

商丘地区不同降水年型冬小麦-夏玉米需水量和缺水量分析

丁大伟^{1,2,4}, 陈金平^{1,2}, 申孝军^{2,3}, 宋妮^{1,2*}, 谢坤^{1,2}, 任文^{1,2}, 王景雷^{1,2*}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站/国家农业环境商丘观测实验站/国家农业绿色发展长期固定观测商丘试验站, 河南 商丘 476000; 3. 天津农学院 水利工程学院, 天津 300392; 4. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081)

摘要:【目的】研究不同降水年型下冬小麦、夏玉米的作物需水规律及成因。【方法】基于1954—2019年商丘市气象数据、1999—2019年河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站作物生育期观测数据和2011—2018年大型蒸渗仪观测数据, 采用描述性统计和Mann-Kendall趋势检验方法, 探究作物需水量和缺水量变化趋势, 并通过主导分析法探索气象因子对作物需水量的影响。【结果】1954—2019年, 周年有效降水量呈上升趋势, 冬小麦季、夏玉米季有效降水量上升速率为3.09、5.23 mm/10 a; 仅丰水年下冬小麦季和周年有效降水量呈下降趋势。周年作物需水量呈极显著下降趋势($P<0.01$), 冬小麦季、夏玉米季作物需水量下降速率为6.72 mm/10 a ($P<0.01$)、18.47 mm/10 a ($P<0.01$); 不同降水年型下冬小麦季、夏玉米季和作物周年需水量均表现为下降趋势。周年作物缺水量呈极显著下降趋势($P<0.01$), 冬小麦季、夏玉米季作物缺水量下降速率为9.81、23.70 mm/10 a ($P<0.01$); 仅丰水年冬小麦季缺水量呈上升趋势。在平水年和枯水年, 日照时间是影响冬小麦需水量的首要因子, 但在丰水年相对湿度为影响冬小麦需水量的首要因子; 夏玉米需水量的主要影响因子为日照时间、平均风速和最高温度, 在3种降水年型下日照时间均为首要因子, 其次是平均风速和最高温度。【结论】在丰水年型下, 商丘地区冬小麦应在拔节—抽穗期灌溉, 夏玉米季不灌溉; 在平水年型下, 冬小麦季应在拔节—抽穗期灌溉, 夏玉米抽穗期灌溉; 在枯水年型下, 冬小麦和夏玉米在播前灌溉的基础上, 还需分别在拔节—抽穗期和拔节—抽穗期进行灌溉。

关键词: 作物需水量; 冬小麦-夏玉米连作; 降水年型; 气象因子; 主导分析法

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023050

OSID:



丁大伟, 陈金平, 申孝军, 等. 商丘地区不同降水年型冬小麦-夏玉米需水量和缺水量分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 9-18.

DING Dawei, CHEN Jinping, SHEN Xiaojun, et al. Changes in Water Requirement and Water Deficit of Winter Wheat and Summer Maize with Precipitation in Shangqiu, Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 9-18.

0 引言

【研究意义】冬小麦-夏玉米连作是我国北方主要的耕作模式, 近年来, 人们对食物多样性的要求不断提高, 各种作物的种植面积逐渐扩大, 冬小麦、夏玉米的种植面积被持续压缩, 粮食危机濒临, 以冬小麦-夏玉米连作为主的麦-玉两熟区必须以更为优化的灌溉制度来缓解粮食增加与水资源不足的矛盾。商丘市地处豫、鲁、苏、皖四省结合部, 是豫东地区冬小麦-夏玉米连作一年两熟种植模式的典型代表

区。2020年冬小麦产量为447.35万t, 夏玉米产量为274.32万t, 人均粮食占有量为790 kg, 远高于全国人均470 kg和国际粮食安全人均400 kg标准线^[1]。但是商丘市人均水资源占有量不足300 m³, 是全国重度缺水地区之一^[2]。因此, 探明冬小麦-夏玉米周年、作物季及作物不同生育阶段需水规律, 掌握影响作物需水量的主要气象因子及其未来变化趋势, 有助于麦-玉两熟区作物生育阶段灌水策略的选择和制定, 对豫东地区优化农田水分管理和区域水资源调配至关重要。【研究进展】作物需水量和作物缺水量是农业水资源规划的基础资料和重要指标^[3-4], 众多学者利用FAO推荐的Penman-Monteith公式和作物系数法对作物需水量做了大量研究工作^[5-7]。近年来, 黄仲冬等^[8]利用土壤水分密度函数量化河南省作物灌溉需水量。李志等^[9]根据1996—2015年气象资料, 明确了苏北地区不同水文年型冬小麦生育阶段及冬小麦季作物需水量和灌溉需水量。Wu等^[10]量化了华北平原冬小麦生长季、夏玉米生长季及周年

收稿日期: 2023-02-16 修回日期: 2023-05-05 网络出版日期: 2023-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFD1900502); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IFI2023-18, Y2022LM29); 国家农业环境商丘观测实验站(NAES038AE05)

作者简介: 丁大伟(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail: dingdawei@caas.cn

通信作者: 宋妮(1979-), 女, 副研究员, 主要从事作物需水尺度转化及气候变化对作物需水过程的影响。E-mail: ngssongni@163.com

王景雷(1972-), 男, 研究员, 主要从事新理论新技术在节水农业中的应用研究。E-mail: firwjl@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

灌溉需水量,认为周年灌溉需水量变化趋势并不显著。探究气象因子与作物需水量、缺水量之间的关系,对准确预测未来作物需水状况至关重要。宋妮等^[11]基于气象数据采用主导分析法,揭示了影响河南地区参考作物蒸散量变化的主要气象因子为日照时间和平均风速。张力等^[12]采用敏感性分析方法研究表明,相对湿度和气温是影响黄淮海区域作物需水量的敏感因子,而 Jia 等^[13]采用相同的研究方法,认为日照时间、平均风速是影响作物需水量的主要因子,温度升高对作物需水量的影响有限。郑润桥等^[14]利用相关分析法,得出相对湿度和日照时间是影响鲁西北冬小麦缺水量的重要因素。姬兴杰等^[15]采用偏相关分析法研究指出,导致河南省冬小麦需水量下降的原因是平均风速减小。【切入点】在分析气象因子对作物需水量的影响时,不同站点和不同统计方法导致结论不一致,众多学者大多考虑日照时间、平均风速、相对湿度、温度的影响,忽视了降水对其影响,降水虽未直接参与作物需水量的计算,但其间接影响其他因子变化,不同降水年型下气象因子对作物需水量的影响尚不清晰,有待进一步研究。【拟解决的关键问题】根据河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站作物生育期资料 and 大型称质量式蒸渗仪观测数据,结合 1955—2019 年历史气象数据,采用 Penman-Monteith 公式和作物系数法^[16],明确冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式区作物需水量和缺水量在作物季、周年及不同降水年型下的变化特征,并采用主导分析方法探明不同降水年型下作物需水量的主控气象因子,为农区开展科学的灌溉管理方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(115°34'09"E, 34°35'04"N, 海拔 50.2 m)地处黄淮平原农田生态系统内,属半干旱、亚湿润暖温带季风气候类型,种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟连作。冬小麦生长季为每年的 10 月中旬—翌年 6

月上旬,夏玉米生长季为每年 6 月上旬—9 月下旬。研究区多年平均(1955—2019 年)降水量为 712.9 mm,年蒸发量为 1 735.0 mm,年日照时间为 2 149.1 h(冬小麦季 1 289.3 h、夏玉米季 737.8 h),年平均温度 14.3 °C(冬小麦季 8.3 °C、夏玉米季 25.6 °C),≥0 °C 积温 5 292.5 °C(冬小麦季 2 029.8 °C、夏玉米季 2 829.7 °C),无霜期 206 d 左右。区域土壤类型主要为黄河沉积物发育的潮土,并伴有部分盐碱土、沙土和沼泽土的交错分布。自 1994 年来持续开展引黄补源工程以补充地下水,通过电力、机械井水提灌的方式进行灌溉。

1.2 降水年型的划分

采用配线法进行降水年型划分。以冬小麦播种至次年夏玉米收获为周年时间单位,将周年降水量由大到小排列,计算经验频率,绘制经验曲线并与皮尔逊 III 型曲线进行配线,降水量≤25%降水保证率年型为丰水年,≥75%降水保证率年型为枯水年,其余年份为平水年^[17],各降水年型下冬小麦季、夏玉米季及周年平均降水量见表 1。

表 1 商丘地区不同降水年型下各作物季

1955—2019 年平均降水量

Table 1 The average precipitation of crops under different precipitation years from 1955 to 2019 in Shangqiu

降水年型	年型 阈值/mm	统计 年数/a	平均降水量/mm		
			冬小麦季	夏玉米季	周年
枯水年	585.7	15	189.9	317.2	507.1
平水年	-	32	224.1	449.9	674.0
丰水年	834.4	18	300.1	653.6	953.7

1.3 作物生育阶段与作物系数

本研究将冬小麦生育期分为播种—返青期、返青—拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—收获期 4 个生育阶段,夏玉米生育期分为播种—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—收获期 3 个生育阶段,作物生育期日期来自河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(<http://sqa.cern.acs.cn/meta/metaData>) 1999—2019 年作物生育动态观测数据,计算各生育阶段日期平均值,结果见表 2。

表 2 商丘地区 1999—2019 年冬小麦、夏玉米生育阶段

Table 2 Crop growth period of winter wheat and summer maize from 1999 to 2019 in Shangqiu

冬小麦季					夏玉米季			
播种	返青期	拔节期	抽穗期	收获期	播种	拔节期	抽雄期	收获期
1014	0221	0315	0415	0603	0606	0716	0805	0925

根据河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站 2011—2018 年大型称质量式蒸渗仪观测的作物需水量数据,结合同时期参考作物需水量计算冬小麦、夏玉米逐旬作物系数并取平均值,结果见表 3。

1.4 气象因子和参考作物需水量

气象资料来自国家气象中心(<http://data.cma.cn/>),数据起始时间为 1954 年 10 月—2019 年 9 月,包括逐日平均温度、最高温度和最低温度(°C)、相对湿

度(%)、降水量(mm)、平均风速(m/s)、日照时间(h)。冬小麦季气象数据为每年10月至翌年6月,夏玉米季气象数据为每年6—9月,周年气象数据自1954年10月—2019年9月,冬小麦季、夏玉米季和冬小麦-夏玉米周年均为65 a数据,文中均以1955—2019年表示。参考作物需水量(ET_0)采用FAO56推荐的Penman-Monteith方程计算,具体见文献[16],本文不再详述。

表3 商丘地区冬小麦、夏玉米逐旬作物系数

Table 3 Crop coefficient (k_c) of winter wheat and summer maize at ten-day scale in Shangqiu

作物	月份 k_c 值	10月上旬 0.61	10月中旬 0.57	10月下旬 0.64	11月上旬 0.65	11月中旬 0.63	11月下旬 0.65	12月上旬 0.64
冬小麦	月份 k_c 值	12月中旬 0.58	12月下旬 0.55	1月上旬 0.53	1月中旬 0.51	1月下旬 0.51	2月上旬 0.52	2月中旬 0.54
	月份 k_c 值	2月下旬 0.58	3月上旬 0.74	3月中旬 0.87	3月下旬 0.97	4月上旬 1.08	4月中旬 1.14	4月下旬 1.18
	月份 k_c 值	5月上旬 1.13	5月中旬 1.08	5月下旬 0.71	6月上旬 0.47			
	月份 k_c 值	6月上旬 0.43	6月中旬 0.43	6月下旬 0.59	7月上旬 0.82	7月中旬 0.99	7月下旬 1.22	8月上旬 1.27
夏玉米	月份 k_c 值	8月中旬 1.29	8月下旬 1.27	9月上旬 1.30	9月中旬 1.27	9月下旬 0.68		

1.5 有效降水量、作物需水量、缺水量的计算

商丘地区冬小麦种植期间降水强度不大,不产生深层渗漏或地表径流,可将生长期所有降水量视为有效降水量,有效降水量计算式为^[18]:

$$P_{e-w} = P_{hm} + P_w, \quad (1)$$

式中: P_{e-w} 为冬小麦播种前半月与整个冬小麦生长期内的有效降水量之和; P_{hm} 为冬小麦播前半月的降水量(mm),计入冬小麦播种—返青期; P_w 为冬小麦生育期内的降水量(mm)。

夏玉米有效降水量采用分段系数法计算,计算式为^[19]:

$$P_{e-M} = \begin{cases} 0, & P_M \leq 5 \\ 0.9 P_M, & 5 < P_M \leq 50 \\ 0.75 P_M, & P_M > 50 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: P_{e-M} 为夏玉米日有效降水量(mm); P_M 为夏玉米日降水量(mm)。

采用作物系数法^[16]计算冬小麦、夏玉米需水量,即 $ET_c = K_c \times ET_0$ 。式中: ET_c 为作物需水量(mm/d); K_c 为冬小麦、夏玉米作物系数。

缺水量为作物生育阶段内的需水量与有效降水量之差^[18]。

1.6 数据分析方法

采用 Mann-Kendall 法对不同时间尺度有效降水量、作物需水量和作物缺水量进行趋势检验,统计变量 $Z > 0$ 时表示该指标呈上升趋势, $Z < 0$ 时表示该指标呈下降趋势,当 $|Z| > 1.96$ 时变化趋势显著($P < 0.05$)^[20];采用主导分析法分析气象因子对作物需水量的贡献率并进行排序^[11];使用 R 4.2.1 进行数据整理、统计分析。

2 结果与分析

2.1 有效降水量

2.1.1 冬小麦、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年有效降水量

图1为1955—2019年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年有效降水量。由图1可知,商丘地区冬小麦季有效降水量平均为242.8 mm,占周年有效降水量的40.68%,最高值出现在1963年(505.5 mm),最低值出现在1970年(109.3 mm)。夏玉米季有效降水量平均为354.1 mm,在107.9~663.4 mm之间波动,最高值出现在1979年,最低值出现在1966年。冬小麦-夏玉米周年有效降水量在268.8~998.8 mm之间变化,最高值和最低值分别出现在1979年和1966年,最高值和最低值出现时间与夏玉米季相同,可能是因为1979年夏玉米季降水量较大,而1966年夏玉米季和冬小麦季降水量均较少所致。对1955—2019年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年有效降水量进行趋势检验发现,三者分别以3.09、5.23、8.32 mm/10 a的速率缓慢上升。

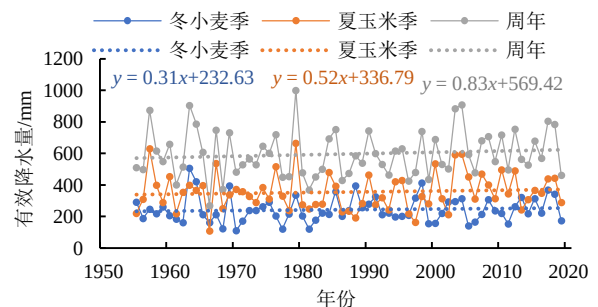


图1 商丘地区1955—2019年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年有效降水量年际变化

Fig.1 The interannual variation of effective precipitation in the winter wheat, summer maize, and winter wheat-summer maize seasons from 1955 to 2019 in Shangqiu

2.1.2 冬小麦、夏玉米各生育阶段有效降水量

冬小麦、夏玉米各生育阶段有效降水量变化趋势指标见表 4。冬小麦在播种—返青期内有效降水量最高, 占整个冬小麦季有效降水量的 41.74%, 其次是抽穗—收获期, 且均呈缓慢上升趋势, 但在冬小麦返青—拔节期和拔节—抽穗期有效降水量分别占冬小麦季的 7.97%和 12.59%, 且均呈缓慢下降趋势, 故这 2 个生育阶段的灌溉需求增加。夏玉米各生育阶段有效降水量差别相对较小, 除在播种—拔节期有效降水量呈缓慢下降趋势外, 其他生育阶段

均呈缓慢上升趋势, 故夏玉米应在播种时适时灌溉, 确保出苗, 苗期管理好, 可充分利用降水, 后期基本不需要灌溉。

枯水年冬小麦-夏玉米周年和平水年冬小麦抽穗—收获期有效降水量呈显著上升趋势 ($P<0.05$), 枯水年和平水年冬小麦季有效降水量呈上升趋势, 丰水年冬小麦季有效降水量呈下降趋势; 不同降水年型下夏玉米季有效降水量呈上升趋势, 但丰水年拔节—抽穗期有效降水量呈显著下降趋势 ($P<0.05$)。

表 4 冬小麦、夏玉米各生育阶段有效降水量变化及其趋势检验

Table 4 Annual variations trend of effective precipitation of winter wheat and summer maize at different growth stages

降水年型	指标	冬小麦					夏玉米				周年
		播种—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长季	播种—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长季	
自然年 (65 a)	均值/mm	101.4	19.4	30.6	91.5	242.8	122.0	85.3	146.7	354.1	596.9
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	3.37	-0.10	-2.12	1.74	3.09	-4.32	1.45	8.10	5.23	8.32
	Z 值	0.92	-0.06	-1.18	0.76	1.08	-0.66	0.29	1.33	0.62	0.97
枯水年 (15 a)	均值/mm	88.7	17.8	22.5	66.3	195.3	84.7	53.7	96.9	235.3	430.5
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	8.86	-1.41	3.79	4.22	15.46	-0.91	3.53	3.19	7.64	23.10
	Z 值	1.44	-0.30	0.05	0.64	1.53	-0.15	0.25	0.94	0.05	2.23*
平水年 (32 a)	均值/mm	93.0	19.8	29.2	87.0	228.9	120.5	90.8	125.7	337.1	566.0
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-2.48	0.20	-2.58	8.31	3.45	-7.79	5.54	4.46	2.21	5.66
	Z 值	-0.26	0.11	-1.64	1.99*	0.68	-0.97	1.14	1.01	0.29	1.04
丰水年 (18 a)	均值/mm	126.8	19.8	39.8	120.7	307.2	155.8	101.9	225.5	483.2	790.4
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	10.12	0.61	-4.81	-13.84	-7.92	-2.76	-8.63	12.43	1.04	-6.89
	Z 值	1.33	0.57	-0.42	-1.25	-0.34	-0.11	-2.01*	1.17	0.19	-0.42

注 *代表在 $P<0.05$ 水平趋势显著, 下同。

2.2 作物需水量

2.2.1 冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年作物需水量

图 2 为 1955—2019 年冬小麦、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年作物需水量年际变化。由图 2 可知, 商丘地区冬小麦季需水量平均为 416.7 mm, 最高值出现在 1968 年 (504.5 mm), 最低值出现在 1991 年 (330.7 mm)。夏玉米季需水量平均为 443.9 mm, 最高值出现在 1966 年 (611.2 mm), 最低值出现在 2003 年 (356.7 mm), 可发现最高值均出现在 20 世纪 60 年代, 最低值均出现在 20 世纪末期至 21 世纪初。冬小麦-夏玉米周年作物需水量总体在 703.0~1 086.3 mm 之间变化, 作物需水量平均为 860.6 mm, 最高值和最低值分别出现在 1966 年 (枯水年) 和 2004 年 (丰水年)。1955—2019 年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米作物需水量进行 Mann-Kendall 趋势检验发现, 三者分别以 6.72、18.47、25.19 mm/10 a 速率呈极显著下降趋势 ($P<0.01$), 冬小麦季下降趋势略缓于夏玉米季, 但二者的极显著下降趋势加剧了周年作物需水量的下降趋势。

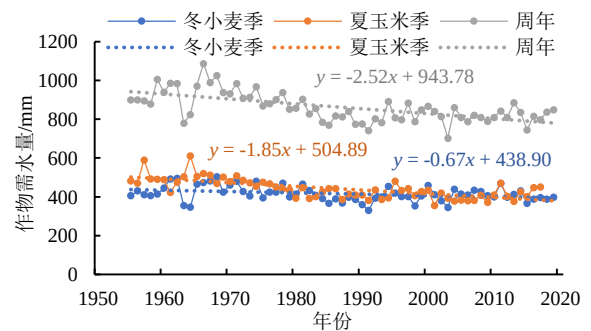


图 2 商丘地区 1955—2019 年冬小麦、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年作物需水量年际变化

Fig.2 The interannual variation of crop water requirement in the winter wheat, summer maize, and winter wheat-summer maize seasons from 1955 to 2019 in Shangqiu

2.2.2 冬小麦、夏玉米各生育阶段需水量

冬小麦、夏玉米各生育阶段需水量变化趋势指标见表 5。冬小麦抽穗—收获期需水量最高, 播种—返青期次之, 这 2 个生育阶段作物需水量占全生育期 71.41%, 1955—2019 年这 2 个生育阶段作物需水量分别以 4.67 mm/10 a 和 2.00 mm/10 a 的速率呈极显著下降趋势, 结合表 4 有效降水量的上升趋势可知, 未来这 2 个生育阶段灌溉需求可能减少。返青—拔

节期冬小麦需水量呈不显著上升趋势，拔节—抽穗期呈不显著下降趋势。结合表 4 可知，返青—拔节期、拔节—抽穗期有效降水量均呈下降趋势，且后者下降趋势高于前者，表明未来这 2 个生育阶段的

灌溉需求可能增加，而播种—返青期和抽穗—收获期灌溉需求可能减少，尤其抽穗—收获期作物需水量虽占比最大，但下降趋势也更高，未来灌溉需求可能减少。

表 5 冬小麦、夏玉米各生育阶段需水量变化及其趋势检验

Table 5 Annual variations trend of crop water requirement of winter wheat and summer maize at different growth stages

降水 年型	指标	冬小麦					夏玉米					周年
		播种—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长期	播种—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长期		
自然年 (65 a)	均值/mm	95.6	30.0	89.1	202.0	416.7	119.1	103.0	221.8	443.9	860.6	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-2.00	0.42	-0.46	-4.67	-6.72	-4.22	-4.82	-9.43	-18.47	-25.19	
	Z 值	-2.72**	1.24	-0.23	-2.86**	-2.67**	-4.58**	-4.33**	-5.41**	-6.15**	-4.90**	
枯水年 (15 a)	均值/mm	99.2	32.0	88.6	206.9	426.7	123.9	106.9	229.4	460.2	887.0	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-4.21	-1.51	-3.83	-12.02	-21.57	-4.14	-6.60	-9.49	-20.23	-41.80	
	Z 值	-2.23*	-0.94	-1.63	-2.33*	-2.92**	-1.34	-1.14	-2.03*	-2.13*	-2.82**	
平水年 (32 a)	均值/mm	96.0	30.3	90.5	206.0	422.8	117.9	101.4	222.8	442.1	864.9	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-1.06	0.63	0.29	-5.05	-5.19	-4.15	-5.84	-10.53	-20.52	-25.71	
	Z 值	-0.97	1.10	0.16	-2.53*	-1.36	-3.89**	-3.31**	-4.09**	-4.77**	-3.96**	
丰水年 (18 a)	均值/mm	92.1	27.9	86.9	190.6	397.5	117.3	102.4	213.8	433.5	831.1	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-2.47	1.12	-0.10	-0.34	-1.11	-4.27	-1.97	-6.89	-13.13	-14.24	
	Z 值	-2.31*	1.25	-0.19	-0.04	-0.64	-2.16*	-1.02	-2.08*	-2.31*	-1.17	

注 **代表在 $P<0.01$ 水平趋势显著，下同。

夏玉米各生育阶段需水量均随时间呈极显著下降趋势 ($Z<0$, $P<0.01$)，抽雄—收获期需水量最高，需水模数为 49.95%，其中 1959 年和 1966 年均超过 300 mm；由表 4 可知，拔节—收获期有效降水量呈上升趋势，且抽雄—收获期上升趋势略高于拔节—抽穗期，因此，拔节—收获期需水量的下降趋势与降水量的升高趋势有助于减少灌溉量，故拔节—收获期未来灌溉需求可能降低；而播种—拔节期，虽然作物需水量呈下降趋势，但降水量也呈下降趋势，故播种—拔节期的灌溉需求可能仍存在。

不同降水年型下冬小麦-夏玉米周年、冬小麦和夏玉米全生育期需水量排序均为枯水年>平水年>丰水年，但彼此之间相差不大。枯水年冬小麦和夏玉米各生育阶段需水量均呈下降趋势，在冬小麦季的返青—拔节期和夏玉米的播种—抽穗期下降趋势缓慢；平水年冬小麦返青—抽穗期需水量呈上升趋势，夏玉米各生育阶段需水量均呈极显著下降趋势；丰水年仅冬小麦返青—拔节期需水量呈上升趋势，而冬小麦其他生育阶段和夏玉米各生育阶段需水量均为下降趋势。

2.3 作物缺水

2.3.1 冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年缺水

图 3 为 1955—2019 年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年缺水年际变化。由图 3 可知，商丘地区冬小麦季缺水量以 9.81 mm/10 a 的速率缓慢下降 ($Z=-1.73$)。1955—2019 年冬小麦季缺水量平

均为 173.9 mm，最高值出现在 1968 年 (383.3 mm)；最低值出现在 1963 年 (-149.2 mm)，因该年有效降水量达 505.5 mm (图 1)，而需水量为 356.3 mm。1955—2019 年夏玉米季缺水量以 23.70 mm/10 a 的速率呈显著下降趋势 ($Z=-2.50$, $P<0.05$)。1955—2019 年夏玉米季缺水量平均为 89.9 mm，最高值出现在 1966 年 (503.3 mm)，最低值出现在 2003 年 (-233.7 mm)。冬小麦-夏玉米周年缺水量平均为 263.8 mm，最高值出现在 20 世纪 60 年代 (1961、1966、1968 年)，其中 1966 年缺水量最高 (817.5 mm)，2003 年缺水量最低 (-181.4 mm)；与冬小麦-夏玉米周年需水量变化趋势一致，1955—2019 年周年缺水量以 33.51 mm/10 a 的速率呈极显著下降趋势 ($Z=-2.97$, $P<0.01$)。

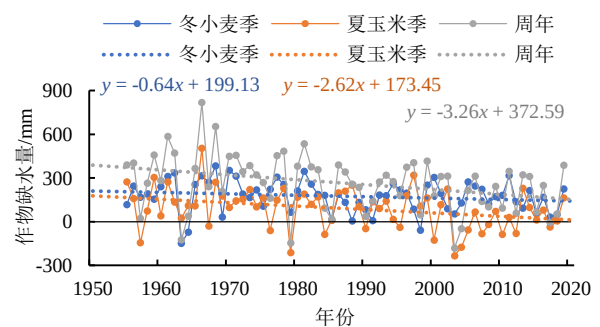


图 3 商丘地区 1955—2019 年冬小麦季、夏玉米季及冬小麦-夏玉米周年缺水年际变化

Fig.3 The interannual variation of crop water deficit in the winter wheat, summer maize, and winter wheat-summer maize seasons from 1955 to 2019 in Shangqiu

综上可知,冬小麦季、夏玉米季缺水量均呈下降趋势,夏玉米季下降趋势高于冬小麦季,表明商丘地区未来仍有一定节水空间,夏玉米季节水潜力高于冬小麦季,或可适当提高种植密度增加产量。

2.3.2 冬小麦、夏玉米各生育阶段缺水量

冬小麦、夏玉米各生育阶段缺水量变化趋势见表 6。冬小麦抽穗—收获期缺水量最高,平均缺水量为 110.4 mm,1955—2019 年缺水量以 6.42 mm/10 a 的速率缓慢下降 ($Z=-1.81$),1981 年缺水量最高

(251.4 mm),其次是 1968、1967、2001、1960、1978、1971 年,该生育阶段缺水量均超过 200 mm,缺水量较高的年份基本在 20 世纪 60—70 年代,而 2010—2019 年,抽穗—收获期缺水量均值为 94.0 mm,可能与该生育阶段需水量下降、降水量上升有关;拔节—抽穗期缺水量占冬小麦全生育期缺水量的 33.63%,1955—2019 年缺水量以 1.66 mm/10 a 的速率缓慢上升 ($Z=0.41$),返青—拔节期缺水量以 0.32 mm/10 a 速率缓慢上升 ($Z=0.66$),

表 6 冬小麦、夏玉米各生育阶段缺水量变化及其趋势检验

Table 6 Annual variations trend of crop water deficit of winter wheat and summer maize at different growth stages

降水 年型	指标	冬小麦					夏玉米					周年
		播种—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长季	播种—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长季		
自然年 (65 a)	均值/mm	-5.7	10.7	58.5	110.4	173.9	-2.9	17.6	75.1	89.9	263.8	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-5.37	0.32	1.66	-6.42	-9.81	-0.10	-6.26	-17.54	-23.70	-33.51	
	Z 值	-1.36	0.66	0.41	-1.81	-1.73	-0.21	-1.41	-2.81**	-2.50*	-2.97**	
枯水年 (15 a)	均值/mm	10.5	14.2	66.1	140.7	231.5	39.2	53.3	132.5	225.0	456.5	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-13.07	-0.11	-7.62	-16.24	-37.04	-5.05	-10.13	-12.68	-27.86	-64.90	
	Z 值	-1.83	-0.25	-1.63	-1.63	-2.62**	-0.15	-1.44	-1.24	-1.53	-2.72**	
平水年 (32 a)	均值/mm	3.0	10.5	61.3	119.0	193.9	-2.6	10.6	97.1	105.1	298.9	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	1.42	0.43	2.87	-13.36	-8.64	3.64	-11.38	-14.98	-22.73	-31.37	
	Z 值	0.13	0.39	1.20	-2.46*	-0.97	3.89	-1.88	-2.40*	-2.79**	-3.57**	
丰水年 (18 a)	均值/mm	-34.7	8.1	47.1	69.9	90.4	-38.5	0.5	-11.7	-49.7	40.7	
	气候倾向率/ (mm 10 a ⁻¹)	-12.60	0.51	4.71	14.18	6.81	-1.52	6.67	-19.32	-14.17	-7.36	
	Z 值	-1.40	0.64	0.49	1.10	0.34	-0.04	1.63	-1.70	-0.72	-0.34	

夏玉米各生育阶段缺水量与其需水量变化趋势一致,均呈下降趋势,尤其在抽穗—收获期呈极显著下降趋势 ($Z=-2.81$, $P<0.01$),这与抽穗—收获期降水量呈上升趋势和需水量呈下降趋势有关;夏玉米播种—拔节期缺水量下降速率最小,且缺水量均值为负,表明该期水分盈余,但历史仅有 23 a 出现水分盈余,且个别年份缺水量超过 100.0 mm,最近出现在 2013 年,缺水量为 103.9 mm,因此未来仍需重视播种—拔节期灌溉。

枯水年冬小麦-夏玉米周年、冬小麦和夏玉米全生育期缺水量均呈下降趋势,尤其在冬小麦季和冬小麦-夏玉米周年缺水量呈极显著下降趋势 ($P<0.01$);平水年冬小麦-夏玉米周年缺水量呈极显著下降趋势 ($P<0.01$),主要是因为平水年的冬小麦季和夏玉米季缺水量均呈下降趋势;表明未来枯水年和平水年冬小麦-夏玉米周年可减少灌溉量。丰水年冬小麦季缺水量缓慢上升,夏玉米季缺水量缓慢减少。

2.4 不同年代不同降水年型作物缺水

表 7 为 1955—2019 年、2000—2019 年和 2010—2019 年冬小麦、夏玉米不同降水年型下各生育阶段缺水量均值。由表 7 可知,1955—2019 年,冬小麦-

夏玉米周年、冬小麦和夏玉米全生育期及各生育阶段缺水量均表现为枯水年>平水年>丰水年;2000—2019 年,平水年、丰水年、枯水年分别有 11、7、2 a,冬小麦、夏玉米全生育期及冬小麦季的返青—拔节期和拔节—抽穗期、夏玉米季的播种—拔节期和抽穗—收获期阶段缺水量表现为枯水年>平水年>丰水年,冬小麦季的播种—返青期、抽穗—收获期和夏玉米季的拔节—抽穗期缺水量各降水年型排序有所变化,冬小麦播种—返青期缺水量表现为平水年>枯水年>丰水年,抽穗—收获期缺水量表现为枯水年>丰水年>平水年,夏玉米拔节—抽穗期缺水量表现为枯水年>丰水年>平水年;这种特殊的排序在 2010—2019 年冬小麦缺水量变化中仍在持续,甚至扩展到拔节—抽穗期,各降水年型缺水量表现为平水年>丰水年>枯水年,2010—2019 年 3 种降水年型下夏玉米拔节—抽穗期缺水量排序与 2000—2019 年略有不同,具体表现为丰水年>枯水年>平水年,这可能与降水量在各生育阶段的分配比例在不同降水年型下不同有关,表明以降水年型来区分降水对各生育阶段作物缺水量的影响仍不够准确,未来或可以生育阶段降水量进行不同降水年型的划分。由表 7 可知,1955—2019 年、2000—2019 年和 2010—2019 年丰

水年型下，除夏玉米拔节—抽雄期外，夏玉米全生育期及播种—拔节期、抽雄—收获期缺水均为负值，表明商丘地区未来若遇丰水年，可不灌溉；2000—2019 年平水年型下，夏玉米拔节—抽雄期缺水为负值，2010—2019 年和 1955—2019 年拔节—抽雄期缺水较小（3.6、10.6 mm），3 个时间尺度下抽雄—

收获期缺水均超过了 60 mm，表明平水年时商丘地区应考虑在抽雄期灌溉。2000—2019 年和 2010—2019 年 3 种水文年型下冬小麦播种—返青期缺水为负值或较小，这可能是由于在计算冬小麦有效降水量时考虑了播种前半月的降水所致，但也说明商丘地区冬小麦在播种—返青期缺水较少。

表 7 不同降水年型下冬小麦、夏玉米全生育期及各生育阶段缺水均值

Table 7 The mean of crop water deficit at different growth stages of winter wheat and summer maize under different precipitation years

年份	降水年型	冬小麦					夏玉米					周年
		播种—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长期	播种—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—收获期	生长期		
1955—2019 年	枯水年（15 a）	10.5	14.2	66.1	140.7	231.5	39.3	53.3	132.5	225.0	456.5	
	年平水年（32 a）	3.0	10.5	61.3	119.1	193.9	-2.6	10.6	97.1	105.1	298.9	
	丰水年（18 a）	-34.7	8.1	47.1	69.9	90.4	-38.5	0.5	-11.7	-49.7	40.7	
2000—2019 年	枯水年（2 a）	-24.4	49.3	127.3	160.9	313.1	36.9	99.5	250.6	386.9	700.0	
	年平水年（11 a）	-0.1	17.1	69.6	102.1	188.6	0.9	-16.0	64.2	49.2	237.8	
	丰水年（7 a）	-63.9	10.8	67.1	111.8	125.7	-65.6	6.2	-45.7	-105.1	20.6	
2010—2019 年	枯水年（1 a）	-9.5	29.9	34.7	169.7	224.7	31.0	46.0	86.1	163.1	387.8	
	年平水年（5 a）	10.0	22.1	67.5	69.4	169.1	18.5	3.6	67.6	89.7	258.8	
	丰水年（4 a）	-69.2	10.3	52.4	105.7	99.2	-38.0	54.2	-66.3	-50.1	49.1	

2.5 影响作物需水量的主要因子

表 8 为各气象因子在不同降水年型下的变化趋势及其对需水量的贡献率。由表 8 可知，日照时间和平均风速在不同降水年型下均呈下降趋势，相对湿度除冬小麦季和周年枯水年型时为上升趋势外，其他时段均为下降趋势，最高温度和平均温度除夏玉米季枯水年、平水年为下降趋势外，其他时段均表现为上升趋势。

表 8 不同降水年型下气象因子变化趋势及对作物需水量的影响

Table 8 Effects of meteorological factors on crop water requirement under different precipitation years

气象因子		日照 时间	平均 风速	相对 湿度	最高 温度	平均 温度	最低 温度
		贡献率/%	Z 值	贡献率/%	Z 值	贡献率/%	Z 值
周年	枯水年	25.12	-3.17**	21.69	-3.56**	15.94	0.99
		15.2	0.02	11.46	0.69	10.59	1.19
	平水年	31.17	-4.88**	26.28	-5.82**	9.38	-2.38*
		0.76	3.84**	11.09	4.00**	12.19	
	丰水年	21.56	-2.80**	19.10	-3.86**	16.79	-0.99
		14.57	2.50*	12.85	3.49**	15.12	3.56**
冬小麦季	枯水年	27.02	-3.37**	19.97	-3.37**	16.05	1.58
		13.48	0.01	11.23	1.49	12.25	1.68
	平水年	31.26	-4.23**	16.33	-5.43**	18.03	-2.68**
		2.03*	4.85**	11.28	3.91**	12.02	
	丰水年	16.21	-2.58*	12.69	-3.64**	28.16	-1.21
		3.03**	3.71**	13.48	3.71**	13.25	3.71**
夏玉米季	枯水年	23.85	-2.18*	17.23	-3.37**	17.12	0.20
		17.56	-0.50	15.4	-0.59	8.83	0.00
	平水年	27.01	-4.62**	21.26	-5.47**	12.69	1.54
		16.05	-1.75	13.18	-0.73	9.81	1.74
	丰水年	25.77	-2.58*	20.70	-4.02**	13.90	0.46
		16.04	0.68	12.43	1.36	11.17	2.20*

除冬小麦季丰水年相对湿度是作物需水量的第一影响因子外，其他年型、时段下日照时间均为第一影响因子；第二因子大部分年型和时段下均为平均风速，偶有最高温度。

对 3 种降水年型下周年需水量分析发现，影响作物需水量的第一因子和第二因子均为日照时间和平均风速，且这 2 个气象因子均呈极显著下降趋势，导致商丘地区冬小麦-夏玉米周年作物需水量呈极显著下降（枯水年、平水年）趋势；第三因子在枯水年和丰水年为相对湿度，平水年为最低温度。

对冬小麦季 3 种降水年型作物需水量影响因素分析发现，丰水年与其他降水年型不同，相对湿度为作物需水量第一影响因子，日照时间和最高温度共同为第二因子，且与其他因子差异较大；对 3 种年型下相对湿度年际变化分析发现，由于丰水年冬小麦季降水较多，且呈不显著下降趋势，而日照时间呈显著下降趋势、最高温度呈极显著上升趋势，三者共同作用导致丰水年冬小麦季需水量下降趋势不明显。其他年型下第二因子和第三因子均为相对湿度或平均风速，但 2010—2019 年商丘地区枯水年出现概率较小（仅出现 1 a），故相对湿度对冬小麦季需水量的影响不可忽视。

对夏玉米季 3 种降水年型作物需水量影响因素分析发现，第二因子除枯水年为最高温度外，其他年型均为平均风速，但枯水年平均风速和最高温度贡献率差异较小，所有降水年型下日照时间和平均风速均呈极显著或显著下降趋势，同期，夏玉米需水量呈极显著或显著下降趋势，故未来商丘地区夏玉米种植季应主要关注日照时间和平均风速的变化。

3 讨论

本研究发现, 1955—2019 年, 冬小麦需水量呈极显著下降趋势 ($P < 0.01$), 缺水量以 $9.81 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率缓慢下降 ($Z = -1.73$), 夏玉米全生育期作物需水量以 $18.47 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率呈极显著下降趋势, 缺水量以 $23.70 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率呈极显著下降趋势, 这与黄仲冬等^[8]和刘小刚等^[21]对豫东地区的分析结果一致; 夏玉米季各生育阶段需水量也呈极显著下降趋势, 且下降幅度远高于冬小麦季, 这与刘晓英等^[22]在华北地区的研究结果相同。冬小麦和夏玉米缺水量的下降均是由于其需水量的下降和降水量的上升所致, 这与黄仲冬等^[8]的研究结果一致。王景雷^[3]和孙爽等^[23]认为日照时间、平均风速和相对湿度是影响冬小麦需水量的主要因子, 本文对 3 种降水年型下作物需水量影响因子分析发现, 在丰水年, 相对湿度是首要因子, 日照时间和最高温度次之; 而其他年型, 日照时间为第一影响因子, 相对湿度或平均风速为第二影响因子; 3 种降水年型下促使夏玉米需水量下降的主要原因均是日照时间和平均风速下降。

冬小麦全生育期有效降水量相对较少, 占周年有效降水量的 40.68%, 缺水量占周年缺水量的 65.93%, 但播种—返青期在丰水年型下出现水分盈余, 表明丰水年型下降水可满足冬小麦基本出苗和前期正常生长, 孙爽等^[23]从全国尺度分析冬小麦各生育阶段需水量, 认为黄淮冬麦区冬小麦在各个生育阶段的降水均不能满足需水要求, 这可能与忽略了冬小麦播种前半月的降水有关。Zhang 等^[24]和 Fang 等^[25]指出拔节期是冬小麦水分敏感期, 本文发现冬小麦拔节前, 除枯水年缺水量较大外, 平水年和丰水年缺水量均较少, 冬小麦拔节后, 3 种降水年型下缺水量均显著上升。房全孝等^[26]指出播前灌溉是确保冬小麦出苗和苗期生长发育良好的关键举措, Xu 等^[27]研究表明, 在冬小麦拔节期、开花期各灌溉 75 mm , 可实现产量和水分利用效率最高, 本研究认为 3 种降水年型下均要在拔节—抽穗期灌溉, 尤其枯水年还需在播前灌溉。

孙晋锴等^[28]研究表明, 豫东夏玉米拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期进行 2 次灌水, 灌水定额分别为 85 、 75 mm , 可实现夏玉米稳产高产的目标。陈金平等^[29]通过田间试验发现, 夏玉米拔节期和灌浆期各灌 60 mm 可实现相对较高的产量并保持较高的水分利用效率。Fang 等^[30]和 Liu 等^[31]发现, 山东禹城夏玉米季降水丰沛, 水分渗漏和养分淋溶风险高, 后期不宜灌溉。本研究发现, 丰水年夏玉米季降水

量大, 可不予灌溉, 若遇极端降水, 则应及时采取排水措施^[32], 枯水年和平水年则需考虑在拔节—抽雄期灌溉, 此外, 枯水年应在播前灌溉保苗。灌溉制度的优化不仅是基于理论计算作物需水量和作物缺水量, 还应该考虑当地播前土壤储水量^[33-34]、土壤物理性状^[35]等因素的综合影响, 后续研究工作中将结合作物模型和田间试验进一步优化灌溉制度。

4 结论

1) 1955—2019 年, 商丘地区冬小麦季和冬小麦-夏玉米周年有效降水量仅在丰水年型下表现为下降趋势, 在平水年和枯水年则表现为上升趋势; 夏玉米季有效降水量在不同降水年型下均表现为下降趋势。冬小麦季、夏玉米季和冬小麦-夏玉米周年作物需水量在不同降水年型下均表现为下降趋势。冬小麦季缺水量仅在丰水年呈上升趋势, 在平水年和枯水年则表现为下降趋势; 夏玉米季和冬小麦-夏玉米周年缺水量在不同降水年型下均表现为下降趋势。

2) 影响冬小麦需水量的主要因子在不同降水年型下排序不同, 丰水年为相对湿度、日照时间、最高温度, 平水年为日照时间、相对湿度、平均风速, 枯水年为日照时间、平均风速、相对湿度; 影响夏玉米需水量的主要因子在丰水年和平水年均均为日照时间、平均风速、最高温度, 枯水年为日照时间、最高温度、平均风速。

3) 商丘地区丰水年应在冬小麦拔节—抽穗期灌溉, 夏玉米季可不灌溉; 平水年应在冬小麦季拔节—抽穗期灌溉, 夏玉米季在抽雄期灌溉; 枯水年应确保冬小麦和夏玉米正常出苗前提下, 还需分别在冬小麦季拔节—抽穗期和夏玉米季拔节—抽雄期灌溉。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 商丘市统计局. 商丘统计年鉴 (2020) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 白芳芳. 商丘引黄灌区水盐动态与地下水观测网络优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
BAI Fangfang. Dynamic variation of groundwater and soil salinization in the Yellow River diversion area of Shangqiu and its optimization of underground water monitoring network[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [3] 王景雷. 区域作物需水估算及管理系统研发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Jinglei. Estimation of regional crop water requirements and development of management system[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [4] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1 693-1 700.
SONG Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Temporal and spatial

- variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1 693-1 700.
- [5] 孙景生, 熊运章, 康绍忠. 农田蒸发蒸腾的研究方法与进展[J]. 灌溉排水, 1994, 13(4): 36-38.
- [6] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.
- [7] 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): 1 097-1 104.
- [8] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 等. 气候变化对河南省冬小麦和夏玉米灌溉需水量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 10-13.
HUANG Zhongdong, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. The effects of climate change on irrigation requirements of winter wheat and summer maize in Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(4): 10-13.
- [9] 李志, 赵伟, 赵明, 等. 苏北地区不同水文年冬小麦需水量与灌水量分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S1): 17-20.
LI Zhi, ZHAO Wei, ZHAO Ming, et al. Crop water requirement and irrigation water demand for winter wheat under different hydrologic years in North of Jiangsu Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S1): 17-20.
- [10] WU D, FANG S B, LI X, et al. Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat-summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 78-86.
- [11] 宋妮, 申孝军, 陈智芳, 等. 基于不同数理统计方法的河南省 ET_0 气候影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 145-156.
SONG Ni, SHEN Xiaojun, CHEN Zhifang, et al. Evaluation of meteorological factors influencing reference crop evapotranspiration based on different methods of mathematical statistics in Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 145-156.
- [12] 张力, 陈阜, 雷永登. 黄淮海地区冬小麦-夏玉米生育期内水分供需时空变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 1-10.
ZHANG Li, CHEN Fu, LEI Yongdeng. Spatial and temporal characteristics of water supply-demand during the development of winter wheat-summer maize in the Huang-Huai-Hai region[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(4): 1-10.
- [13] JIA K, YANG Y Z, DONG G L, et al. Variation and determining factor of winter wheat water requirements under climate change[J]. Agricultural Water Management, 2021, 254: 106 967.
- [14] 郑润桥, 费良军, 介飞龙, 等. 区域灌溉需水量时空变化特征及其影响因素研究: 以鲁西北地区为例[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 84-92.
ZHENG Runqiao, FEI Liangjun, JIE Feilong, et al. Spatiotemporal variation in crop demand for irrigation water and its determinants: Take Northwest Shandong Province as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 84-92.
- [15] 姬兴杰, 成林, 朱业玉, 等. 河南省冬小麦需水量和缺水量的时空格局[J]. 生态学报, 2014, 33(12): 3 268-3 277.
JI Xingjie, CHENG Lin, ZHU Yeyu, et al. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of winter wheat in Henan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12): 3 268-3 277.
- [16] ALLEN Richard G, PEREIRA Luis S, RAES Dirk, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Publications No.56, 1998.
- [17] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 193-202.
- [18] 段爱旺. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [19] 商蒙非, 赵炯超, 韩桐, 等. 1961—2020 年中国玉米需水量及水分盈亏的时空变化格局[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 22-30.
SHANG Mengfei, ZHAO Jiongchao, HAN Tong, et al. Temporal and spatial variation of maize water requirement and water surplus and deficit in China from 1961 to 2020[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 22-30.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [21] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188-197.
LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188-197.
- [22] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 155-159.
- [23] 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 Kenan, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 72-82.
- [24] ZHANG Y Q, KENDY E, YU Q, et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2): 107-122.
- [25] FANG Q X, CHEN Y H, YU Q, et al. Much improved irrigation use efficiency in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10): 1 517-1 526.
- [26] 房全孝, 王建林, 于舜章. 华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37-44.
FANG Quanxiao, WANG Jianlin, YU Shunzhang. Water-saving potential and irrigation strategies for wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 37-44.
- [27] XU X X, ZHANG M, LI J P, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 219-227.
- [28] 孙晋锡, 冯跃华, 张子敬, 等. 基于多年降水的豫东地区夏玉米灌溉制度优化[J]. 节水灌溉, 2017(11): 38-41.
SUN Jinkai, FENG Yuehua, ZHANG Zijing, et al. Summer maize irrigation schedules optimization of East Henan Province based on multi-year precipitation data[J]. Water Saving Irrigation, 2017(11): 38-41.
- [29] 陈金平, 王和洲, 刘安能, 等. 不同灌水策略对夏玉米水分利用效率和产量构成要素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 7-13.
CHEN Jinping, WANG Hezhou, LIU Anneng, et al. Impact of irrigation schedule on water use efficiency and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 7-13.
- [30] FANG Q X, YU Q, WANG E L, et al. Soil nitrate accumulation,

- leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2006, 284(1): 335-350.
- [31] LIU X J, JU X T, ZHANG F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111-124.
- [32] 俄有浩, 马玉平. 农田涝渍灾害研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(4): 12-30.
- E Youhao, MA Yuping. Advances in research on cropland waterlogging disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4): 12-30.
- [33] YANG X L, WANG G Y, CHEN Y Q, et al. Reduced groundwater use and increased grain production by optimized irrigation scheduling in winter wheat-summer maize double cropping system—a 16-year field study in North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2022, 275: 108 364.
- [34] FANG Q, WANG Y Z, UWIMPAYE F, et al. Pre-sowing soil water conditions and water conservation measures affecting the yield and water productivity of summer maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106 628.
- [35] KAN Z R, LIU Q Y, HE C, et al. Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2020, 249: 107 760.

Changes in Water Requirement and Water Deficit of Winter Wheat and Summer Maize with Precipitation in Shangqiu, Henan Province

DING Dawei^{1,2,4}, CHEN Jinping^{1,2}, SHEN Xiaojun^{2,3},

SONG Ni^{1,2*}, XIE Kun^{1,2}, REN Wen^{1,2}, WANG Jinglei^{1,2*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu/National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Shangqiu/National Long-term Agricultural Green Development Experiment and Observation Station, Shangqiu 476000, China; 3. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;

4. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: **【Objective】** Rotating winter wheat and summer maize is a common cultivation method in northern and central China. Their water consumption and the occurrence of water deficit vary with prediction. Taking Shangqiu in eastern Henan province as an example, this paper investigates the relationship between them with meteorological factors. **【Method】** The analysis was based on meteorological data measured from 1954 to 2019, and crop index data measured from 1999 to 2019 at the National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu. The evapotranspiration used in the analysis was those measured from 2011 to 2018 from a large lysimeter. Statistics and the Mann-Kendall trend test were used to analyze the changing in crop water requirement and water deficit; the dominant analysis was used to elucidate the influence of the meteorological factors on water requirement of the two crops. **【Result】** On average, the annual effective precipitation has been increasing over the past 65 years, at a rate of 3.09 mm/10a during the wheat growing season and 5.23 mm/10a during the maize growing season, despite that in wet years the effective precipitation during the wheat season declined. In contrast, the annual crop water requirement showed a decline ($P < 0.01$), at a rate of 6.72 mm/10a for the winter wheat and 18.47 mm/10a for the maize, regardless of precipitations. The annual crop water deficit had also shown a falling trend ($P < 0.01$), at a rate of 9.81 mm/10a for the winter wheat and 23.70 mm/10a for the maize, despite that it decreased for the winter wheat in wet years. In normal and dry years, sunshine was the primary meteorological factor affecting water requirement of the winter wheat, while in wet years, humidity was the primary factor. The primary factors affecting water requirement of summer maize were sunshine, regardless of precipitation, despite that wind speed and high temperature also played a role. **【Conclusion】** Our analysis revealed that in wet years, winter wheat should be irrigated during jointing - heading stage, while maize can grow under rain-fed condition. In normal years, winter wheat needs irrigation at jointing - heading stage and maize needs irrigation at tasseling stage. In dry years, in addition to an irrigation before seeding, winter wheat needs irrigation at joint-heading stage and summer maize at joint-tasseling stage.

Key words: crop water requirement; winter wheat-summer maize continuous cropping; precipitation years; meteorological factors; dominant analysis

责任编辑: 白芳芳