in northern Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 70-73, 78
- [6] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[EB/OL]. 1998
- [7] 孙景生, 刘祖贵, 张寄阳, 等. 风沙区春小麦作物系数试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 55-58
- SUN J S, LIU Z G, ZHANG J Y, et al. Crop coefficients of spring wheat in windy dust area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 55-58
- [8] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 4-20
- [9] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 99-103
- FENG Z M, YANG Y Z, DING X Q, et al. Temporal-spatial changing characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 99-103
- [10] 张瑜, 张立元, Zhang Huihui, 等. 玉米作物系数无人机遥感协同地面水分监测估算方法研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 83-89
- ZHANG Y, ZHANG L Y, ZHANG H H, et al. Crop coefficient estimation method of maize by UAV remote sensing and soil moisture monitoring[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 83-89
- [11] 王振龙, 范月, 吕海深, 等. 基于气象-生理的夏玉米作物系数及蒸散估算[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 141-148
- WANG Z L, FAN Y, LYU H S, et al. Estimation of summer maize crop coefficient and evapotranspiration based on meteorology-physiology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 141-148
- [12] 时学双, 曹红霞, 李天军. 基于Penman-Monteith公式的关中地区作物系数研究[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(2): 26-29
- SHI X S, CAO H X, LI T J. Crop coefficient on the Penman-Monteith formulae in Guanzhong Shaanxi[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(2): 26-29
- [13] FRERE M, POPOV G F. Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting[M]. Rome: FAO Plant Production and Protection Paper 17, 1979: 21-29
- [14] 陈玉民. 关于作物系数的研究及新进展[J]. *灌溉排水*, 1987, 6(2): 1-7
- CHEN Y M. A study on the crop coefficients and its new development[J]. *Irrigation and Drainage*, 1987, 6(2): 1-7
- [15] 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 Y Q, LI X R, ZHU M M. 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
- [16] 李波, 景竹然, 魏新光, 等. 东北地区春玉米作物系数时空分布特征研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 279-290
- LI B, JING Z R, WEI X G, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of spring maize coefficients in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 279-290
- [17] 花佳程, 朱永华, 王振龙, 等. 淮北平原冬小麦作物系数的变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(2): 118-124
- HUA J C, ZHU Y H, WANG Z L, et al. Spatiotemporal variation of crop coefficient of winter wheat in Huaibei plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(2): 118-124
- [18] 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 H J, YAO D D, LIU Y, 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
- [19] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 基于Penman修正式和Penman-Monteith公式的作物系数差异分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 88-97
- SONG N, SUN J S, WANG J L, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman-Monteith equations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 88-97
- [20] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097-1104
- [21] 何振嘉, 吴萌. 黄土高原区涌泉根灌枣树作物系数与耗水规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S2): 5-9
- HE Z J, WU M. Crop coefficient and water consumption rule of jujube trees in bubbled-root irrigation of Loess Plateau Region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S2): 5-9
- [22] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 27-32
- WANG S F, ZHANG X Y, PEI D. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(2): 27-32
- [23] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5589-5599
- WANG P T, YAN J P, JIANG C, et al. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica*

- Sinica, 2014, 34(19): 5589–5599
- [24] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486–497
- [25] ALLEN R G, JENSEN M E, WRIGHT J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. *Agronomy Journal*, 1989, 81(4): 650–662
- [26] 周瑶, 张鑫, 徐静. 青海省东部农业区参考作物蒸散量的变化及对气象因子的敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 765–775
- ZHOU Y, ZHANG X, XU J. Changes of reference crop evapotranspiration and sensitivity analysis of meteorological factors in eastern plateau agricultural region of Qinghai Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 765–775
- [27] YIN Y H, WU S H, DAI E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329–3337
- [28] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1–10
- [29] KENDY E, GERARD-MARCHANT P, WALTER M T, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2023–2029
- [30] 张喜英, 张榕, 刘昌明. 太行山前平原土壤水分特征曲线拟合参数的确定[J]. *华北农学报*, 2001(2): 75–82
- ZHANG X Y, ZHANG L, LIU C M. Determination of fitting parameters of soil moisture characteristic curve in Taihang Piedmont Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2001(2): 75–82
- [31] ZHANG X Y, CHEN S Y, LIU M Y, et al. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China plain[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 783–790
- [32] 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 S M, CHENG Y S, HU C S. 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
- [33] 周陈, 李许滨, 徐德彬, 等. 土壤肥力及冬小麦产量与生物有机肥的效应研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(3): 1130–1132
- ZHOU C, LI X B, XU D B, et al. Study on the effect of biological organic fertilizer on soil fertility and winter wheat yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(3): 1130–1132
- [34] ZHOU Y, ZHU H Z, CAI S B, et al. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the Southern China winter wheat region: 1949 to 2000[J]. *Euphytica*, 2007, 157(3): 465–473
- [35] FAN M S, ZHANG X Y, YUAN L X, et al. Current status and future perspectives to increase nutrient- and water-use efficiency in food production systems in China[M]//Improving Water and Nutrient-Use Efficiency in Food Production Systems. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013: 263–273
- [36] 王艳哲. 提高冬小麦水分利用效率的根层水氮调控机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 110–112
- WANG Y Z. Regulating water and N supply in the root zone to improve water use efficiency of winter wheat[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 110–112
- [37] KANG S Z, GU B J, DU T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(3): 239–254
- [38] 雷志栋, 罗毅, 杨诗秀, 等. 利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(3): 119–122
- LEI Z D, LUO Y, YANG S X, et al. Calculation of crop coefficient with meteorological data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(3): 119–122
- [39] 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 52–56
- LIU H J, KANG Y H. Calculation of crop coefficient of winter wheat at elongation-heading stages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 52–56