

网络出版时间: 2026-01-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260112.1640.006>

基于 CWDI 的河西春小麦干旱特征分析

杨华^{1,2}, 蒋菊芳^{1,2}, 丁文魁², 齐月¹, 程倩², 李兴宇², 张金丹²

(1. 中国气象局武威国家气候观测台, 甘肃武威 733000; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气候变化与影响研究室, 甘肃兰州 730020)

摘要: 干旱是影响河西走廊春小麦生长的主要农业气象灾害, 准确识别其干旱特征对当地春小麦科学田间管理和防灾减灾非常重要。基于 1995—2023 年武威气象站逐日气象数据及农业气象试验站春小麦发育时期、土壤相对湿度(R_{sm})和产量数据, 计算春小麦生育期内有效降水量(P_e)、作物需水量(ET_c)及作物水分亏缺指数(CWDI), 并采用回归分析、Spearman 相关分析、Mann-kendall(M-K)检测等方法, 分析了春小麦水分供需状况及干旱特征。结果表明, 1995—2023 年河西春小麦生育期 ET_c 远高于 P_e , 无灌溉条件下水分供需失衡, 拔节—抽穗期水分亏缺峰值达 58.7 mm。经干旱频率分析, 无灌溉条件下春小麦全生育期旱灾频发, 拔节—抽穗期重旱频率高达 86%; 有灌溉时仅播种—三叶期重旱频率为 55%, 但实际减产率仅 2.7%~9.4%。1995—2023 年河西 CWDI 年际波动显著, 无灌溉时春小麦全生育期持续干旱, 抽穗—乳熟期 CWDI 高达 85%, 并以 $9.5\% \cdot a^{-1}$ 速率极显著上升($P < 0.01$), 2014—2015 年发生突变; 灌溉条件下 CWDI 呈单谷型变化, 整体上升速率减缓至 $1.4\% \cdot a^{-1}$, 但三叶—拔节期为 $52.0\% \cdot a^{-1}$ 的显著下降趋势($P < 0.05$), 播种—三叶期 CWDI 为 81%, 但冬灌保障了土壤墒情, 水分基本满足春小麦生长需求。气候变化加剧了春小麦水分胁迫, 在春小麦需水关键期采用滴灌等精准灌溉技术, 能够有效缓解气候变化导致的春旱及春末夏初干旱对作物的负面影响, 保障春小麦正常生长发育, 稳定产量。

关键词: 作物水分亏缺指数; 河西春小麦; 水分供需; 干旱频率; 干旱特征

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)03-0413-11

Analysis of Drought Characteristics of Spring Wheat in Hexi Corridor Based on Crop Water Deficit Index

YANG Hua^{1,2}, JIANG Jufang^{1,2}, DING Wenkui², QI Yue¹, CHENG Qian², LI Xingyu², ZHANG Jindan²

(1. Wuwei National Climate Observatory of China Meteorological Administration, Wuwei, Gansu 733000, China; 2. The Arid Climate Change and Impacts Laboratory, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Drought is the primary agrometeorological disaster affecting spring wheat growth in the Hexi Corridor. Accurately identifying its drought characteristics is crucial for field management and disaster prevention and mitigation in local spring wheat cultivation. Based on the daily meteorological data from Wuwei Meteorological Station and the growth stage, soil relative humidity(R_{sm}) and yield data of spring wheat from the Agrometeorological Experiment Station during 1995—2023, the effective precipitation(P_e), crop water requirement(ET_c), and crop water deficit index(CWDI) during the growth periods of spring wheat were calculated, and regression analysis, Spearman correlation analysis, and Mann-Kendall(M-K) detection were employed to reveal the water supply-demand dynamics and drought characteristics of spring wheat. The results showed that the ET_c during the growth period of spring wheat in the Hexi Corridor significantly exceeded P_e during 1995—2023. Under non-irri-

收稿日期: 2025-04-14

修回日期: 2025-06-06

基金项目: 武威市科技计划项目(WW23B02NY204); 甘肃省气象局创新团队项目(GSQXCXTD-2026-01); 甘肃省科技重大专项(25ZDFA011); 中国气象局创新发展专项项目(CXFZ2024J056); 甘肃省科技计划项目(25JRRH001); 甘肃省气象局重点项目(Zd2024-D-3); 甘肃省气象局面上项目(Ms2025-D-11); 武威市科技特派员专题项目(WW24A01RPK002)

第一作者 E-mail: wwyh199206@163.com(杨华)

通讯作者 E-mail: wwqxjif@163.com(蒋菊芳)

gation conditions, severe water imbalance occurred, with the peak water deficit reached 58.7 mm during jointing-heading stage. Drought frequency analysis showed frequent drought occurrences across all growth stages without irrigation, particularly during the jointing-heading stage, where the frequency of severe drought reached 86%. Under irrigation, only the sowing-three leaf stage exhibited a severe drought frequency of 55%, but the actual yield reduction rate was only 2.7%–9.4%. The interannual fluctuations of CWDI were significant between 1995 and 2023, under non-irrigation conditions, continuous drought persisted throughout the growth periods, with CWDI reaching 85% during the heading-grain filling stage. The CWDI showed an extremely significant upward trend at $9.5\% \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$), with an abrupt change occurring in 2014–2015. Under irrigation, the CWDI showed a monomodal pattern, with an overall increase rate slowing down to $1.4\% \text{ a}^{-1}$, however significantly downward trend at $52.0\% \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.05$) during three leaf-jointing stage. Although CWDI reached 81% during sowing-three leaf stage, winter irrigation ensured soil moisture, which basically met crop requirements. Climate change intensified water stress on spring wheat. Adopting precision irrigation technologies such as drip irrigation during the critical water requirement stages of spring wheat can effectively mitigate the adverse impacts of climate change induced spring droughts and late spring early summer droughts on crops. This approach ensures normal growth and development of spring wheat and stabilized yields.

Keywords: Crop water deficit index; Spring wheat in the Hexi Corridor; Water requirements and supplies; Drought frequency; Drought characteristics

干旱作为制约作物生产的主要气象灾害之一,具有持续时间长、影响范围广、发生频率高等特点^[1]。近20年来,中国农业干旱灾害占自然灾害的比例超过50%,研究预测未来农业干旱缺水的势态将持续加剧^[2-4],北方地区粮食生产用水的供需矛盾日益突出^[5-6]。河西走廊春小麦种植面积占粮食作物的25%,春旱和春末夏初干旱已是限制产量潜力的常态化关键因子。因此,探索中国水资源高效利用模式、提升春小麦抗旱能力,是保障干旱区粮食安全生产的紧迫课题。

从作物生长阶段来看,营养生长期适度干旱对产量影响较小,而拔节至抽穗期为需水关键期,此阶段水分亏缺会显著抑制株高^[7-8]。轻度干旱虽对穗粒数无显著影响,但持续干旱会限制根系发育与地上部分生长,导致干物质积累减少^[9-10]。针对农业管理措施,留茬免耕技术可改善春小麦出苗及产量^[11],而生育后期增加灌水不仅能提升春小麦株高,还可以优化水分利用效率^[12]。气象因素分析显示,相对湿度、风速和生育期总日照时长是调控春小麦需水量的关键因子^[13]。在生理机制层面,土壤水分和温度变化通过调控叶片光合作用影响半干旱区小麦生长,其中净光合速率与气孔导度的动态关系随干旱进程呈现阶段性特征^[14-15]。

作物水分亏缺指数(crop water deficit index, CWDI)兼顾土壤—植物—大气系统的多因素作用,综合反映了作物在一段时期内的水分亏缺状况,是衡量作物需水量与实际供水能力平衡状况的重要指标。现有研究多将CWDI应用于玉米等作物干旱监测,而针对小麦的系统研究相对较少^[16]。因此,本研究以春小麦不同生育阶段为时间尺度,基于CWDI,结合实测土壤相对湿度、产量及春小麦水分供需状况,对1995–2023年河西春小麦干旱特征展开分析,以期为干旱区制定春小麦节水灌溉计划、有效组织实施防灾减灾措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究以河西走廊春小麦主要种植品种永良为材料,依托武威荒漠生态与农业气象试验站($37^{\circ}55'N$, $102^{\circ}40'E$, 海拔1531.5 m)开展长期定位观测试验及2022–2023年干旱胁迫试验。该地区属大陆性干旱气候,年平均气温 $9.0^{\circ}C$,年平均降水量180.0 mm(83.1%集中在6–8月份),年平均日照时数2 913.9 h,年平均无霜期175 d,雨热同期。

研究区地貌差异显著,地处黄土、青藏、蒙新

三大高原交汇地带,地势南高北低,由西南向东北倾斜,依次形成南部祁连山山地、中部走廊平原和北部荒漠 3 个地貌单元,海拔 1 020~4 874 m。

1.2 资料来源

选取武威国家基本气象站 1995—2023 年的气象日资料(平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速、降水量、日照时数、气压、水汽压)、武威荒漠生态与农业气象试验站 1995—2023 年春小麦发育期和土壤相对湿度(R_{sm})旬值资料、2022 年和 2023 年试验观测资料及 1995—2023 年凉州区产量资料。春小麦全生育期使用井水灌溉每年 4~5 次。观测方法按照中国气象局编定的《农业气象观测规范》^[17]进行,观测地段位于气象站附近 200 m 处。

1.3 研究方法

1.3.1 春小麦生育阶段划分

将春小麦发育期划分为播种—三叶期(3 月中旬—4 月中旬)、三叶—拔节期(4 月下旬—5 月中旬)、拔节—抽穗期(5 月下旬—6 月上旬)、抽穗—乳熟期(6 月中旬—7 月上旬)、乳熟—成熟期(7 月中旬—7 月下旬)5 个阶段^[18]。

1.3.2 作物水分亏缺指数

(1)某时段 CWDI 计算

依据中华人民共和国国家标准《农业干旱等级》(GB/T 32136-2015)^[19],CWDI 计算公式如下:

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4}$$

式中,CWDI 为某时段水分亏缺指数,CWDI_j、CWDI_{j-1}、CWDI_{j-2}、CWDI_{j-3}、CWDI_{j-4} 为第 j 旬(过去 1~10 d)及其前 4 旬的作物水分亏缺指数;a、b、c、d、e 为对应旬权重系数,分别为 0.3、0.25、0.2、0.15、0.1。

(2)旬水分亏缺指数(CWDI_j)计算

$$CWDI_j = \begin{cases} \left(1 - \frac{P_{e,j}}{ET_{c,j}}\right) \times 100\%, & ET_{c,j} \geq P_{e,j} + I_j \\ 0, & ET_{c,j} < P_{e,j} + I_j \end{cases}$$

式中, $P_{e,j}$ 为旬累积有效降水量(mm), $ET_{c,j}$ 为旬累积作物需水量(mm), I_j 为旬累积灌溉量(mm)。

(3)有效降水量(P_e)计算

本研究中的有效降水量计算采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法^[20-21],计算公式如下:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & (P_r < 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}) \\ 4.17 + 0.1P & (P_r \geq 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}) \end{cases}$$

式中, P_r 为日降水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

(4)作物需水量(ET_c)计算

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

式中, ET_0 为某时段的作物参考蒸散量(mm),由 1998 年 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[22]; K_c 为小麦旬作物系数,本研究采用张华^[21]的研究成果,春小麦生长初期 $K_{c,ini}$ 为 0.33,中期 $K_{c,mid}$ 为 1.18,末期 $K_{c,end}$ 为 0.43。

(5)干旱等级划分

参照中华人民共和国国家标准《农业干旱等级》(GB/T 32136-2015)^[19]和祁嘉郁等^[23]的研究结果,采用表 1 所示的春小麦水分亏缺指数(CWDI)和土壤相对湿度指数(R_{sm})干旱等级划分标准,研究区土壤质地为砂壤土。

1.3.3 减产率计算方法

利用实际产量与趋势产量相比较的方法计算减产率:

$$I_Y = \left(1 - \frac{Y}{Y_t}\right) \times 100\%$$

式中, I_Y 为减产率,Y 为实际产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), Y_t 为趋势产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

利用 2022—2023 年武威荒漠生态与农业气象试验站春小麦需水关键期干旱灾害致灾试验资料,设置全生育期供水充足为对照(CK)、自分蘖期起停止灌溉直至成熟或死亡(T1)、自孕穗期起停止灌溉直至成熟或死亡(T2)共 3 个处理,每个处理 4 个重复。

表 1 基于 CWDI 和 R_{sm} 的春小麦干旱等级划分
Table 1 Drought classification of spring wheat based on CWDI and R_{sm}

干旱等级 Drought grade	类型 Type	CWDI/%	R_{sm} /%
0	无旱 No drought	$CWDI \leq 50$	$R_{sm} > 60$
1	轻旱 Slight drought	$50 < CWDI \leq 65$	$50 < R_{sm} \leq 60$
2	中旱 Moderate drought	$65 < CWDI \leq 80$	$40 < R_{sm} \leq 50$
3	重旱 Severe drought	$80 < CWDI \leq 95$	$30 < R_{sm} \leq 40$
4	特旱 Extra severe drought	$CWDI > 95$	$R_{sm} \leq 30$

对于 2022 年和 2023 年试验数据的减产率计算方法如下:

$$I_y = \left(1 - \frac{Y_{未灌溉}}{Y_{灌溉}}\right) \times 100\%$$

式中, I_y 为减产率, $Y_{未灌溉}$ 为未灌溉产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $Y_{灌溉}$ 为灌溉产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.4 Mann-Kendall(M-K)检测

采用 M-K 非参数统计检验方法分析时间序列的趋势性与突变特征,其特点是检测范围宽、定量化程度高^[24]。

1.4 数据处理

利用 EXCEL2010 整理分析春小麦 CWDI、 R_{sm} 及产量等数据资料,采用 SPSS25.0 进行 Spearman 相关分析、主成分分析和回归分析,用 Excel 2010 制图。

2 结果与分析

2.1 CWDI 在研究区的适用性验证

选取定点观测实测 R_{sm} 和武威市应急管理局统计的干旱灾情,统计 1995—2023 年干旱等级,并与 CWDI 判定的干旱等级进行比较(表 2)。在有灌溉的定点观测中,春小麦 R_{sm} 干旱等级与

CWDI 判定结果完全一致的有 9 次,相差 1 个等级的有 18 次,相差超过 1 个等级的有 8 次。Spearman 相关性检验显示,春小麦全生育期 R_{sm} 与 CWDI 呈不显著负相关(R^2 为 -0.248),而播种—三叶期呈不显著正相关(R^2 为 0.117),三叶—拔节期、拔节—抽穗期呈不显著负相关(R^2 分别为 -0.062 、 -0.097),抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期呈极显著负相关($P<0.01$, R^2 分别为 -0.536 、 -0.581)。在不考虑灌溉的情况下,历史旱情等级与 CWDI 判定的干旱等级完全一致的有 6 次,相差 1 个等级的有 5 次。综上所述,有灌溉条件下,35 次春小麦 R_{sm} 干旱等级与 CWDI 对比中,26%完全一致、51%相差 1 个等级、23%偏差超过 1 个等级,整体吻合度较高,说明 CWDI 能较好反映春小麦生育期的实际水分亏缺状态。无灌溉条件下,历史旱情与 CWDI 的一致性显著降低,仅 55%完全一致,表明灌溉措施对自然干旱状态有干扰。

表 2 R_{sm} 干旱等级和历史旱情与同期 CWDI 计算结果符合程度

Table 2 Consistency between drought classifications based on R_{sm} and historical drought events with synchronous CWDI calculation results

年份 Year	干旱时间(月、日) Drought time (mm. dd)	R_{sm} 干旱等级 Drought degree by R_{sm}	CWDI(有灌溉) 干旱等级 Droughtdegree by CWDI(irrigated)	符合程度 Degree of coincidence	历史旱情等级 Historical drought degree	CWDI(无灌溉) 干旱等级 Drought degree by CWDI(non-irrigated)	符合程度 Degree of coincidence
1995	5.8/6.28	2/1	3/0	Δ	2	3	Δ
1996	6.28/7.8/7.23	1/2/1	1/0/0	√/×/Δ	/	/	/
1997	5.8/5.28/6.18/7.8	1/1/1/1	3/2/0/0	×/Δ/Δ/Δ	2	3	Δ
1998	3.11—7.30	/	/	/	2	2	√
1999	3.11—7.30	/	/	/	3	3	√
2000	7.8	1	0	Δ	3	3	√
2001	6.28	2	0	×	2	3	Δ
2002	5.8	1	1	√	/	/	/
2003	5.8/5.28/6.8	1/1/1	1/0/0	√/Δ/Δ	/	/	/
2004	5.18/6.8	1/1	0/0	Δ/Δ	/	/	/
2005	6.8	2	0	×	2	2	√
2006	3.11—7.30	/	/	/	2	3	Δ
2007	5.18/6.8	1/1	1/1	√/√	/	/	/
2008	6.18/7.8/7.11	2/2/2	0/1/2	×/Δ/√	/	/	/
2009	6.18	1	0	Δ	/	/	/
2010	5.28/6.18/6.28	2/2/1	1/0/0	Δ/×/Δ	/	/	/
2011	5.28/6.18	1/2	1/1	√/Δ	/	/	/
2012	5.28	1	0	Δ	/	/	/
2013	5.28/6.18/7.16	1/1/1	0/1/2	Δ/√/Δ	3	3	√
2015	5.18/6.28	2/1	0/1	×/√	/	/	/
2016	6.8	2	0	×	/	/	/
2018	3.11—7.30	/	/	/	3	3	√
2023	3.11—7.30	/	/	/	3	2	Δ

符合程度中√、Δ和×分别表示完全一致、相差一个级别和相差一个级别以上。
In the consistency assessment, √, Δ, and × indicate full agreement, one-level discrepancy, and discrepancy exceeding one level, respectively.

2.2 春小麦生长阶段水分供需状况

2.2.1 春小麦生长阶段水分供需变化

如图 1(a,b)所示,1995—2023 年春小麦全生育期内 ET_c 呈极显著波动增加趋势($P<0.01$),速率为 $61.8\% \cdot a^{-1}$; P_e 呈不显著减少趋势,速率为 $5.0\% \cdot a^{-1}$ 。而 ET_c 明显大于 P_e 且随着气候变化差距越来越大,说明降水远远满足不了春小麦生长所需水分。有灌溉下 CWDI 明显小于无灌溉,差距最大为 2004 年的 38%。 R_{sm} 呈显著增加趋势($P<0.05$),速率为 $29.3\% \cdot a^{-1}$, R_{sm} 与 CWDI(无灌溉)差异不大,比 CWDI(有灌溉)整体偏大。说明随着气候变化有越来越干旱的趋势,小麦的需水量会越来越大,相应的灌水量也需增加。

如图 1(c)所示,1995—2023 年春小麦各生育阶段 ET_c 大小表现为拔节—抽穗>抽穗—乳熟>乳熟—成熟>三叶—拔节>播种—三叶,而 P_e 大小表现为乳熟—成熟>抽穗—乳熟>三叶—拔节>拔节—抽穗>播种—三叶。春小麦各生育阶段 P_e 平均值为 4.1 mm, ET_c 平均值为 31.6 mm,降水完全满足不了春小麦生长所需水分。水分亏缺最大的生育阶段为拔节—抽穗期,达 58.7 mm,其次为抽穗—乳熟期,为 42.3 mm,这两个阶段均为春小麦产量形成的关键阶段,水分亏缺易发生干旱致其减产。其余阶段水分亏缺在 20.0 mm 以内,降水同样满足不了春小麦对水分的需求。

1995—2023 年春小麦各生育阶段 CWDI(无灌溉)大小表现为抽穗—乳熟>拔节—抽穗>播种—三叶>乳熟—成熟>三叶—拔节,呈一谷一峰型变化。播种—三叶期、拔节—抽穗期、抽穗—乳熟期 CWDI(无灌溉)分别为 81%、84%、85%,出现重旱;三叶—拔节期、乳熟—成熟期 CWDI(无灌溉)均约为 75%,出现中旱。在无灌溉情况下,各生育阶段水分亏缺严重,春小麦无法正常生长。1995—2023 年春小麦各生育阶段 CWDI(有灌溉)为播种—三叶>乳熟—成熟>三叶—拔节>抽穗—乳熟>拔节—抽穗,呈单谷型变化。播种—三叶期 CWDI(有灌溉)最大,为 81%,出现重旱;乳熟—成熟期 CWDI(有灌溉)为 55%,出现轻旱,其余阶段 CWDI(有灌溉)为 40%~50%,没有干旱发生(图 1b)。有灌溉时,水分基本满足春小麦生长所需。

综上,春小麦生长阶段作物需水量远大于降水量,研究区需灌溉使春小麦正常生长。在拔节—抽

穗期,灌溉量最大。不同生育阶段 ET_c 标准误差较大,表明该地区作物需水量年际间波动大,易发生干旱。降水量在播种—三叶期最少,而 CWDI 在播种—三叶期较大,该地区易在 3 月中旬—4 月中旬发生干旱。

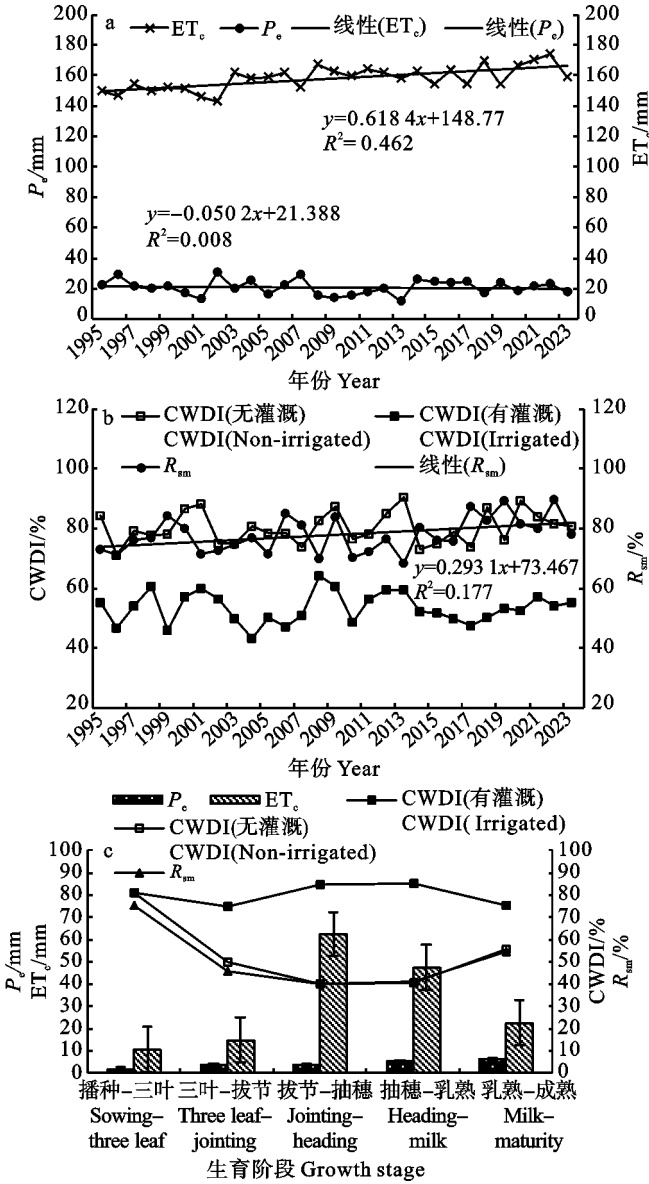


图 1 1995—2023 年春小麦全生育期(a,b)和各生育阶段(c)的 P_e 、 ET_c 和 CWDI
Fig. 1 Effective precipitation, crop water requirement and CWDI during the entire growth period(a, b) and different growth stages(c) of spring wheat from 1995 to 2023

2.2.2 气象因子对春小麦 ET_c 的影响

ET_c 变化的因素错综复杂,各气象因子的作用程度不同。本研究选取地表净辐射、日平均气温、日平均 2 m 高处风速、日平均水汽压、日降水、日平均相对湿度和日照时数,在年尺度下进行主成分分析,经检验发现,各因子之间存在较强的

相关性,满足主成分分析的条件。提取2个主成分 y_1 和 y_2 ,保留原变量68.6%的信息。

第1主成分: $y_1 = -0.848x_1 + 0.710x_2 + 0.677x_3 - 0.574x_4 + 0.047x_5 + 0.627x_6 + 0.195x_7$

第2主成分: $y_2 = -0.354x_1 - 0.247x_2 + 0.626x_3 + 0.761x_4 - 0.729x_5 + 0.704x_6 + 0.415x_7$

式中, $x_1 \sim x_6$ 分别为标准化的日照时数、日平均2 m高处风速、日平均水汽压、地表净辐射、日平均气温、日平均相对湿度、日降水。 y_1 主要为日照时数、日平均2 m高处风速、日平均水汽压表示的气象因子信息, y_2 主要为地表净辐射、日平均气温、日平均相对湿度表示的气象因子信息。将主成分与标准化 $ET_c(z)$ 进行线性回归:

$$z = 0.094y_1 - 0.568y_2$$

式中, y_2 的回归系数明显大于 y_1 ,且与 z 的相关性极显著($P < 0.01$),表明地表净辐射、日平均气温、日平均相对湿度气象因子对春小麦需水量的影响更显著。

2.3 CWDI 年际变化特征

2.3.1 基于CWDI的春小麦各生育阶段干旱发生频率

根据CWDI分级标准统计1995—2023年春小麦各生育阶段干旱发生频率(图2)。无灌溉时,无旱发生频率为0,即无灌溉时全生育期均有干旱发生;轻旱发生频率大小表现为三叶—拔节>播种—三叶>拔节—抽穗,抽穗—成熟期轻旱发生频率为0;中旱发生频率大小表现为三叶—拔节>播种—三叶>抽穗—乳熟、乳熟—成熟>拔节—抽穗,重旱发生频率大小表现为拔节—抽穗>抽穗—乳熟、乳熟—成熟>播种—三叶>三叶—拔节,特旱发生频率大小表现为播种—三叶>抽穗—乳熟、乳熟—成熟>三叶—拔节、拔节—抽穗。整体看,干旱发生频率大小表现为重旱>中旱>特旱>轻旱>无旱,拔节—抽穗期干旱频率最高,重旱以上频率高达86%。

1995—2023年有灌溉时无旱发生频率大小表现为抽穗—乳熟、乳熟—成熟>拔节—抽穗>三叶—拔节>播种—三叶;轻旱发生频率大小表现为三叶—拔节>拔节—抽穗>抽穗—乳熟、乳熟—成熟>播种—三叶;中旱发生频率大小表现为播种—三叶>三叶—拔节,拔节—成熟期中旱发生频率为0;播种—三叶期重旱发生频率为38%,特旱发生频率为17%,三叶—成熟期重旱、特旱发生频率均为0。干旱发生频率大小表现为无旱>轻旱>中旱>重旱>特旱,播种—三叶期干旱频率最高,重旱频率为55%,但由于冬灌,播

种—三叶期 R_{sm} 为85%,土壤墒情好,对春小麦播种出苗没有影响。在有灌溉时,中旱以下干旱发生对春小麦正常生长影响不大。

在有灌溉的定点观测区,1995—2023年春小麦全生育期发生轻旱或未发生干旱。其中,未发生干旱占比34%,轻旱占比65%。在发生轻旱的年份中,定点观测区除2002年和2011年减产率分别为21.9%和22.9%外,其余年份减产率仅为3.3%~11.4%,县平均减产率仅为2.7%~9.4%,说明轻旱对春小麦产量影响较小。

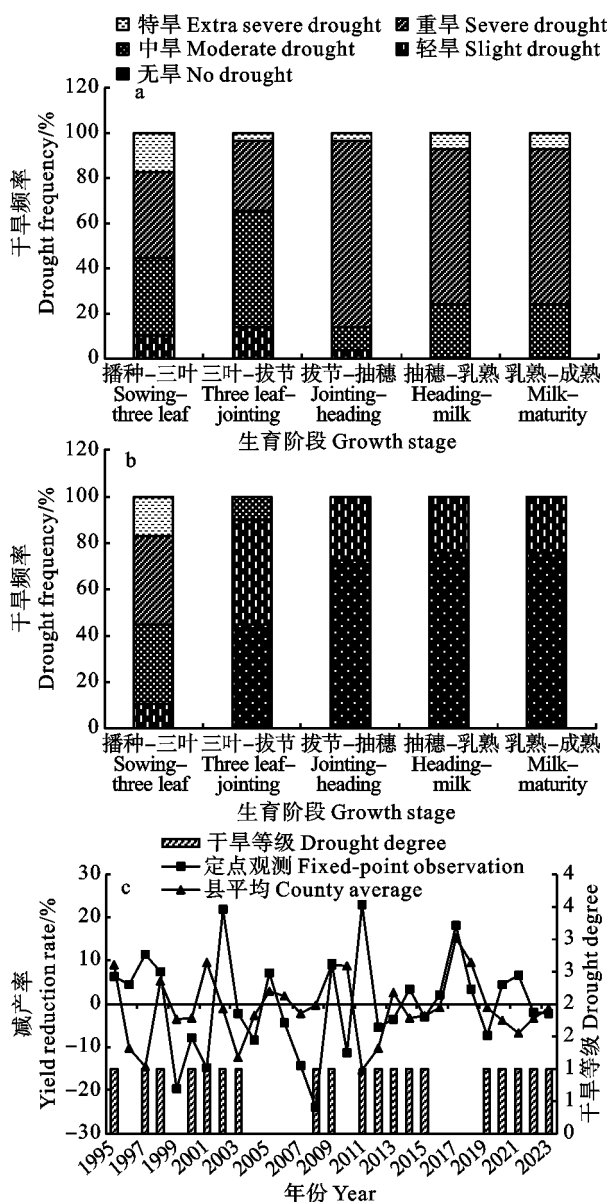
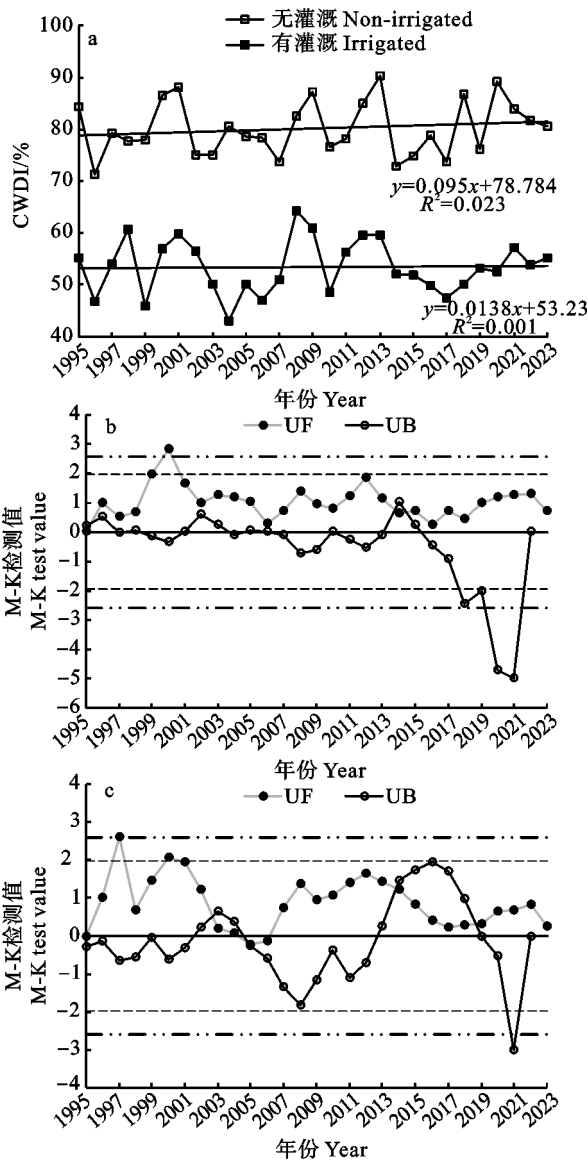


图2 1995—2023年基于CWDI的春小麦无灌溉(a)和有灌溉(b)时各生育阶段干旱频率变化及全生育阶段干旱频率和减产率(c)
Fig. 2 Inter-annual variation of drought frequency of spring wheat growth stages during 1995–2023 based on CWDI: non-irrigated conditions(a), irrigated conditions(b), drought frequency during the entire growth period and yield reduction rate(c)

2.3.2 春小麦全生育期 CWDI 年际变化

在有灌溉的定点观测区,1995—2023 年春小麦全生育期 CWDI 为 43%~64%(图 3a)。CWDI 年际间波动较大,无灌溉下 CWDI 呈不显著上升趋势,速率为 $9.5\% \cdot a^{-1}$;有灌溉下 CWDI 呈不显著上升趋势,速率为 $1.4\% \cdot a^{-1}$ 。利用 M-K 方法对 1995—2023 年春小麦全生育期 CWDI 进行突变点和趋势分析(图 3b、c),结果显示,CWDI



UF:由原始数据生成的正态分布序列;UB:与原始数据相反生成的正态分布序列;---代表 0.05 显著水平检验;—·—代表 0.01 显著水平检验。下同。

UF: Forward sequence of the original data; UB: Backward sequence of the original data; ---, 0.05 significance level; —·—, 0.01 significance level. The same in figure 4.

图 3 1995—2023 年春小麦全生育期 CWDI 的年际变化(a)及无灌溉(b)和有灌溉(c)下的 M-K 突变检验

Fig. 3 Inter-annual variation of CWDI(a) during the entire growth period of spring wheat from 1995 to 2023, Mann-Kendall (M-K) mutation test under non-irrigated(b) and irrigated (c) conditions

(无灌溉)近 29 年均呈上升趋势,2001 年上升趋势通过了 0.01 显著水平检验,在 2014 年和 2015 年存在突变;CWDI(有灌溉)在 2005—2006 年呈下降趋势,其余年份均为上升趋势,1997 年上升趋势通过了 0.01 显著水平检验,2000—2001 年通过了 0.05 显著水平检验,在 2003、2005、2014、2019 年存在突变。

2.3.3 春小麦各生育阶段 CWDI 变化特征

1995—2023 年定点观测区(有灌溉)春小麦 5 个生育阶段 CWDI 年际变化趋势存在差异(图 4a),播种—三叶期、抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期 CWDI 均呈不显著上升趋势;三叶—拔节期呈显著下降趋势($P < 0.05$),速率为 $52.0\% \cdot a^{-1}$;拔节—抽穗期呈不显著下降趋势。

M-K 检测显示,1995—2023 年中播种—三叶期 CWDI 在 2016 年呈下降趋势,其余阶段均上升,2000—2022 年上升趋势通过 0.01 显著水平检验,在 2014、2015、2016 年存在突变(图 4b)。三叶—拔节期 CWDI 在 1996、1999—2001 年上升,其余阶段下降,2023 年下降趋势通过 0.05 显著水平检验,在 2010、2013、2017、2022 年存在突变(图 4c)。拔节—抽穗期 CWDI 在 1997、1999、2010—2016 年上升,其余阶段下降,在 2001、2003、2006、2018、2019、2022 年均存在突变(图 4d)。抽穗—乳熟期 CWDI 在 2005—2006 年下降,其余阶段上升,1996—1997 年上升趋势通过 0.01 显著水平检验,在 1999、2000、2003、2006、2017、2019 年均存在突变(图 4e)。乳熟—成熟期 CWDI 在 1995—2023 年均呈上升趋势,上升趋势通过 0.01 显著水平检验,在 1996 年存在突变(图 4f)。

2.4 春小麦干旱发生发展动态定量评估结果

在 CK 处理中,2022—2023 年播种—三叶期、抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期 CWDI 分别为 88%、66%和 72%,出现中—重旱,但 R_{sm} 分别为 82%、62%和 59%,土壤墒情较好,且这 3 个阶段 ET_c 分别为 12 mm、54 mm 和 23 mm,播种—三叶期、和乳熟—成熟期作物需水量较低(图 5)。冬灌有效保证了春小麦播种时的水分需求,抽穗—乳熟期土壤墒情总体满足春小麦生长所需,干旱没有影响春小麦生长及收获。而三叶—拔节期、拔节—抽穗期 CWDI 分别为 37%、21%,未出现干旱, R_{sm} 分别为 76%、74%,墒情偏好。及时灌溉条件下 CK 处理中春小麦生长状况良好。

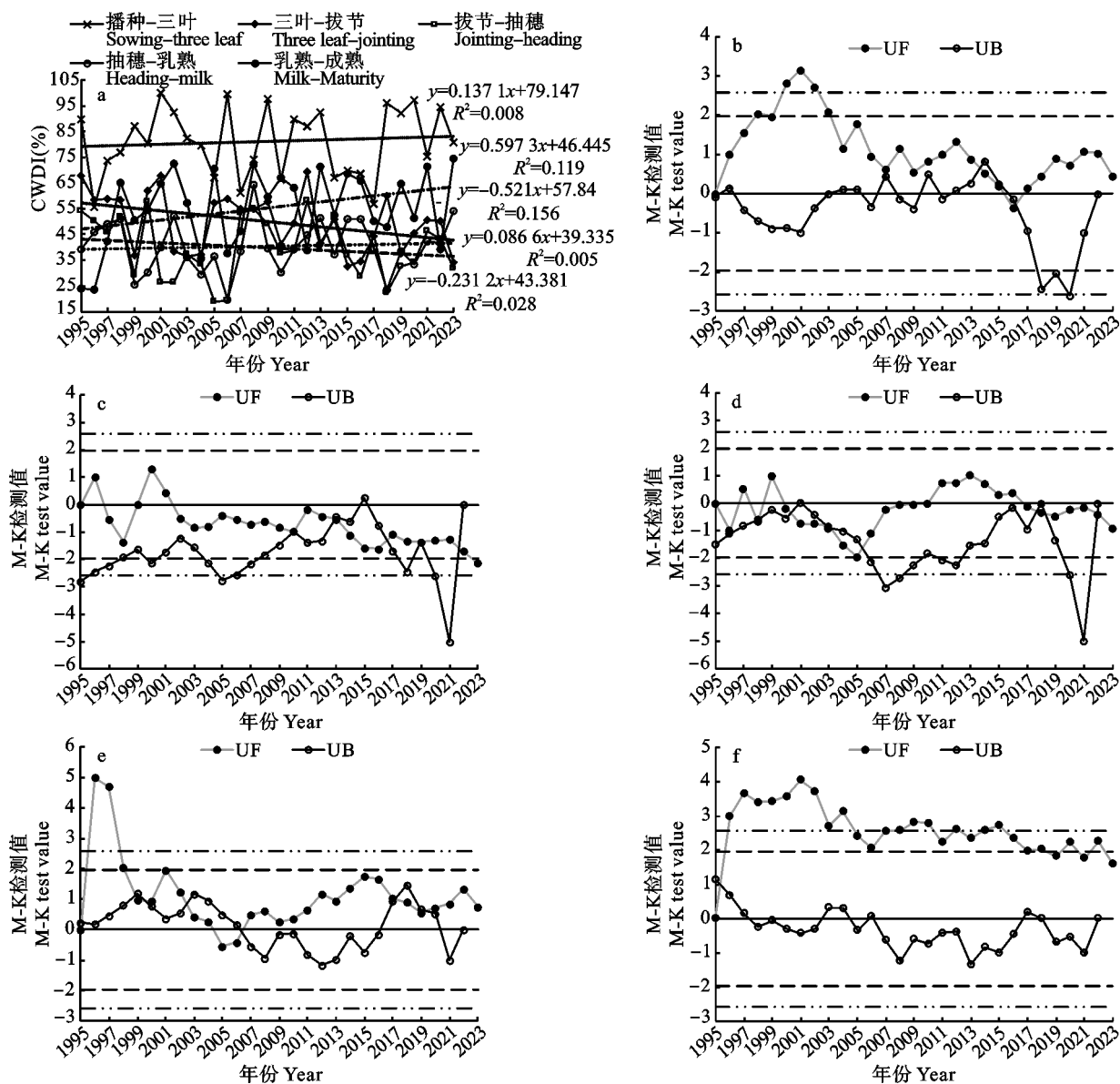


图 4 1995—2023 年春小麦各生育阶段 CWDI 的年际变化(a)及播种—三叶期(b)、三叶—拔节期(c)、拔节—抽穗期(d)、抽穗—乳熟期(e)和乳熟—成熟期(f)的 M-K 突变检验

Fig. 4 Inter-annual variation of CWDI(a) at different growth stages of spring wheat during 1995—2023 and M-K mutation test results of sowing—three leaf stage(b), three leafing—jointing stage(c), jointing—heading stage(d), heading—grain filling stage(e), grain—filling-maturity stage(f)

T1 处理 2022—2023 年播种—三叶期、抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期 CWDI 分别为 84%、79% 和 81%，出现中—重旱； R_{sm} 分别为 82%、39% 和 39%，播种—三叶期因冬灌墒情较好，保证了春小麦前期生长。其三叶—拔节期、拔节—抽穗期 CWDI 分别为 49% 和 50%，未出现干旱； R_{sm} 分别为 64% 和 46%，拔节—抽穗期出现轻旱。因从分蘖期进行干旱胁迫，播种—拔节期春小麦正常生长，但从拔节后春小麦逐渐因缺水干旱而在乳熟期就青枯且部分未抽穗。

T2 处理 2022—2023 年播种—三叶期、抽穗—乳熟期、乳熟—成熟期 CWDI 分别为 91%、95% 和 70%，出现中—重旱； R_{sm} 分别为 77%、43% 和 38%，播种—三叶期同样因冬灌墒情较好，保证了春小麦前期生长。其三叶—拔节期 CWDI 为 45%，未出现干旱，拔节—抽穗期 CWDI 为 66%，出现中旱， R_{sm} 分别为 72% 和 61%，墒情较好，未出现干旱。因从孕穗期进行干旱胁迫，播种—抽穗期春小麦正常生长，但从抽穗后春小麦逐渐因缺水干旱而在成熟前青枯导致减产。

2022—2023年春小麦全生育期CK、T1、T2处理下CWDI分别为57%、69%、74%，发生轻到中旱。在T1、T2处理下，春小麦减产率分别为51%和41%。在春小麦生长关键期发生干旱，会导致严重减产。

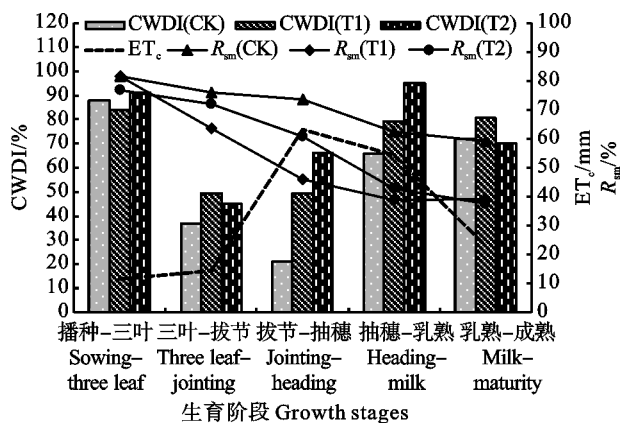


图5 2022—2023年春小麦各生育阶段ET_c、R_{sm}和CWDI

Fig. 5 ET_c, R_{sm} and CWDI at different growth stages of spring wheat in 2022–2023

3 讨论

3.1 基于CWDI的春小麦干旱评估与改进方向

春小麦对于干旱胁迫的响应是复杂的物理化学过程^[25],关键期生育阶段遭遇干旱会导致严重减产。本研究采用整合降水、灌溉与蒸散条件的CWDI对研究区春小麦干旱状况进行评估,从水分来源(供给)和支出(需求)两方面分析水分亏缺情况。该方法不仅考虑了作物本身的水分供需状况,也纳入了土壤水分因素。本研究发现,CWDI与土壤相对湿度呈弱负相关,这与研究发现改进后的CWDI与土壤相对湿度呈显著负相关^[25]的结论存在一定差异。在无灌溉条件下,本研究中CWDI干旱等级与实际旱情完全一致的比例为55%,高于张晓芳^[16]等研究中45%的完全一致率,可能是该研究未考虑灌溉,表明灌溉因素对CWDI的本地适用性有显著影响,也说明现有CWDI模型需进一步改进以适应本地化精准评估需求。此外,鉴于遥感技术具有实时、高效和大范围动态监测的优势^[26],未来研究应着力将遥感数据与农业模型深度结合,构建更精细、精准的干旱评估模型,以增强春小麦干旱预警与管理的精准性。

3.2 主导气象因子的区域异质性

本研究结果表明,地表净辐射、日平均气温和日平均相对湿度是影响研究区春小麦需水量最显

著的气象因子。这与张华等^[22]、王瑶等^[27]研究发现导致小麦需水量变化的主导气象因子依次为日照时数、日平均气温、日平均2 m高处风速和日平均相对湿度结果不完全一致,这可能与研究区的气候特征和范围有关。

本研究区可能处于辐射能量供给成为作物蒸散主要驱动力的环境中,因此地表净辐射取代了日照时数,成为更直接的能量表征指标,其对气孔导度和蒸散过程的控制作用更为凸显。此外,日平均2 m高处风速在本研究中影响相对较弱,这可能是因为研究区地形相对平坦或植被覆盖状况降低了近地表的风速,削弱了其作为水汽输送动力因子的贡献。相反,本研究出现日平均相对湿度是表征空气干湿状况的关键因子,这与张华等^[21]、王瑶等^[27]研究结果一致。这反映了大气蒸发需求对作物需水量的普遍影响。

综上所述,导致春小麦需水量变化的主导气象因子并非一成不变,其重要性排序会受到区域气候类型(如干旱区与湿润区)、地形地貌及局部环境条件的深刻影响。

4 结论

春小麦拔节至抽穗期为需水高峰期,但研究区自然降水少,此阶段水分亏缺严重,需优先保障此阶段春小麦的灌溉,解决水分不足问题。研究区无灌溉时春小麦整个生长期持续干旱,而灌溉使春小麦干旱情况显著改变,从“全生育期持续干旱”转为主要在“播种期干旱”,但播种期干旱对春小麦产量影响不大,说明冬灌能有效缓解干旱影响,是低成本抗旱的重要措施。无灌溉区CWDI呈极显著上升趋势,需重点防控拔节至抽穗期发生极端干旱。灌溉区三叶至拔节期CWDI呈显著下降趋势,可优化此阶段供水,播种期依赖冬灌蓄墒即可控灾。3月中旬到4月中旬(播种至三叶期)为春旱高发期,需建立土壤墒情与降水联合监测机制,提前启动抗旱预案。

研究区春小麦生产面临气候变化加剧干旱+小麦需水高峰期与自然供水不匹配的的双重胁迫,灌溉可根本性扭转干旱局面,但需采取分阶段管理:依靠冬灌蓄墒为基础、拔节至抽穗期供水为核心、三叶至拔节期精准调控供水,实现水资源高效利用。未来需融合工程措施(如升级灌溉设施)和农艺措施(如选用耐旱品种、覆盖保墒),共同构建适应气候变化的抗旱体系。

参考文献:

- [1] 丁一汇. 中国气候变化科学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2008:10-18.
- DING Y H. Introduction to climate change science in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008:10-18.
- [2] 许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地12种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2020, 29(10):22.
- XU A Y, CAO B, XIE Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10):22.
- [3] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8):880.
- KANG S Z. Towards water and food security in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8):880.
- [4] 宋廷强, 鲁雪丽, 卢梦瑶, 等. 基于作物缺水指数的农业干旱监测模型构建[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24):65.
- SONG T Q, LU X L, LU M Y, *et al.* Construction of agricultural drought monitoring model based on crop water stress index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(24):65.
- [5] 刘俊国, 刘明欢, 徐沙沙. 气候变化背景下的水资源管理与粮食安全保障[J]. 中国水利, 2024(17):21.
- LIU J G, LIU M H, XU S S. Water resource management and food security in the context of climate change [J]. *China Water Resources*, 2024(17):21.
- [6] 聂志刚, 任新庄, 李广, 等. 基于APSIM的甘肃春小麦干旱致灾风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6):194.
- NIE Z G, REN X Z, LI G, *et al.* Assessment of drought risk on spring wheat in Gansu using APSIM [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6):194.
- [7] 田中伟, 王妮妮, 李怡香, 等. 分蘖期和拔节期干旱对小麦主茎和分蘖穗粒形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(6):734.
- TIAN Z W, WANG N N, LI Y X, *et al.* Effect of water deficit on main stem and tiller grain number formation of wheat during tillering stage and jointing stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(6):734.
- [8] 杨贝贝, 赵丹丹, 任永哲, 等. 不同小麦品种对干旱胁迫的形态生理响应及抗旱性分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(2):131.
- YANG B B, ZHAO D D, REN Y Z, *et al.* Drought resistance of different wheat cultivars and physiological response to drought stress [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2017, 51(2):131.
- [9] SHANE M W, MCCULLY M E, CANNY M J, *et al.* Seasonal water relations of *Lyginia barbata* (Southern rush) in relation to root xylem development and summer dormancy of root apices [J]. *The New Phytologist*, 2010, 185(4):1025.
- [10] BLUM A. Effective use of water(EUW) and not water-use efficiency(WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress [J]. *Field Crops Research*, 2009, 112(2-3):119.
- [11] 卢秉林, 车宗贤, 包兴国, 等. 留茬免耕播种对河西绿洲灌区春小麦出苗和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9):3249.
- LU B L, CHE Z X, BAO X G, *et al.* Effects of no-tillage sowing with crop stubbles on seeding emergence and yield of spring wheat in Hexi Oasis Irrigated Area, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9):3249.
- [12] 张舵, 李援农, 王增红, 等. 生育后期灌水量对河西春小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(6):68.
- ZHANG D, LI Y N, WANG Z H, *et al.* Effects of irrigation amount in late growth stage on yield and water use efficiency of spring wheat in Hexi Corridor [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(6):68.
- [13] 户广勇, 王素芬, 杨杰. 河西走廊地区春小麦需水量驱动因素分析[J]. 节水灌溉, 2016(9):151.
- HU G Y, WANG S F, YANG J. The analysis of impact factors of spring wheat water requirement in Hexi Region [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(9):151.
- [14] 雷俊, 张健, 赵福年, 等. 春小麦开花期光合参数对土壤水分和温度变化的响应[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6):1151.
- LEI J, ZHANG J, ZHAO F N, *et al.* Response of photosynthetic parameters for spring wheat at flowering stage to soil moisture and temperature [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6):1151.
- [15] 赵福年, 王润元, 张凯, 等. 叶片光合生理参数变化特征与小麦受旱状态的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1):107.
- ZHAO F N, WANG R Y, ZHANG K, *et al.* Relationship between drought severity and leaf photosynthetic physiological parameter variation of spring wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1):107.
- [16] 张晓芳, 张勃, 马尚谦, 等. 基于作物水分亏缺指数分析北方旱作地区春玉米干旱时空变化[J]. 中国农业气象, 2022, 43(9):749.
- ZHANG X F, ZHANG B, MA S Q, *et al.* Analysis on temporal and spatial variation of spring maize drought in dry farming area of northern China based on crop water deficit index [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(9):749.
- [17] 中国气象局. 农业气象观测规范(主要作物卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2024. 48-75.
- China Meteorological Administration. Agricultural meteorological observation specification(major crops volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2024. 48-75.
- [18] 杨华, 丁文魁, 王鹤龄, 等. 河西走廊地区气候变化对灌溉春小麦生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1):207.
- YANG H, DING W K, WANG H L, *et al.* Impact of climate change on irrigated spring wheat growth in Hexi Corridor [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1):

- 207.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业干旱等级(GB/T 32136-2015)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Agricultural Drought Classification(GB/T 32136-2015) [S]. Beijing. China Standards Press, 2015.
- [20] 中国科学院地理研究所经济地理研究室. 中国农业生产布局[M]. 北京: 北京出版社, 1983: 30-53.
- Department of Economic Geography, Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Agricultural production distribution in China [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1983: 30-53.
- [21] 张 华, 王 浩. 1967—2017 年甘肃省小麦需水量和缺水时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1094.
- ZHANG H, WANG H. Spatial and temporal characteristics of water requirement and water deficit of wheat in Gansu Province from 1967 to 2017 [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 1094.
- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [J]. *Fao, Rome*, 1998, 300(9): D05109
- [23] 祁嘉郁, 巴特尔·巴克. 基于水分亏缺指数的北疆春小麦不同生育阶段干旱时空特征[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 171.
- QI J Y, BATEER B. Temporal and spatial characteristics of drought in different growth stages of spring wheat in northern Xinjiang based on crop water deficit index [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4): 171.
- [24] 杨 华, 蒋菊芳, 刘明春, 等. 石羊河流域风蚀气候侵蚀力时空特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2025, 19(2): 28.
- YANG H, JIANG J F, LIU M C, *et al.* Spatial and temporal characteristics of wind erosion climatic erosivity in the Shiyang River Basin [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2025, 19(2): 28.
- [25] 张淑杰, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 基于改进作物水分亏缺指数的玉米干旱致灾过程识别与动态定量评估[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4241.
- ZHANG S J, ZHANG Y S, CHEN P S, *et al.* Identification and dynamic quantitative evaluation of maize drought-induced disaster process based on an improved crop water deficit index [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 4241.
- [26] 权文婷, 王旭东, 李红梅. 基于 FY-3D/MERS I-II 数据的陕西农业干旱遥感监测应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 158.
- QUAN W T, WANG X D, LI H M. Application of remote sensing monitoring of drought in Shaanxi Province using FY-3D/MERS I-II data [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 158.
- [27] 王 瑶, 赵传燕, 田风霞, 等. 黑河中游春小麦需水量空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2374.
- WANG Y, ZHAO C Y, TIAN F X, *et al.* Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2374.