

## 气候变化和人类活动下玉米需水量时空特征及未来趋势

申晓晶<sup>1</sup>, 陈猷<sup>1</sup>, 栾文杰<sup>2</sup>, 周博<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193)

**摘要:** [目的] 为探究气象因素和作物种植面积变化对宁夏引黄灌区玉米需水量的影响及未来玉米需水量变化趋势。[方法] 采用Penman-Monteith公式和单作物系数法, 计算宁夏引黄灌区玉米需水量并分析其时空变化特征; 利用重标极差分析法预测未来作物需水量和灌溉需水量的时空演变趋势; 利用基于偏导数的敏感性分析和对数平均迪氏指数分解方法, 探究气象因子和种植面积变化对玉米需水量的影响并确定主要影响因素。[结果] 玉米需水量具有较为明显的空间异动性, 空间分布趋势呈现由引黄灌区中部向南北两端递增, 西南整体低于东北趋势。在对未来需水量预测中, 惠农、银川站点的作物未来需水量呈上升趋势。在考虑气象因素对玉米需水量的影响上, 相对湿度的敏感系数最高; 单位面积作物需水量和灌溉需水量随着最高气温、最低气温、风速、日照时间的上升而增加, 随着相对湿度的增加而减少。整个研究期内, 作物种植面积变化是导致玉米总需水量变化的主要因素。[结论] 玉米种植规模扩大对总需水量的增加有着较大的影响, 而气象因子对该时期的总需水量变化作用相对较小。研究结果可为气候变化背景下确定合理的作物种植结构和规模及灌区水资源适应性管理提供决策支持。

**关键词:** 气象因子; 种植面积变化; 需水量; 引黄灌区; 重标极差分析法(rescaled range analysis, R/S); 对数平均迪氏指数分解法(logarithmic mean divisia index, LMDI)

中图分类号: S271.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0243-11

## Spatial and Temporal Characteristics and Future Trends of Maize Water Requirements under Climate Change and Human Activities

SHEN Xiaojing<sup>1</sup>, CHEN You<sup>1</sup>, LUAN Wenjie<sup>2</sup>, ZHOU Bo<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed to investigate the effects of meteorological factors and crop planting area changes on maize water requirements in the Ningxia Yellow River irrigation area. [Methods] The Penman-Monteith equation and single crop coefficient method were employed to calculate maize water requirements and analyze their spatiotemporal variations in the Ningxia Yellow River irrigation area. The rescaled range analysis (R/S) method was used to predict future trends in maize water requirements. Partial derivative-based sensitivity analysis and logarithmic mean divisia index (LMDI) decomposition were utilized to examine the impacts of meteorological factors and planting area changes on maize water requirements and to identify the primary influencing factors. [Results] Maize water requirements exhibited distinct spatial heterogeneity, increasing from the central to the northern and southern ends of the irrigation area, with overall lower values in southwest than in northeast. Future water demand predictions indicated an increasing trend for maize water requirements at the Huinong and Yinchuan stations. Among meteorological factors, relative humidity showed the highest sensitivity coefficient. Unit-area maize water requirements increased with rising maximum temperature, minimum

收稿日期: 2025-02-13

修回日期: 2025-04-01

录用日期: 2025-04-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 宁夏自然科学基金优秀青年基金项目(2024AAC05048); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600)

第一作者: 申晓晶(1989—), 女, 讲师, 博士, 研究生导师, 主要从事气候变化与水资源安全调控研究。E-mail: sxj15191418250@126.com

通信作者: 申晓晶(1989—), 女, 讲师, 博士, 研究生导师, 主要从事气候变化与水资源安全调控研究。E-mail: sxj15191418250@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

temperature, wind speed, and sunshine hours, but decreased with increasing relative humidity. Throughout the study period, changes in crop planting area were the primary factor driving variations in total maize water requirements. [Conclusion] The expansion of maize planting scale has a significant impact on the increase of total water requirements, while meteorological factors play a relatively minor role in the variation of total water demand during this period. The research findings can provide decision-making support for determining rational crop planting structures and scales, as well as adaptive water resource management in irrigation areas under climate change scenarios.

**Keywords:** meteorological factors; planting area changes; water requirements; Yellow River irrigation area; rescaled range analysis (R/S); logarithmic mean division index (LMDI)

Received: 2025-02-13

Revised: 2025-04-01

Accepted: 2025-04-30

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

随着全球气温的升高和极端气候频率的加剧,气候变化对水循环和农业生产有相当大的影响,并直接关系到区域粮食和水资源安全<sup>[1]</sup>。了解气候变化对作物需水量的影响,可帮助人类更好地预测和适应不确定的气候条件,采取相应的农业措施来减轻农作物的水分胁迫风险。同时,由于人口的不断增加,城市化进程的推进等人类活动对环境和生态系统产生深远的影响<sup>[2]</sup>,尤其是农业的扩张和变化,对玉米种植面积产生显著影响。了解种植面积变化对玉米需水量的影响,有助于制定可持续农业发展策略,平衡粮食供应和水资源利用间的关系。

宁夏北部引黄灌区依赖于过境的黄河水,黄河水占总供水量的 90% 以上,同时,宁夏引黄灌区是西北内陆地区重要的粮食生产基地之一<sup>[3]</sup>,对水资源的依赖性很强,大量的农业用水加剧水资源的压力。以往研究<sup>[4]</sup>表明,气候变化和种植面积变化对包括灌溉在内的水循环产生重要的影响,表明在气候变化的影响下,宁夏北部引黄灌区的水资源可能更加敏感和脆弱。

精确估计作物需水量(crop water requirement, CWR)和灌溉需水量(irrigation water requirement, IR),并全面了解它们对气象因素和人类活动的响应(如作物面积变化)对提高农业效率、节约水资源、应对气候变化、保护环境、支持决策和管理规划,实现可持续农业和水资源利用,确保环境变化下的可持续水资源管理方面具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前,已有大量关于 CWR 和 IR 的研究<sup>[6-7]</sup>,包括对时空变化、影响因素的探究和对未来的模拟。其计算方法主要包括作物系数法和作物生长模型法<sup>[8-9]</sup>。BOONWICHAI 等<sup>[10]</sup>在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,利用 DSSAT 作物模型分析气候变化对泰国 Songkhram 流域水稻的灌溉水需水量、产量和作物水分生产率的影响表明,到 21 世纪 80 年代(2070—

2094 年),最高和最低气温预计上升 1.9 °C;降雨量在 2020—2044 年降低,2045—2094 年增加,虽然总降雨量增加,但是水稻发育阶段的降水量将减少。降水量的变化对水稻产量的影响比温度更为显著。GABR<sup>[11]</sup>分别在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,研究气候变化如何影响埃及上部地区未来的灌溉需求。利用 CROPWAT 模型,根据预测的气候,估算研究区主要作物的参考蒸散量(CWR)和净灌溉需水量(NIWR)表明,在 RCP4.5 情景下,2023—2080 年和 2081—2100 年的 NIWR 分别增加 5.1% 和 5.9%;在 RCP8.5 情景下,2023—2080 年和 2081—2100 年的 NIWR 分别增加 7.7% 和 9.7%。同时,土地利用变化也对 CWR 和 IR 在时间和空间上产生影响,TIAN 等<sup>[12]</sup>对中亚地区 2 种主要作物(棉花和冬小麦)在 2 种气候变化情景(RCP2.6, 4.5)下,CO<sub>2</sub> 施肥和土地利用变化对中亚 IR 的影响表明,在 RCP2.6 情景下,棉花和冬小麦的 IR 在 21 世纪 20 年代到 21 世纪 40 年代呈上升趋势,而在 21 世纪 60 年代到 21 世纪 80 年代呈下降趋势。在 RCP4.5 情景下,中亚大部分地区的增幅不到 5%。土库曼斯坦的 IR 对土地利用最为敏感。然而,以往的研究主要集中在气候变化或土地利用变化单一方面的影响。相比之下,从 2 个方面对 CWR 和 IR 变化的贡献分析和主要驱动因素的研究仍有待加强。此外,灌区尺度的研究难以从行政角度提供有效的水资源管理措施。因此,当务之急是在灌区尺度上分析水资源需求的变化以应对气候的不断变化。

利用气象数据估算玉米单位面积 CWR 和 IR,分析自 2000—2020 年玉米单位面积 CWR 和 IR 的时空变化特征及其对最高气温、最低气温、相对湿度、日照时间、风速等气象因子的敏感性。同时,计算出 CWR 和 IR 的总量,探讨 CWR 和 IR 的时空变化规律。最后,定量分析气象因子和作物面积的变化对

CWR和IR总量变化的贡献度,明确主要驱动因素并对其产生的影响进行评价,以期为提高农业生产效率和可持续性,减缓气候变化带来的影响,实现有效的农业水资源管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宁夏引黄灌区(图1)位于中温带干旱区(37°30′~39°30′N,105°30′~106°50′E),该地区以大陆性气候为主,具有显著的干旱特征。全年日照充足,昼夜温差显著,无霜期较长。从降水情况来看,年降雨量为180~200 mm,且季节分布不均衡,呈明显的早雨季差异。与此同时,该地区年蒸发量高达1 100~1 600 mm,远超降水量。年平均气温为8~9℃。年平均日照时间2 800~3 100 h;无霜期长达164 h。目前,宁夏全区的水资源总量约为 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,人均水资源储量为 $160 \text{ m}^3$ 。宁夏已经成为我国干旱缺水最严重的地区之一。玉米在宁夏粮食生产中占据十分重要的地位,其中玉米位于粮食作物之首,产量占比超过粮食总产量的50%。玉米一般在5月上旬播种,9月中下旬收获。

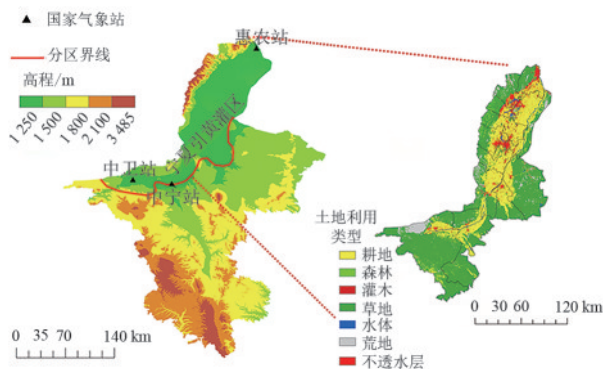


图1 研究区位置

Fig. 1 Geographical location of the research area

### 1.2 数据来源

本研究采用的气象数据源自中国气象局国家气象科学数据中心发布的高质量地面观测数据集(中国地面气候资料日值数据集V3.0)(<https://data.cma.cn/date>)。数据获取时段覆盖2000—2020年,空间范围包含引黄灌区5个具有代表性的国家级气象观测站点(惠农、银川、陶乐、中卫和中宁)。数据集包含日最高/最低气温、相对湿度、日照时间、风速及降水量等关键气象要素的逐日观测值,分析宁夏北部引黄灌区气候变化特征。作物面积数据来源于宁夏回族自治区统计局官网(<https://tj.nv.gov.cn>)。所选取引黄灌区的5个气象站点基本信息见表1。

表1 宁夏引黄灌区气象站点基本信息

Table 1 Basic information of meteorological stations in the Ningxia Yellow River irrigation area

站点编号	站名	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	海拔高度/m
53519	惠农	106.77	39.22	1 092.50
53614	银川	106.20	38.47	1 110.90
53615	陶乐	106.70	38.80	1 101.60
53704	中卫	105.18	37.53	1 225.70
53705	中宁	105.68	37.48	1 183.40

### 1.3 研究方法

1.3.1 作物需水量计算 使用联合国粮食及农业组织推荐的方法<sup>[13]</sup>计算作物需水量(CWR),该方法具有较好的通用性和稳定性,在实际工程应用中已获得大规模推广使用,计算公式为:

$$CWR_c = K_c CWR_0 \quad (1)$$

式中: $CWR_c$ 为充分供水条件下的作物需水量,mm/d; $K_c$ 为作物系数; $CWR_0$ 为参考作物蒸散量,mm/d。

参考作物蒸散量采用Penman-Monteith公式计算:

$$CWR_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中: $CWR_0$ 为参考作物蒸散量,mm/d; $R_n$ 为到达作物表面的净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ; $G$ 为土壤热通量密度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ; $T$ 为作物冠层2 m高处的空气温度,℃; $U_2$ 为2 m高度处的风速,m/s; $e_d$ 为饱和水汽压,kPa; $e_a$ 为实际水汽压,kPa; $\Delta$ 为饱和水汽压与温度关系曲线斜率, $\text{kPa}/\text{℃}$ ; $\gamma$ 为干湿常数。其中 $R_n$ 、 $G$ 、 $\Delta$ 、 $U_2$ 可通过气象台站观测资料计算求得<sup>[13]</sup>。

1.3.2 作物系数的确定 本研究采用国际通用的FAO—56(1998)标准的作物系数计算方法,即基于生育期划分的分段单值平均法。该方法将作物生育过程划分为4个关键阶段:1)初始生长期(播种至冠层覆盖率达10%),对应基础作物系数 $K_{Cini}$ ;2)快速发育期(覆盖率达10%至充分覆盖), $K_C$ 值由 $K_{Cini}$ 线性递增至 $K_{Cmid}$ ;3)生育中期(从充分覆盖到成熟期开始),维持 $K_{Cmid}$ 峰值水平;4)成熟期(叶片黄化至生理成熟), $K_C$ 值从 $K_{Cmid}$ 线性递减至 $K_{Cend}$ 。本研究根据玉米的生长发育特性,将试验区内的玉米生长周期划分为4个关键阶段:初始生长期(播种至出苗阶段)、快速生长期(出苗至抽雄阶段)、生殖生长期(抽雄至乳熟阶段)和成熟期(乳熟至成熟阶段)。

一般来说, $K_C$ 主要是针对半湿润气候条件下的平均值(最小相对湿度45%,平均风速为2 m/s)通常在不同区域使用时需要根据当地土壤、气候和作物

高度进行修订。根据宁夏气候条件对  $K_C$  值进行修订,计算公式为:

$$\begin{aligned} & \text{当 } K_{C_{\text{end}}} \geq 0.45 \text{ 时} \\ & K_{C_{\text{mid}}} = K_{C_{\text{mid}(\text{tab})}} + \left[ 0.04(U_2 - 2) - \right. \\ & \quad \left. 0.04(\text{RH}_{\text{min}} - 45) \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & K_{C_{\text{end}}} = K_{C_{\text{end}(\text{tab})}} + \left[ 0.04(U_2 - 2) - \right. \\ & \quad \left. 0.04(\text{RH}_{\text{min}} - 45) \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{当 } K_{C_{\text{end}(\text{tab})}} < 0.45 \text{ 时} \\ & K_{C_{\text{end}}} = K_{C_{\text{end}(\text{tab})}} \end{aligned} \quad (5)$$

$K_{C_{\text{mid}(\text{tab})}}$  和  $K_{C_{\text{end}(\text{tab})}}$  为修订前的生育中期和成熟期的作物系数;  $K_{C_{\text{mid}}}$  和  $K_{C_{\text{end}}}$  为修订后生育中期和成熟期的作物系数;  $\text{RH}_{\text{min}}$  为该生育阶段内日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, m; 其余符号含义同前。

作物系数 ( $K_C$ ) 计算主要来自相关试验数据, 选有代表性的试验数据为该生育阶段的  $K_C$ 。玉米各生长期作物系数见表 2。

表 2 玉米各生长期作物系数

Table 2 Crop coefficients for maize by growth period

生育期	日期(月-日)	时间/d	$K_C$
播种	04-20—04-30	11	0.20
出苗	05-01—05-10	10	0.30
三叶	05-11—05-20	10	0.40
七叶	05-21—05-31	11	0.50
七叶-拔节	06-01—06-10	10	0.60
拔节	06-11—06-20	10	0.80
拔节-抽雄	06-21—06-30	10	0.90
抽雄	07-01—07-10	10	1.00
开花-乳熟	08-01—08-10	10	1.00
乳熟	08-11—08-20	10	0.90
乳熟-成熟	08-21—08-31	11	0.80
成熟	09-01—09-10	10	0.70

1.3.3 灌溉需水量计算 单位面积灌溉需水量 ( $\text{IR}_a$ ) 定义为单位面积作物需水量 ( $\text{CWR}_a$ ) 与有效降水量的差值<sup>[13]</sup>, 计算公式为:

$$\begin{aligned} & \text{IR}_a = \begin{cases} \text{CWR}_c - P_e & \text{CWR}_c \geq P_e \\ 0 & \text{CWR}_c < P_e \end{cases} \quad (6) \\ & P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & P \leq 8.3 \text{ mm} \\ 4.17 + 0.1P & P > 8.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中:  $\text{IR}_a$  为灌溉需水量, mm;  $\text{CWR}_c$  为作物需水量, mm;  $P_e$  为有效降水量, mm;  $P$  为日降水量, mm。

利用插值方法和分区统计方法计算各个市、区

单位面积需水量。各市、区玉米总需水量由单位面积需水量乘以作物面积确定。

$$\text{CWR} = \text{CWR}_a \times S_{\text{crop}} \quad (8)$$

$$\text{IR} = \text{IR}_a \times S_{\text{crop}} \quad (9)$$

式中:  $S_{\text{crop}}$  为种植作物面积,  $\text{km}^2$ 。

1.3.4 基于偏导数的敏感性分析 MCCUNEN 等<sup>[14]</sup>于 1974 年首次提出敏感性系数, 将气象因子对 CWR 和 IR 的变化无量纲化, 使得比较 CWR 和 IR 对单个气象因子的敏感性变得简单可行。相对敏感性系数 ( $S$ )<sup>[15]</sup> 计算公式为:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \times \frac{|X|}{Y} \quad (10)$$

式中:  $S$  为需水量对气象因子的敏感系数, 无量纲。  $\Delta X$  为气象因子的相对变化;  $\Delta Y$  为  $\Delta X$  引起的需水量的相对变化。

敏感度是通过对每个气象因素进行 10% 的改变进行计算的, 而其他因素保持不变。敏感性系数的符号和数值分别表征需水量对气象因子变化的响应特征。具体而言, 系数的正负值反映需水量与气象要素的协同变化关系, 正值指示二者呈同向变化 (即气象要素值增加时需水量相应增加, 反之亦然); 而系数绝对值的大小则体现响应强度, 绝对值越大, 表明需水量的敏感性越显著。本研究采用以  $S_{\text{max}}$  (日最高温度敏感系数)、 $S_{\text{min}}$  (日最低温度敏感系数)、 $S_w$  (风速敏感系数)、 $S_n$  (日照敏感系数)、 $S_{\text{RH}}$  (相对湿度敏感系数)。基于 4—9 月逐日气象观测数据, 计算各站点的日尺度敏感系数, 再通过空间平均法获得整个研究区域的综合敏感系数。

1.3.5 R/S 分析法 利用重标极差分析法 (rescaled range analysis, R/S) 预测区域未来需水量变化趋势。作为一种基于时间序列的非线性统计方法, R/S 分析通过计算 Hurst 指数, 能很好地判断并揭示时间序列中的趋势性成分, 可反映出时间序列的可持续性。

对于一定时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t=1, 2, \dots$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$ , 定义其平均值为:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (11)$$

累计离差为:

$$X(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (12)$$

极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (13)$$

标准差为:

$$S(\tau) = \sqrt{\left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (14)$$

现考虑比值  $\frac{R(\tau)}{s(\tau)} \triangleq \frac{R}{S}$ , 若存在  $\frac{R}{S} \propto \tau^H$ , 则说明

所分析的气象要素时间序列中, Hurst 现象是存在的,  $H$  即为 Hurst 指数。

对于不同的 Hurst 指数 ( $0 < H < 1$ ), 存在不同情况: 当  $H = 0.5$  时, 表明该序列具有随机游走特性, 即前后数据点之间不存在相关性; 当  $0.5 < H < 1$  时, 表示时间序列是连续的, 未来趋势与过去的趋势一致, 且随  $H$  值趋近于 1, 正向持续性逐渐增强; 当  $0 < H < 0.5$  时, 则意味时间序列是反连续的, 未来趋势与过去相反,  $H$  值越接近 0, 其反持续性表现越显著<sup>[16]</sup>。

1.3.6 对数平均迪氏指数分解方法 (LMDI) 对数平均迪氏指数分解方法 (logarithmic mean division index, LMDI) 在分解对象后没有无法解释的残差, 是一种比较完全的分解方法, 可有效避免伪回归问题<sup>[17]</sup>。它可使用相对简单的转换表达式, 加法分解和乘法分解, 并且还可处理零值的存在。因此, LMDI 被广泛用于定量识别不同因素对能源消耗的影响<sup>[18]</sup>。然而, LMDI 模型尚未在水资源领域得到广泛的应用, LI 等<sup>[19]</sup>采用 LMDI 分解法分析 4 个因素 (水分利用效率、生产力、种植结构、生产规模) 对我国 5 种作物农业需水量的贡献。虽然有学者使用 LMDI 方法来分析不同因素的影响程度, 但是很少有研究者来分析各个驱动因素对农业用水的定量贡献。

LMDI 分解模式有加法模式和乘法模式 2 种<sup>[20]</sup>, 2 种模式通过一定数学方法可以相互转化。本研究利用加法模式进行分解, 单位面积需水量 ( $CWR_a$  和  $IR_a$ ) 和玉米种植面积的变化是引起 CWR 和 IR 变化的 2 个主要原因; 而  $CWR_a$  和  $IR_a$  变化则主要由气象因素引起的。LMDI 分解模型是在先前研究<sup>[21]</sup>的基础上建立的, 计算公式为:

$$\Delta I = \Delta I_m + \Delta I_{area} \quad (15)$$

$$\Delta I_m = \frac{I_T - I_{T-1}}{\ln I_T - \ln I_{T-1}} \ln \frac{I_{m,T}}{I_{m,T-1}} \quad (16)$$

$$\Delta I_{area} = \frac{I_T - I_{T-1}}{\ln I_T - \ln I_{T-1}} \ln \frac{S_{crop,T}}{S_{crop,T-1}} \quad (17)$$

式中:  $\Delta I$  为 CWR 或 IR 的变化;  $\Delta I_m$  和  $\Delta I_{area}$  分别为气象因素和作物种植面积变化的影响;  $I_T$  和  $I_{T-1}$  分别为  $T$  a 和  $T-1$  a 的 CWR 或 IR;  $I_{m,T}$  和  $I_{m,T-1}$  分别为  $T$  a 和  $T-1$  a 的  $CWR_a$  或  $IR_a$ ;  $S_{crop,T}$  和  $S_{crop,T-1}$  分别为  $T$  a 和  $T-1$  a 的作物种植面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象因素的变化

通过对 1999—2020 年引黄灌区主要气象因子的变化特征进行分析 (表 3), 年最高气温呈上升趋势,

年最低气温上升较为显著, 趋势为  $0.054 \text{ } ^\circ\text{C/a}$ ; 多年平均最高温和最低温分别为  $17.33$ 、 $4.15 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; 年相对湿度和风速呈显著下降趋势, 多年平均相对湿度和风速分别为  $49.95\%$  和  $2.27 \text{ m/s}$ ; 年降雨量呈增加趋势, 为  $0.005 \text{ 1/a}$ , 多年平均降雨量  $0.51 \text{ mm}$ 。

表 3 1999—2020 年引黄灌区主要气象要素的变化特征  
Table 3 Characteristics of changes in major meteorological factors in the Yellow River irrigation area from 1999 to 2020

特征	最高气温	最低气温	风速	降雨量	日照时间	相对湿度
趋势	增加	显著增加	显著降低	增加	降低	显著降低
幅度	0.040	0.054	-0.058	0.005	-0.012	-0.262
平均值	17.33	4.15	2.27	0.51	8.03	49.95

### 2.2 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 的时空变化及其敏感性分析

2.2.1 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 的时空变化 从空间角度看, 1999—2020 年玉米需水量具有较为明显的空间异动性 (图 2),  $CWR_a$  变化为  $342.12 \sim 627.49 \text{ mm}$  (平均值为  $357.02 \text{ mm}$ )。银川和陶乐地区  $CWR_a$  普遍较低, 可能由于银川、陶乐地区最高气温、风速、日照时间均处于较低水平, 蒸散发量较少, 使得  $CWR_a$  较低; 惠农地区作物需水量显著偏高, 主要归因于其特有的气候特征: 持续频繁的大风条件、降水偏少、太阳辐射强烈、空气湿度低及强烈的蒸散作用, 共同导致较高的  $CWR_a$ 。整体上,  $CWR_a$  空间分布趋势呈由引黄灌区中部向南北两端递增, 西南整体低于东北趋势。

同理,  $IR_a$  与  $CWR_a$  具有同样的变化趋势,  $IR_a$  变化为  $293.50 \sim 574.01 \text{ mm}$  (平均值为  $370.44 \text{ mm}$ )。  $IR_a$  最大的区域主要位于惠农东北部, 该地区毗邻黄河, 风速是影响灌溉需水量的主要原因, 中卫地区同样呈干旱特征, 受持续干燥气候和频繁大风天气影响, 大气中难以形成足够的成云条件, 导致 IR 值维持在较高水平;  $IR_a$  较低的区域主要位于银川、陶乐地区, 由于常年气候较为湿润, 相对湿度较大等因素使得  $IR_a$  较低。

从时间角度看 (图 3), 1999—2020 年  $CWR_a$  整体呈下降趋势, 局部存在小幅度的上升趋势。1999—2004 年,  $CWR_a$  处于快速下降阶段, 2005—2011 年,  $CWR_a$  处于波动阶段, 2012—2020 年,  $CWR_a$  处于小幅度上升阶段。其中,  $CWR_a$  在 1999 年达到最大值, 最大值为  $627.49 \text{ mm}$ , 2012 年达到最小值, 最小值为  $342.12 \text{ mm}$ 。同理,  $IR_a$  总体也呈下降趋势, 在 1999 年  $IR_a$  达到最高值  $574.01 \text{ mm}$ , 在 2012 年  $IR_a$  达到最低值  $293.50 \text{ mm}$ 。在 1999—2020 年里, 因为除去有效降雨量的原因,  $IR_a$  普遍低于  $CWR_a$ , 2007 年后  $CWR_a$  低于平均值, 且其递减速率明显超过 IR, 表明区域降水条件改善, 降水量呈持续增长态势。偏向湿润化, 使  $CWR_a$  降低, 与表 3 相吻合。

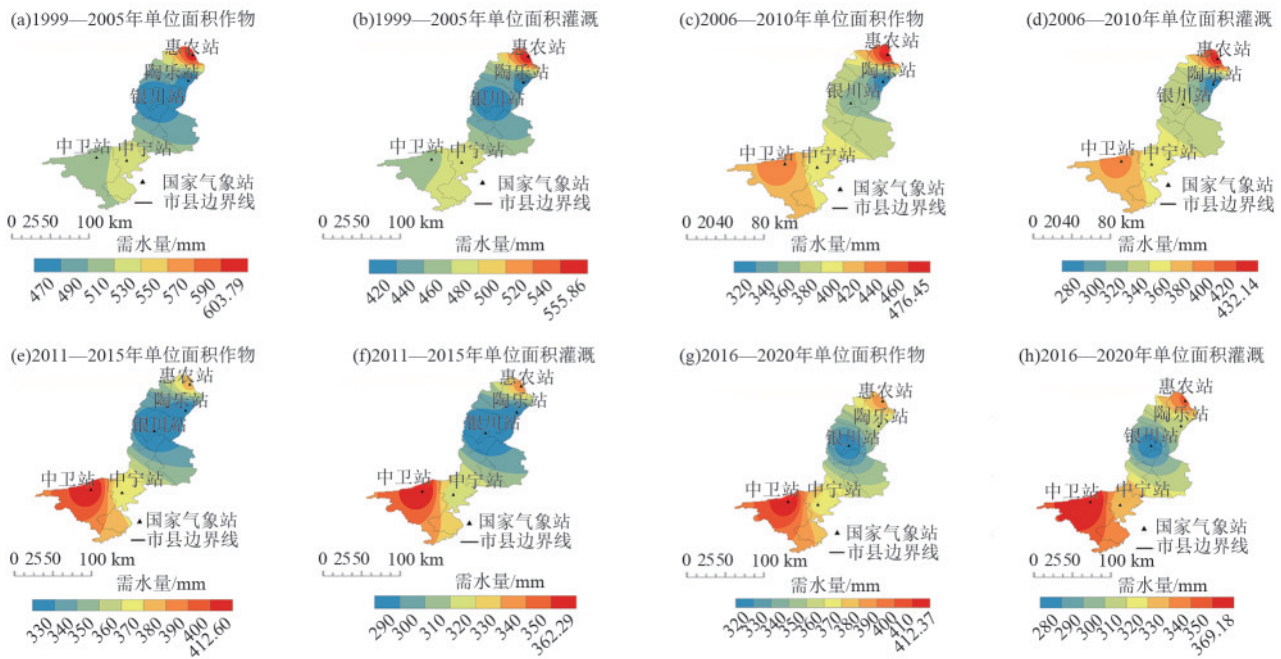


图 2 玉米生育期内多年 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of multi-year CWR<sub>a</sub> and IR<sub>a</sub> over the maize reproductive period

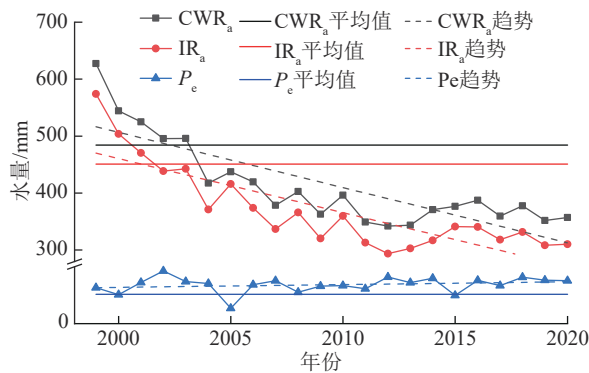


图 3 玉米 CWR<sub>a</sub>、IR<sub>a</sub>、P<sub>e</sub> 多年变化趋势

Fig. 3 Multi-year trends in CWR<sub>a</sub>, IR<sub>a</sub> and P<sub>e</sub> for maize

2.2.2 作物生长季 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 对主要气象因子的响应 以敏感系数<sup>[22]</sup>来反映气象因素对参考作物需水量的影响。通过敏感系数大小将敏感程度分为 4 个等级,分别为忽略不计(0.00 ≤ |S<sub>r</sub>| < 0.05)、中等(0.05 ≤ |S<sub>r</sub>| < 0.20)、高(0.20 ≤ |S<sub>r</sub>| < 1.00)、非常高(|S<sub>r</sub>| > 1.00)。

从表 4、表 5 可以看出,研究区作物需水量对 5 大气象因子的敏感性分析显示,各因子的敏感系数排序为相对湿度最高,其后依次为风速、日照时间、日最高气温,而日最低气温的敏感性最弱。陶乐地区的 CWR<sub>a</sub> 对最高气温、日照时间、相对湿度的敏感系数较引黄灌区其他地区更高表明,陶乐地区的 CWR<sub>a</sub> 更容易受到最高气温、日照时间、相对湿度变化的影响。中宁地区的 IR<sub>a</sub> 对最低气温、风速的敏感系数较引黄灌区其他地区更高,表明中宁地区的 IR<sub>a</sub> 更容易受到最低气温和风速变化的影响。最高气温、最低气温、风速、日照时间在整个研究区内的敏感系数均

为正值,表明 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 随着最高气温、最低气温、风速、日照时间的上升而增加;相对湿度敏感系数在整个研究区内均为负值,即随着相对湿度的增加,CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 随之降低。

表 4 研究区域内气象要素对 CWR 的敏感系数

Table 4 Sensitivity coefficients of meteorological factors to CWR in the study area

气象站点	S <sub>tmax</sub>	S <sub>tmin</sub>	S <sub>w</sub>	S <sub>n</sub>	S <sub>RH</sub>
惠农	0.41	0.10	0.48	0.45	-0.53
陶乐	0.44	0.09	0.47	0.58	-0.71
银川	0.43	0.13	0.50	0.55	-0.66
中宁	0.43	0.13	0.51	0.44	-0.54
中卫	0.42	0.10	0.48	0.42	-0.52

表 5 研究区域内气象要素对 IR 的敏感系数

Table 5 Sensitivity coefficients of meteorological factors to IR in the study area

气象站点	S <sub>tmax</sub>	S <sub>tmin</sub>	S <sub>w</sub>	S <sub>n</sub>	S <sub>RH</sub>
惠农	0.31	0.08	0.37	0.34	-0.40
陶乐	0.30	0.06	0.32	0.39	-0.48
银川	0.29	0.09	0.34	0.37	-0.45
中宁	0.31	0.09	0.37	0.32	-0.39
中卫	0.32	0.07	0.36	0.31	-0.39

### 2.3 CWR<sub>a</sub> 与 IR<sub>a</sub> 趋势预测

引黄灌区 CWR<sub>a</sub> 预测值在空间上呈明显差异性,整体上,惠农、银川站点的作物未来需水量呈上升趋势;陶乐、中宁、中卫 CWR<sub>a</sub> 在未来呈下降趋势。惠农、银川等地区,预测值 < 0.5 (图 4a),表明未来 CWR<sub>a</sub> 与现阶段呈相反的变化趋势;其中,惠农 Hurst 指数更接近 0,反持续性更强;陶乐、中宁、中卫地区 Hurst 指数较大,表明该区域未来玉米生育期需水量

变化与现阶段一致。引黄灌区整体呈下降趋势,局部存在小幅度的上升趋势。

IR<sub>a</sub> 预测值(图 4b)与 CWR<sub>a</sub> 基本一致,在银川和惠农地区的变化特征最为显著,预示着该区域未来

将呈明显上升态势。从空间分布格局来看,南部地区的生长趋势较北部更为突出。多数区域的未来 IR<sub>a</sub> 变化趋势与历史规律保持一致,陶乐地区 IR<sub>a</sub> 的趋势与未来的趋势保持较高的一致性。

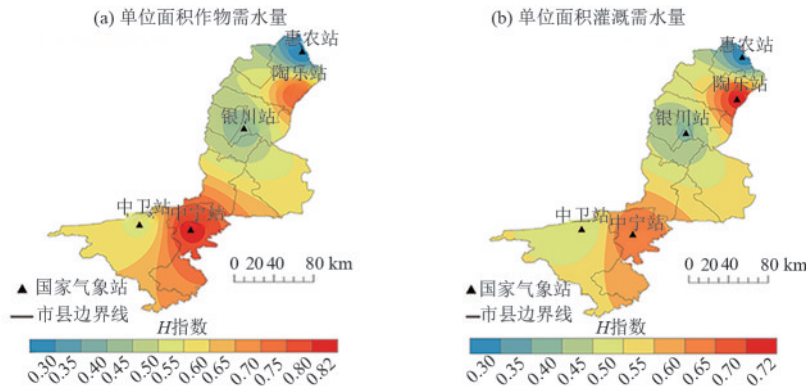


图 4 玉米 CWR<sub>a</sub> 和 IR<sub>a</sub> 的 H 指数分布

Fig. 4 H-index distribution of CWR<sub>a</sub> and IR<sub>a</sub> of maize

### 2.4 CWR 和 IR 的时空变化及其驱动因素

2.4.1 CWR 和 IR 的时空变化 作为人类的主要活动之一,耕作导致作物种植面积产生变化,土地利用方式的转变,特别是耕作区与非耕作区之间的相互转化,作物的种植强度变化引起作物需水量的变化,对农业水资源产生较大的影响。宁夏回族自治区结合当地玉米产业发展实际,提出坚持稳定粮食产量,适度微调面积,加大优化种植结构调整力度,压减旱作小麦,扩大玉米种植面积。玉米种植面积从 2000 年 91 219 km<sup>2</sup> 增加到 2020 年 200 189 km<sup>2</sup> (图 5)。2000—2020 年玉米种植面积整体呈上升趋势,其中 2015 年种植面积达到峰值 203 963 km<sup>2</sup>。受到单位面积需水量和作物面积的影响,玉米 CWR 从 2000 年的 4.97×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> 变化为 2020 年的 7.15×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>, 2002 年为最小值 4.71×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。

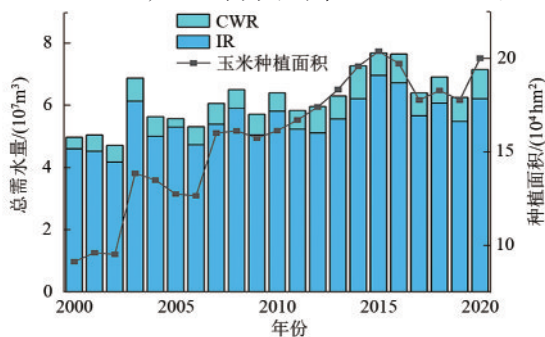


图 5 2000—2020 年引黄灌区玉米种植面积及总需水量变化  
Fig. 5 Changes in maize planting area and total water requirement in the Yellow River Irrigation Area from 2000 to 2020

从城市尺度上看(图 6),同心、中宁、平罗的玉米种植面积均大于其他城市,均>25 000 km<sup>2</sup>;银川、贺兰、石嘴山、灵武的玉米种植面积则要小很多。从种植面积变化上看,2000—2020 年,大部分城市玉米种植面

积呈增加趋势,其中,青铜峡、平罗、中宁、同心增幅较大,增幅均超过 10 000 km<sup>2</sup>;同心增幅最大,增幅为 23 433 km<sup>2</sup>;贺兰的玉米种植面积呈下降趋势,由 2000 年的 10 496 km<sup>2</sup> 减小为 6 233 km<sup>2</sup>。

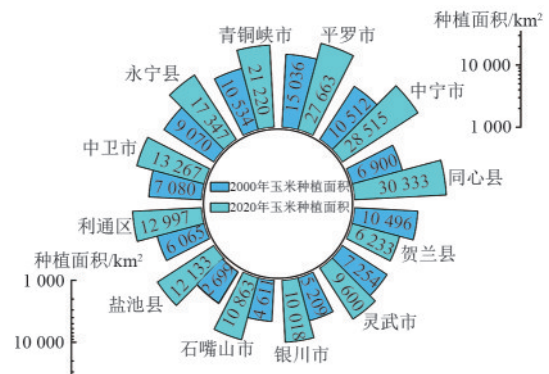


图 6 2000—2020 年引黄灌区不同城市玉米种植面积变化  
Fig. 6 Changes in maize planting area in different cities of the Yellow River Irrigation Area from 2000 to 2020

2.4.2 CWR 和 IR 的驱动因素分析 对引黄灌区 2001—2020 年 CWR 和 IR 在 LMDI 加法分解模式下进行因素分解,计算种植面积变化、气候变化对需水量变化的效应值,有助于量化研究区域内引起总需水量变化的主要驱动因素。由表 6、表 7 可看出,气象因子和作物种植面积变化对玉米 CWR 和 IR 变化的贡献随时间变化较为明显。在研究期间的累计贡献方面,气候变化和种植面积变化对总 CWR 变化的效应值分别为 -1.02×10<sup>7</sup>、1.87×10<sup>7</sup>;气候变化和种植面积变化对总 IR 变化的效应值分别为 -0.94×10<sup>7</sup>、1.64×10<sup>7</sup>。总体来看,2009 年以来,玉米种植面积增加对总需水量的增加有着较大的影响,与图 6 中 2009 年作物种植面积呈连续增长相对应,而气象因子对该时期的总需水量变化的作用相对较小。

表 6 2001—2020 年引黄灌区总 CWR 变化的 LMDI 加法分解结果

Table 6 Results of LMDI additive decomposition of total CWR changes in the Yellow River Irrigation Area from 2001 to 2020  $10^5 \text{ m}^3$ 

年份	惠农		陶乐		银川		中宁		中卫	
	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$
2001	-1.10	2.25	-4.66	2.22	0.71	0.19	-3.49	-5.68	-1.54	-2.07
2002	-1.28	1.37	-3.21	-1.20	-1.24	2.86	-6.76	0.40	-5.34	-1.11
2003	0.50	9.80	0.79	11.64	1.54	24.92	0.28	19.31	-2.50	12.87
2004	-8.63	0.34	-27.40	10.89	-4.72	-19.17	-10.48	-10.09	1.30	-4.48
2005	2.53	-3.88	-0.94	-4.93	1.54	-0.35	1.99	5.07	2.18	0.06
2006	-1.89	-3.22	-2.89	-2.54	-0.22	-3.16	-4.68	2.54	-0.07	-4.49
2007	-2.31	11.20	-1.04	12.78	-6.18	26.68	-4.35	18.97	-7.15	1.99
2008	3.81	3.64	3.90	5.79	-1.23	-7.62	6.37	2.14	2.48	-2.98
2009	-9.70	-5.10	-4.61	-1.70	1.14	-0.81	-8.45	-0.63	-1.73	1.52
2010	9.19	4.51	6.86	8.30	-1.99	4.64	2.17	4.43	2.25	0.92
2011	-12.10	1.69	-5.59	2.23	0.49	2.41	-6.91	8.89	-3.47	1.39
2012	0.45	1.91	-1.35	3.88	-4.18	-1.01	-1.47	12.06	0.33	5.56
2013	-2.94	0.84	-0.70	8.82	0.29	-1.11	4.33	4.15	2.28	6.23
2014	5.54	2.56	15.79	1.64	1.79	4.70	2.85	12.08	0.73	2.33
2015	0.66	0.89	3.78	1.18	0.20	2.37	1.59	4.47	0.54	1.92
2016	1.15	-1.09	3.43	-15.37	0.34	-3.52	6.29	-3.78	1.05	4.40
2017	-2.44	-2.12	-5.02	-21.11	-2.55	-13.07	-13.56	-17.27	-2.82	-7.04
2018	-0.86	2.47	4.35	8.07	1.37	2.57	9.50	3.50	3.38	3.56
2019	-0.98	1.31	-5.23	-3.31	-0.70	-5.66	-11.07	4.00	-5.96	0.42
2020	1.02	0.85	0.66	14.98	-1.42	5.44	2.85	3.29	2.44	4.32
小计	-19.38	30.22	-23.08	42.26	-15.02	21.30	-33.00	67.85	-11.62	25.32

注:  $\Delta I_m$  为气象因素对总 CWR 的影响;  $\Delta I_{area}$  为作物种植面积变化对总 CWR 的影响。下同。

表 7 2001—2020 年引黄灌区总 IR 变化的 LMDI 加法分解结果

Table 7 Results of LMDI additive decomposition of total IR changes in the Yellow River Irrigation Area from 2001 to 2020

 $10^5 \text{ m}^3$ 

年份	惠农		陶乐		银川		中宁		中卫	
	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$	$\Delta I_m$	$\Delta I_{area}$
2001	-1.49	2.08	-4.37	2.01	0.71	0.17	-6.78	-5.14	-3.68	-1.88
2002	-1.68	1.25	-4.81	-1.07	-1.75	2.56	-5.84	0.35	-0.21	-0.97
2003	0.36	8.84	2.64	10.34	2.15	22.28	0.69	16.98	-2.61	11.29
2004	-7.92	0.31	-27.59	9.56	-5.18	-17.09	-7.51	-9.07	1.87	-3.94
2005	4.33	-3.59	4.80	-4.42	2.92	-0.31	3.33	4.73	5.14	0.53
2006	-3.01	-3.01	-9.59	-2.24	-1.42	-2.87	-6.75	2.35	-2.41	-4.22
2007	-2.24	10.22	2.62	10.86	-4.86	23.94	-1.57	16.89	-7.68	1.77
2008	2.63	3.27	3.02	5.07	-0.85	-6.93	9.77	1.95	4.00	-2.67
2009	-8.51	-4.55	-4.16	-1.48	0.12	-0.73	-11.83	-0.58	-2.89	1.37
2010	9.34	4.10	9.43	7.41	-1.37	4.15	2.21	3.90	3.15	0.82
2011	-11.91	1.54	-5.42	2.03	0.37	2.16	-5.54	7.88	-4.01	1.25
2012	0.12	1.70	-3.75	3.47	-5.57	-0.88	-5.76	10.39	-1.50	4.79
2013	-2.77	0.75	-2.05	7.68	0.86	-0.95	7.96	3.57	4.67	5.43
2014	3.54	2.22	13.74	1.41	0.64	4.02	0.61	10.54	-1.74	2.04
2015	4.22	0.79	9.54	1.05	1.90	2.04	2.61	3.88	3.21	1.69
2016	-1.70	-0.98	-5.27	-13.54	0.38	-3.11	8.65	-3.35	0.11	3.95
2017	-0.53	-1.89	-1.18	-18.13	-1.73	-11.65	-15.86	-15.23	-3.59	-6.20
2018	-1.94	2.22	0.72	6.93	-0.01	2.25	11.08	3.07	4.75	3.16
2019	-1.17	1.16	-0.85	-2.85	0.41	-4.96	-12.65	3.51	-7.22	0.37
2020	0.71	0.74	-0.10	12.31	-2.11	4.78	5.54	2.88	1.00	3.69
小计	-19.62	27.17	-22.63	36.40	-14.39	18.87	-27.64	59.50	-9.64	22.27

从各个地区驱动因子效应来看,中宁地区气象因子和作物种植面积变化对总需水量的影响最大,银川和中卫地区气象因子和作物种植面积变化对总需水量的影响较小。

### 3 讨论

本研究基于宁夏引黄灌区长期气象与作物生长观测数据,以当地主要耗水作物玉米为研究对象,采用多维度分析方法,系统揭示作物需水规律及其演变特征。通过构建综合评估模型,重点分析玉米生育期内需水量与灌溉需水量的时序变化规律,预测未来变化趋势,并深入解析关键影响因素的作用机制。研究成果为区域农业水资源高效利用提供理论依据,对优化灌溉制度、实现节水增产具有重要实践指导意义。然而,研究依赖历史气象和种植面积数据,若数据质量或代表性不足,可能影响结果的准确性。未来气象条件和种植面积变化具有不确定性,预测结果可能存在偏差。未考虑不同品种、土壤特性、灌溉技术等其他可能影响玉米需水量的因素,分析可能不够全面。研究集中在宁夏引黄灌区,结论可能不适用于其他气候或地理条件不同的地区未来需水量的预测准确性尚待进一步验证。

1999—2020年,宁夏引黄灌区玉米需水量在时间上总体呈下降趋势,与前人<sup>[23]</sup>研究结果一致,其中,在1999年达到最大值,2012年达到最低值;在空间上呈由引黄灌区中部向南北两端递增,西南整体低于东北的趋势。需水量估算基本与华北平原<sup>[24]</sup>、塔里木流域<sup>[25]</sup>、开都河—孔雀河流域<sup>[26]</sup>、黑河流域<sup>[27]</sup>、黄淮海农产区等<sup>[28]</sup>不同尺度需水量吻合。1999—2020年,需水量存在突变点,主要发生在20世纪90年代末和21世纪初,突变时间与当地气候变化和人类活动密切相关,在20世纪90年代,由于截水工程的增多和降雨的减少,黄河径流量减小,断流情况频发<sup>[29]</sup>。流域水文循环受到严重影响<sup>[30]</sup>,导致降雨量减少和温度升高也可能是需水量存在多个变化期的原因。

研究表明,研究区作物需水量对相对湿度的变化最为敏感,与LIU等<sup>[23]</sup>得出的结论一致。尽管玉米需水量总体呈下降趋势,但是由于相对湿度敏感系数在整个研究区内均为负值且显著降低,同时,经过R/S分析法得出,惠农、银川等地未来需水量呈上升趋势,届时将加剧引黄灌区水资源压力。有学者<sup>[31]</sup>发现,在未来气候变化的情境下,黄河的水资源和径流将减小。为应对气候变化带来的负面影响,可在种植结构调整、提高用水效率和节水灌溉技术推广方面制定相关的方针政策。

由于引黄灌区玉米种植面积总体增加,特别是自2003年起呈快速增长趋势,使得玉米种植面积从2000年91 219 km<sup>2</sup>增加到2020年200 189 km<sup>2</sup>玉米总灌溉需水量也从2000年的4.97×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>增长为2020年的7.15×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。事实上,由于近些年作物种植面

积的扩大,随之而来的是农业用水量的增加和水资源利用压力的扩大,加剧水土资源的不匹配,引发一系列的生态环境问题,此现象在包括长江流域在内的中国北方地区尤为严重<sup>[4]</sup>。因此,确定合理的作物种植结构和规模,探索区域合作机制对保障未来水和粮食安全具有重要意义。

该研究中,玉米种植面积增加对总需水量的增加有着较大的影响,而气象因子对该时期的总需水量变化的作用相对较小。但由于土地面积是有限的,作物潜在面积不断减少及未来诸多的不确定性,气象因子对需水量的影响不应被忽视。同时,有学者<sup>[32]</sup>表示,大规模的农业扩张也对近地表气候产生一定影响。近年来,已有诸多学者<sup>[33-34]</sup>在气候变化对作物需水量等多个方面进行研究表明,温度、辐射强度、相对湿度、降雨量等气象因子对作物需水量和区域农业水资源产生较大的影响。因此,应持续监测气候和作物种植面积变化对作物需水量的影响,以便在不同时期制定改进的适应策略。

本文主要研究气候和种植面积变化对玉米需水量的影响,但数据获取的局限性,一些其他因素并未考虑在内,如作物物候期变化对全球变暖的响应,可能导致低估气候变化对需水量的影响程度<sup>[35]</sup>。同时,在定量分析作物需水量与气候因子的关系时,仅分析单个变量对其的影响,当考虑多变量作用一致时对作物需水量产生的综合效应仍值得进一步探讨。

### 4 结论

1)CWR<sub>a</sub>和IR<sub>a</sub>均呈下降趋势,且CWR<sub>a</sub>下降趋势较为显著,其年平均值分别为357.02、370.44 mm。空间上,银川和陶乐地区CWR<sub>a</sub>较低,惠农地区CWR<sub>a</sub>较高,整体上呈由引黄灌区中部向南北两端递增,西南整体低于东北的趋势;IR<sub>a</sub>最大的区域主要位于惠农东北部,较低的区域主要位于银川、陶乐地区,与CWR<sub>a</sub>同样的变化趋势。

2)CWR<sub>a</sub>和IR<sub>a</sub>对5大气象因子的敏感性分析表明,相对湿度高居首位,其次为风速,再次是日照时间,而温度要素中最高气温的影响略高于最低气温,CWR<sub>a</sub>和IR<sub>a</sub>随着最高气温、最低气温、风速、日照时间的上升而增加,随着相对湿度的增加而降低。

3)由于宁夏回族自治区种植结构的调整和相关政策的出台,使得玉米种植面积从2000年91 219 km<sup>2</sup>增加到2020年200 189 km<sup>2</sup>,受到单位面积需水量和作物面积的影响,玉米CWR从2000年的4.97×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>变化为2020年的7.15×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。

4)在量化研究区域内引起总需水量变化的主要驱动因素方面,气候变化和种植面积变化对总CWR

变化的效应值分别为  $-1.02 \times 10^7$ 、 $1.87 \times 10^7$ ；气候变化和种植面积变化对总 IR 变化的效应值分别为  $-0.94 \times 10^7$ 、 $1.64 \times 10^7$ 。总体来看，2009 年以来，玉米种植面积增加对总需水量的增加有着较大的影响，而气象因子对该时期的总需水量变化的作用相对较小。本研究结果为减缓气候变化的影响和调整人类活动以促进农业水资源的可持续利用提供科学依据，但未来需水量预测的准确性仍需进一步验证。

#### 参考文献：

- [1] DAVIS K F, CHHATRE A, RAO N D, et al. Sensitivity of grain yields to historical climate variability in India[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(6): e206.
- [2] DISTEFANO T, KELLY S. Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth[J]. *Ecological Economics*, 2017, 142: 130-147.
- [3] 王静, 张晓煜, 马国飞, 等. 1961—2010 年宁夏灌区主要作物需水量时空分布特征[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(26): 161-169.  
WANG J, ZHANG X Y, MA G F, et al. Spatial and temporal characteristics of water requirement of main crops in irrigation district of Ningxia in 1961—2010 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(26): 161-169.
- [4] OMER A, MA Z G, ZHENG Z Y, et al. Natural and anthropogenic influences on the recent droughts in Yellow River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: e135428.
- [5] SUN S K, ZHOU T W, WU P T, et al. Impacts of future climate and agricultural land-use changes on regional agricultural water use in a large irrigation district of northwest China [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(10): 1158-1171.
- [6] HAIDER S, ULLAH K. Projected crop water requirement over agro-climatically diversified region of Pakistan[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: e107824.
- [7] SINGH A. Managing the water resources problems of irrigated agriculture through geospatial techniques: An overview[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 174: 2-10.
- [8] ZHANG Y J, WANG Y F, NIU H S. Effects of temperature, precipitation and carbon dioxide concentrations on the requirements for crop irrigation water in China under future climate scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 373-387.
- [9] XU H Q, TIAN Z, HE X G, et al. Future increases in irrigation water requirement challenge the water-food nexus in the northeast farming region of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 594-604.
- [10] BOONWICHAI S, SHRESTHA S, BABEL M S, et al. Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River basin, Thailand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 1157-1164.
- [11] GABR M E. Impact of climatic changes on future irrigation water requirement in the Middle East and North Africa's region: A case study of upper Egypt[J]. *Applied Water Science*, 2023, 13(7): e158.
- [12] TIAN J, ZHANG Y Q. Detecting changes in irrigation water requirement in Central Asia under CO<sub>2</sub> fertilization and land use changes [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: e124315.
- [13] Allen R G, RAES D, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Fao, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [14] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1974, 10(3): 486-497.
- [15] 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: 3329-3337.
- [16] ZHANG X C, CHEN L X, ZHOU C. Deformation monitoring and trend analysis of reservoir bank landslides by combining time-series InSAR and Hurst index [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): e619.
- [17] RIVERA-NIQUEPA J D, ROJAS-LOZANO D, DE OLIVEIRA-DE JESUS P M, et al. Methodology for selecting assessment periods of Logarithmic Mean Divisia Index decomposition techniques [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 50: e101241.
- [18] HE Y, XING Y T, ZENG X C, et al. Factors influencing carbon emissions from China's electricity industry: Analysis using the combination of LMDI and K-means clustering [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 93: e106724.
- [19] LI C, JIANG T T, LUAN X B, et al. Determinants of agricultural water demand in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: e125508.
- [20] ANG B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 233-238.
- [21] ZHANG L, CHEN F, LEI Y D. Climate change and shifts in cropping systems together exacerbate China's water scarcity[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): e104060.
- [22] 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: e106967.

- [23] LIU Y Q, LIN Y F, HUO Z L, et al. Spatio-temporal variation of irrigation water requirements for wheat and maize in the Yellow River basin, China, 1974—2017[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: e107451.
- [24] TAN Q H, LIU Y J, PAN T, et al. Changes and determining factors of crop evapotranspiration derived from satellite-based dual crop coefficients in North China Plain[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(5): 1496-1506.
- [25] WANG F, CHEN Y N, LI Z, et al. Assessment of the irrigation water requirement and water supply risk in the Tarim River basin, northwest China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): e4941.
- [26] GUO B, LI W H, GUO J Y, et al. Risk assessment of regional irrigation water demand and supply in an arid inland river basin of northwestern China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(9): 12958-12973.
- [27] TAN M H, ZHENG L Q. Different irrigation water requirements of seed corn and field corn in the Heihe River basin[J]. *Water*, 2017, 9(8): e606.
- [28] YANG X L, GAO W S, SHI Q H, et al. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124: 20-27.
- [29] ZHANG Q, XU C Y, YANG T. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 Years, China [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(6): 1157-1170.
- [30] LI H Z, ZHANG Q, SINGH V P, et al. Hydrological effects of cropland and climatic changes in arid and semi-arid river basins: A case study from the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 547-557.
- [31] WANG G Q, ZHANG J Y, JIN J L, et al. Impacts of climate change on water resources in the Yellow River basin and identification of global adaptation strategies[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2017, 22(1): 67-83.
- [32] HE Y Q, LEE E, MANKIN J S. Seasonal tropospheric cooling in northeast China associated with cropland expansion[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): e034032.
- [33] DAI A G, FYFE J C, XIE S P, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 555-559.
- [34] UM M J, KIM Y, PARK D, et al. Impacts of potential evapotranspiration on drought phenomena in different regions and climate zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: e135590.
- [35] WANG J, WANG E L, FENG L P, et al. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 135-144.
- (上接第242页)
- [23] 张晓芹,李国庆,杜盛.未来气候变化对沙枣适宜分布区的影响预测[J].*应用生态学报*, 2018, 29(10): 3213-3220.  
ZHANG X Q, LI G Q, DU S. Predicting the influence of future climate change on the suitable distribution areas of *Elaeagnus angustifolia* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3213-3220.
- [24] ELITH J, LEATHWICK J R. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [25] NORBERG A, ABREGO N, BLANCHET F G, et al. A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels[J]. *Ecological Monographs*, 2019, 89(3): e01370.
- [26] O'NEILL B C, TEBALDI C, VAN VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [27] REAL R, MÁRQUEZ A L, OLIVERO J, et al. Species distribution models in climate change scenarios are still not useful for informing policy planning: An uncertainty assessment using fuzzy logic[J]. *Ecography*, 2010, 33(2): 304-314.
- [28] AMINDIN A, POURGHASEMI H R, SAFAEIAN R, et al. Predicting current and future habitat suitability of an endemic species using data-fusion approach: Responses to climate change[J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2024, 94: 149-162.
- [29] UNDERWOOD J G, D'AGROSA C, GERBER L R. Identifying conservation areas on the basis of alternative distribution data sets[J]. *Conservation Biology*, 2010, 24(1): 162-170.
- [30] TEHRANI N A, NAIMI B, JABOYEDOFF M. A data-integration approach to correct sampling bias in species distribution models using multiple datasets of breeding birds in the Swiss Alps[J]. *Ecological Informatics*, 2022, 69: e101501.