

# 陕西省延安市主要作物生育期 降水量和需水量的关系

炎艺霖<sup>1</sup>, 戈文艳<sup>1,2</sup>, 王飞<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中科院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究陕西省延安市主要作物水分供需特征, 为该地区作物需水研究和作物种植结构调整提供参考。[方法] 基于延安地区气象站的逐日气象观测资料(2000—2020年), 采用FAO-56公式和作物系数法对该区主要作物(春玉米、春谷子、马铃薯和冬小麦)生育期内需水量、有效降水量和灌溉需水量的变化特征及作物水分供需进行了研究。[结果] 2000—2020年延安地区春玉米生育中期需水量和有效降水量最大, 分别为247.85 mm和68.34 mm; 缺水率以6.61 mm/10 a的速率增加。马铃薯生育中期需水量和有效降水量最大, 分别为288.83 mm和89.53 mm; 缺水率以5.75 mm/10 a的速率增加。春谷子在生育中期需水量和有效降水量最大, 分别为248.29 mm和71.68 mm; 缺水率以-7.0 mm/10 a的速率减少。冬小麦在快速发育期需水量最大, 为192.98 mm, 有效降水量在生育初期达到峰值, 为31.14 mm; 缺水率以9.94 mm/10 a的速率增加。主要作物即使在有效降水达到峰值的情况下, 作物生长对水分的需求仍然亏缺。[结论] 应采取减少春玉米种植面积, 增加春谷子和马铃薯种植面积等措施改善作物种植结构, 或增加田间集水设施以提高雨水资源利用效率, 从而保障延安地区粮食生产的可持续发展。

**关键词:** 作物需水量; 有效降水量; 灌溉需水量; 陕西省延安市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0399-10

中图分类号: S274, S164

**文献参数:** 炎艺霖, 戈文艳, 王飞. 陕西省延安市主要作物生育期降水量和需水量的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 399-408. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.040; Yan Yilin, Ge Wenyan, Wang Fei. Relationship between precipitation and water requirement during growth period of major crops in Yan'an City, Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 399-408.

## Relationship between Precipitation and Water Requirement During Growth Period of Major Crops in Yan'an City, Shaanxi Province

Yan Yilin<sup>1</sup>, Ge Wenyan<sup>1,2</sup>, Wang Fei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of water supply and demand for major crops in Yan'an City were investigated to provide references for the water requirements of crops and the structure of crop planting in the region. [Methods] Based on daily meteorological observation data from meteorological stations in the Yan'an City (from 2000 to 2020), the FAO-56 formula and crop coefficient method were used to study the characteristics of water requirements, effective precipitation, and irrigation water demand during the growth period of major crops (spring maize, spring millet, potatoes, and winter wheat) in the region. [Results] From 2000 to 2020, spring maize in the Yan'an City had the highest water requirement and effective precipitation during the mid-growing stage, which were 247.85 mm and 68.34 mm, respectively, with a

收稿日期: 2024-09-01

修回日期: 2024-10-08

资助项目: 国家自然科学基金黄河水科学研究联合资助项目“黄土高原极端暴雨土壤侵蚀致灾及蓄排协调防控机制”(U2243213)

第一作者: 炎艺霖(1999—), 男(汉族), 河南省新乡市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: yyl2022@nwfau.edu.cn.

通信作者: 王飞(1971—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理方面的研究工作。Email: wafe@ms.iswc.ac.cn.

water deficit increasing at a rate of 6.61 mm per decade. Potatoes also had the highest water requirement and effective precipitation during the mid-growing stage, which were 288.83 mm and 89.53 mm, respectively, with a water deficit increasing at a rate of 5.75 mm per decade. Meanwhile, spring millet had the highest water requirement and effective precipitation during the mid-growing stage, which were 248.29 mm and 71.68 mm, respectively, with a water deficit decreasing at a rate of  $-7.0$  mm per decade. Winter wheat had the highest water requirement during the rapid development stage, at 192.98 mm, with effective precipitation peaking in the early growth stage at 31.14 mm; the water deficit increased at a rate of 9.94 mm per decade. This indicates that even when effective precipitation reaches its peak, water demand for crop growth remains deficient. [Conclusion] The planting area of spring maize should be reduced, and that of spring millet and potatoes should be expanded, to improve the structure of crop planting. Additionally, increasing on-farm water collection measures can enhance the efficiency of rainwater resource utilization, ensuring sustainable development of food production in the Yan'an City.

**Keywords:** crop water requirement; effective precipitation; irrigation water requirement; Yan'an City of Shaanxi Province

气候变化对水资源和作物生产的影响是 21 世纪中国关注的重大问题<sup>[1]</sup>。尤其是黄土高原对气候变化极为敏感,近十几年来该区域平均气温和降水呈上升趋势<sup>[2-3]</sup>。由于气温和降水格局的变化,气候变化必然会改变水文循环过程<sup>[4]</sup>,而环境的变化会影响作物的生理特性,从而改变作物的需水量,为了保证作物在最佳水分条件下生长,其水分供需关系必然发生变化<sup>[5-6]</sup>。

位于陕北黄土丘陵沟壑区的延安市,北部属于半干旱南部属于半湿润地区,对气候变化极为敏感,受气候变化该区年内降水分配极不均衡<sup>[2]</sup>,给当地水资源利用和农作物产量带来严重影响。延安市作为陕北粮食作物主产区,生产粮食有玉米、谷子、马铃薯和小麦等。有部分学者<sup>[7-9]</sup>对陕北地区玉米需水量、谷子耗水量和马铃薯需水量进行了研究,为当地提供了可靠的科学依据,但缺乏对冬小麦作物的需水量研究。冬小麦作为延安地区夏粮作物,经历了由盛转衰的历史过程<sup>[10]</sup>。近年来黄土高原平均气温上升增加了冬小麦生产区积温,为冬小麦北移提供了物候条件<sup>[11]</sup>。虽然已有研究分析了气温和 CO<sub>2</sub> 增加对该地区冬小麦产量有积极作用<sup>[12]</sup>,但有关冬小麦需水量的研究鲜有报道。此外,对于该地区春玉米、马铃薯、春谷子和冬小麦这 4 种作物生育期内水分供需情况和变化规律等研究还有待深入和探讨。特别是在气候变化背景下,该地区主要作物不同生育期的有效降雨量与作物需水量之间的供需关系是怎样的?作物种植结构是否需要调整?基于此,有必要针对其作物需水量、有效降雨量和灌溉需水量等指标进行作物水分供需分析,以便为该地区作物的水分优化管理、水资源规划提供可靠的、有针对性的理论基础。

本研究将文献中涉及陕西省延安地区种植结构较为稳定的粮食作物(春玉米、马铃薯、春谷子、冬小麦)称主要作物,基于延安地区气象站逐日气象观测资料(2000—2020 年)及相关文献数据,分析主要作物水分供需,以期为半干旱半湿润区农业用水提供科学依据。

## 1 材料方法

### 1.1 研究区概况

延安市地处黄河中游的黄土高原丘陵沟壑区(35° 21'—37° 31' N, 107° 41'—110° 31' E),总面积 37 037 km<sup>2</sup>,平均海拔为 1 200 m,地势总体呈现西北高东南低,地貌以高原、丘陵为主。该区域北部为半干旱,南部为半湿润,季节温差大,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。年平均气温 9.7 °C,年平均降水量 490 mm。

截止 2020 年延安地区耕地面积 4 158 km<sup>2</sup>,其中水田比例为 0.17%,水浇地占比为 1.62%,旱地比例为 98.21%<sup>[13]</sup>,农作物主要有玉米、马铃薯、小麦和谷子<sup>[14]</sup>,4 种作物 2020 年产共 6.18×10<sup>5</sup> t,其比例分别为 78.2%, 13.3%, 1.5%, 7.0% (延安统计年鉴, 2021)。土地利用类型主要有耕地、林地、草地、水域、建筑用地和裸地 6 种类型(图 1)。

### 1.2 数据来源

本研究采用国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)的逐日气象数据(2000—2020 年),数据包括气温(平均、最高、最低)、风速、日照、相对湿度及降水量<sup>[15]</sup>,涉及吴旗、延长和洛川 3 个气象站点。利用已有文献<sup>[14, 16-17]</sup>获取延安地区玉米、马铃薯、小麦和谷子的物候期和作物系数(见表 1)。

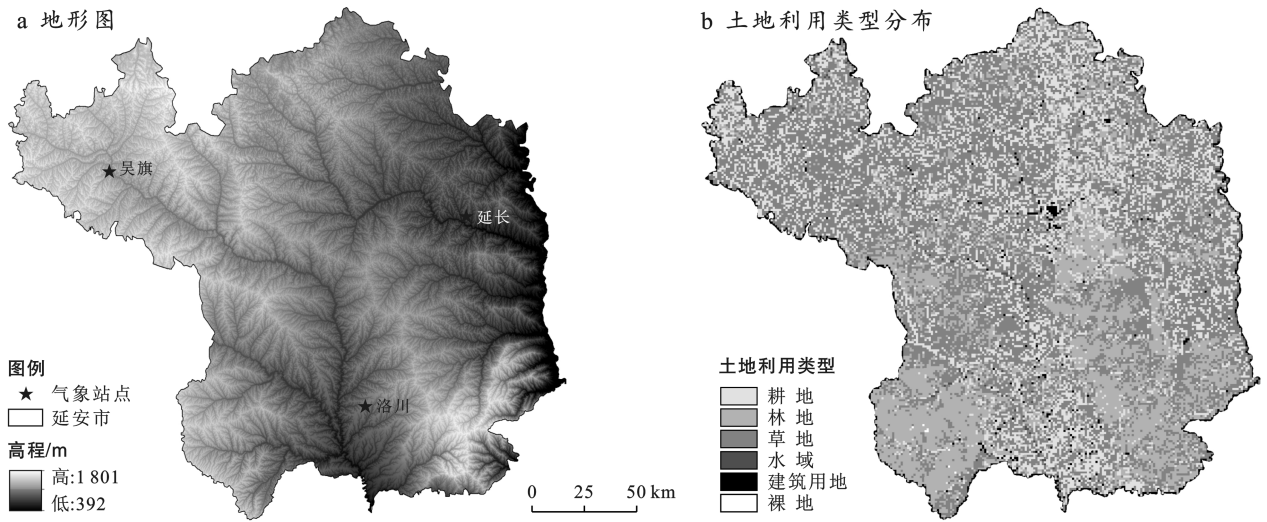


图 1 2020 年延安市地形图及土地利用类型分布

Fig.1 Topographic map and land use type distribution of Yan'an City in 2020

表 1 延安市 4 种作物的作物系数、生育期和生长季长度

Table 1 Crop coefficient, growth period and length of growing season for four types of crops in Yan'an City

作物	初期(I)		越冬期(II)		快速发育期(III)		中期(IV)		成熟期(V)		生长期/d
	日期	生长系数	日期	生长系数	日期	生长系数	日期	生长系数	日期	生长系数	
春玉米	0501—0531	0.30	—	—	0601—0710	0.30~1.20	0711—0830	1.20	0831—1020	0.35~1.20	170
马铃薯	0501—0615	0.20	—	—	0616—0715	0.20~1.15	0716—0923	1.15	0924—1013	0.75~1.15	165
春谷子	0501—0521	0.30	—	—	0522—0620	0.30~1.00	0621—0815	1.00	0816—0920	0.30~1.00	140
冬小麦	1001—1210	0.70	1211—0228	0.40	0301—0430	0.40~1.60	0501—0520	1.60	0521—0610	0.80~1.6	25

注:符号“—”表示该作物不具有此生育阶段。下同。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 计算方法

(1) 作物需水量。作物需水量利用(1)式计算,借助 FAO-56 公式(2)计算<sup>[15]</sup>参照作物需水量:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

$$ET_0 = \frac{408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} V_2 (P_c - P_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V_2)} \quad (2)$$

式中:  $ET_c$  为作物需水量(mm);  $K_c$  为作物系数(见表 1);  $ET_0$  为潜在蒸散量(mm);  $\Delta$  为饱和水气压与温度曲线的斜率(kPa/°C);  $R_n$  为作物冠层表面净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $G$  为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $\gamma$  为湿度计常数(kPa/°C);  $T$  为平均气温(°C);  $P_c$ 、 $P_d$  分别为饱和、实测水汽压(kPa);  $V_2$  为 2 m 高处的风速(m/s)<sup>[9,15]</sup>。

(2) 有效降水量。有效降水量采取美国农业部土壤保育局给出的经验公式进行估算<sup>[18]</sup>:

$$P_e = \begin{cases} P \times \frac{4.17 - 0.2 \times P}{4.17} & (P < 8.34) \\ 4.17 + 0.1 \times P & (P \geq 8.34) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $P_e$ (mm) 为有效降水量,  $P$ (mm/d) 为日降水量。

(3) 灌溉需水量。灌溉需水量(缺水量)可由作物需水量和有效降水计算获得<sup>[15,18]</sup>:

$$IR = ET_c - P_e \quad (4)$$

式中:  $IR$ (mm) 为灌溉需水量;  $P_e$ (mm) 为同期有效降水。

(4) 作物水分盈亏指数。作物水分盈亏指数(CWDI)显示了作物在特定时段内水分的累计盈亏情况<sup>[19-20]</sup>,反映了作物供水和需水之间的关系,并能有效地指示农田的湿润程度与旱涝状况<sup>[20]</sup>。CWDI 大于 0 表示水分盈余,CWDI 等于 0 表示水分平衡,CWDI 小于 0,表示水分亏缺。根据水分盈亏指数划分干旱等级<sup>[20]</sup>(见表 2)。

$$CWDI = \frac{(P_{ei} - ET_{ci})}{ET_{ci}} \quad (5)$$

式中:  $P_{ei}$  为生育期各阶段有效降雨量;  $ET_{ci}$  是生育期各阶段作物需水量。

#### 1.3.2 分析方法

(1) Mann-Kendall(M-K)检验 M-K 检验是一种非参数统计检验方法,对于具有  $n$  个样本的时间序

列  $x$ , 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3 \cdots n) \quad (6)$$

$$\text{其中 } r_i = \begin{cases} +1x_i > x_j \\ +0x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2 \cdots i)$$

表 2 作物生育阶段水分盈亏指数干旱等级

Table 2 Drought grade of water deficit index in crop growth stage

干旱等级	特旱(ED)	重旱(HD)	中旱(MD)	轻旱(MID)	正常(N)
作物水分盈亏指数/%	$\leq -0.95$	$(-0.95, -0.85]$	$(-0.85, -0.65]$	$(-0.65, -0.45]$	$(-0.45, 0.45]$

在时间序列随机独立的假设下定义统计量:

$$UF_k = \frac{|s_k - E(s_k)|}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k=2, 3 \cdots n) \quad (7)$$

式中:  $UF_1=0$ ,  $E(s_k)$ ,  $\text{var}(s_k)$  是累计数  $s_k$  的均值和方差, 在  $x_1, x_2 \cdots x_n$  相互独立, 且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad (k=2, 3 \cdots n) \quad (8)$$

$UB_k = -UF_k (k=n, n-1 \cdots 1)$ ,  $UB_1=0$ 。若  $UF$  曲线大于 0, 表明数据随时间变化呈增加趋势, 小于 0 表示减少; 超过临界线表明趋势显著;  $UF$  与  $UB$  曲线交点在临界值之间时, 表示突变开始<sup>[19]</sup>。本文选定显著水平为  $\alpha=0.05$ , 则对应的临界值为  $\pm 1.96$ 。

(2) 线性趋势。采用一元线性回归方程中的斜率研究作物需水量等数据的变化特征, 表达式<sup>[15,20]</sup>为:

$$y = kx_i + b \quad (9)$$

式中:  $y$  为作物需水量;  $k$  为回归系数,  $x_i$  代表不同年份 ( $i=1, 2 \cdots 16$ ),  $b$  为截距。

(3) 耦合度。耦合度是指有效降水量与作物需水量的比值, 表示某一段时间内降水量对作物需水量的满足程度<sup>[20-21]</sup>。耦合度的公式为:

$$\lambda_i = \begin{cases} P_{ei}/ET_{ci} & (P_{ei} < ET_{ci}) \\ 1 & (P_{ei} \geq ET_{ci}) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_i$  为第  $i$  生育期的耦合度;  $P_{ei}$  为第  $i$  生育期的

有效降水量(mm);  $ET_{ci}$  为第  $i$  生育期的作物需水量(mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 潜在蒸散量与有效降水量变化特征

2000—2020 年延安市平均潜在蒸散量(图 2)呈逐年增加趋势, 变化率 1.86 mm/a。其多年平均潜在蒸散量为 994.92 mm, 增幅最大年份出现在值出现在 2003—2005 年和 2011—2020 年。

由图 3a 可知全生育期有效降水量的排列顺序为: 春玉米(186.05 mm) > 马铃薯(183.07 mm) > 春谷子(159.14 mm) > 冬小麦(97.99 mm)。从不同生育期来看, 春玉米、马铃薯和春谷子的有效降水量峰值均出现在中期, 其值分别为 68.34, 89.53, 71.68 mm, 冬小麦的有效降水量峰值出现在初期, 其值为 31.14 mm。

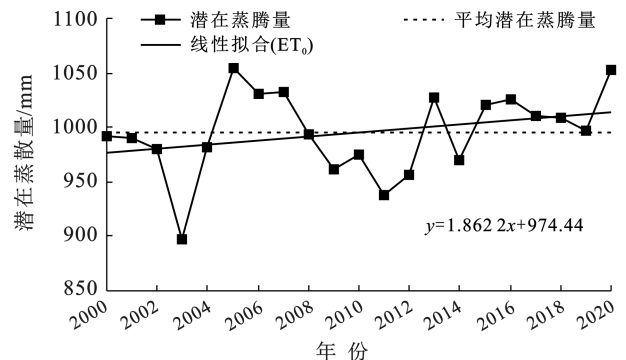


图 2 延安市 2000—2020 年潜在蒸散量年际变化  
Fig.2 Interannual variation of potential evapotranspiration in Yan'an City from 2000 to 2020

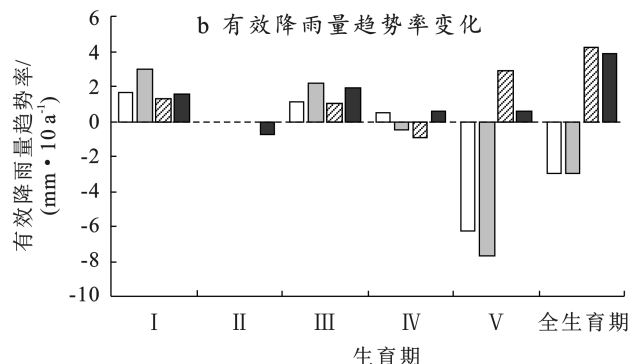
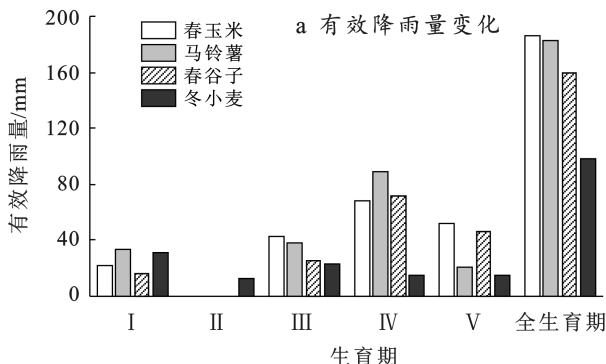


图 3 延安市主要作物生育期平均有效降水量及变化率(2000—2020 年)

Fig.3 Average effective precipitation and its rate of change during growth period of major crops in Yan'an City (2000—2020)

2000—2020年延安地区全生育期有效降水量变化趋势显示,春谷子和冬小麦呈增加趋势(图3b),其增加率分别为4.24和3.88 mm/10 a;而春玉米和马铃薯的有效降水量呈减少趋势,减少率分别为-3.0和-2.97 mm/10 a。从各生育阶段来看,生育初期和快速发育期4种作物的有效降水量变化率均为正值,变化范围分别在1.26~3.0和1.02~2.18 mm/10 a之间;越冬期冬小麦有效降水量呈减少趋势,为-0.77 mm/10 a;生育中期,有效降水量减少趋势的作物有马铃薯(-0.47 mm/10 a)和春谷子(-0.96

mm/10 a),而春玉米(0.49 mm/10 a)和冬小麦(0.56 mm/10 a)为增加趋势;成熟期,春谷子的有效降水量增加趋势最大(2.92 mm/10 a)是冬小麦增加趋势的4.87倍,马铃薯的有效降水量减少趋势最大(-7.68 mm/10 a)是春玉米的1.22倍。

图4表明春玉米和马铃薯的有效降水量呈减少趋势,变化率分别为-3.0和-2.97 mm/10 a,均呈现出先减后增的交替变化趋势;而春谷子和冬小麦的有效降水量则呈增加趋势,变化率分别为4.24和3.88 mm/10 a。

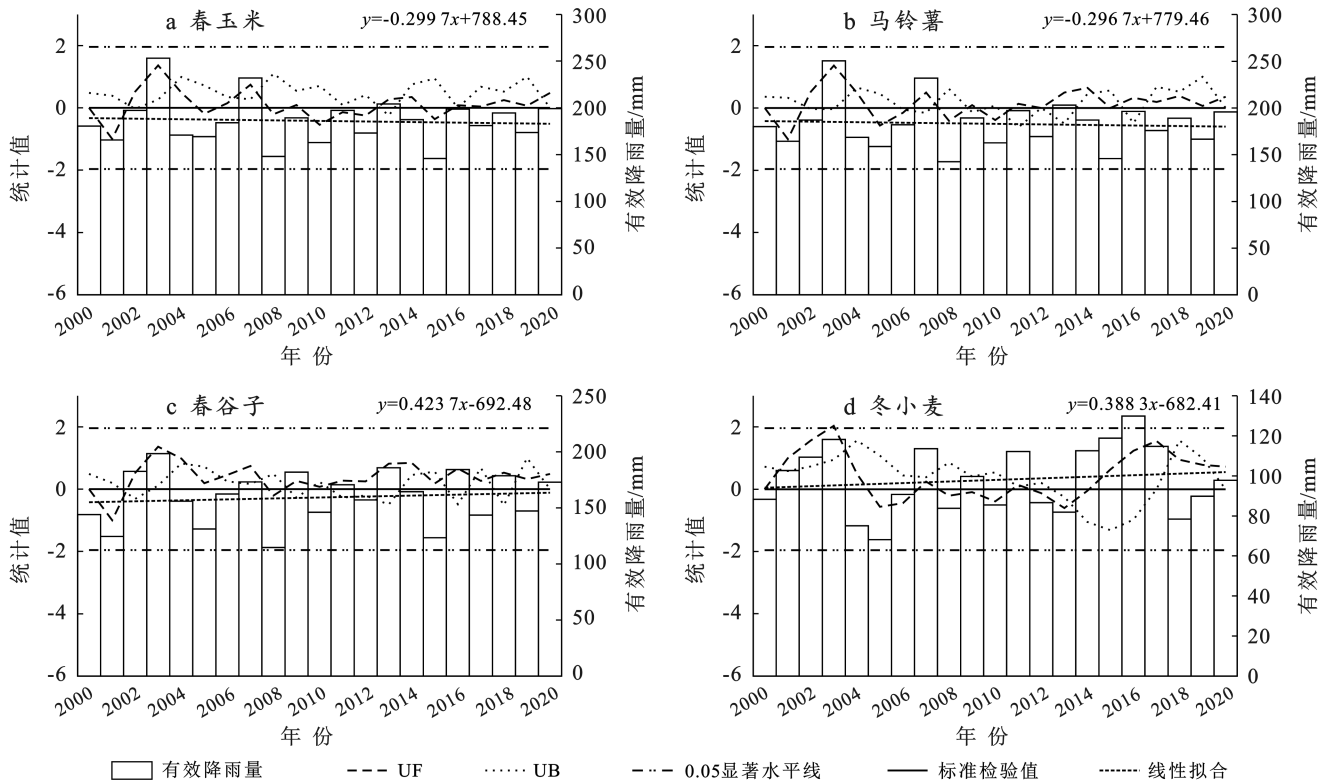


图4 延安市主要作物有效降水量年际变化趋势(2000—2020年)

Fig.4 Interannual trend of effective precipitation for major crops in Yan'an City (2000—2020)

## 2.2 作物需水量与灌溉需水量变化特征

主要作物全生育期的平均需水量(图5a)大小顺序为:春玉米(618.53 mm) > 冬小麦(555.02 mm) > 马铃薯(463.64 mm) > 春谷子(440.73 mm)。从各生育阶段来看,春玉米、马铃薯和春谷子在中期需水量最多,分别为247.85, 288.83, 248.29 mm,冬小麦在快速发育期需水量最多,为192.98 mm。此外,整体上(图5b)春玉米、马铃薯和春谷子的需水量变化率相对冬小麦(13.82 mm/10 a)较小,且春谷子为负值(-2.76 mm/10 a)。在生育初期,春玉米、马铃薯和春谷子的需水量变化率均不足0.10 mm/10 a,而冬小麦高达3.44 mm/10 a,与越冬期冬小麦需水量变化率(3.34 mm/10 a)相近;快速发育期冬小麦的需水量变化率达到最高(6.32 mm/10 a),而春玉米、马铃薯和春谷子均为负值,即

该时期作物需水量呈减少趋势,其中马铃薯变化最大(-4.35 mm/10 a);发育中期春谷子的需水量变化率呈减少趋势(-2.22 mm/10 a),是冬小麦需水量变化率的6.73倍;成熟期4种作物的需水量变化率均是正值,春玉米高达4.51 mm/10 a,是马铃薯的1.45倍,春谷子的37.58倍,冬小麦的4.30倍。就主要作物需水量变化率而言,春谷子在逐年减少,而春玉米、马铃薯和冬小麦均在逐年增加,且冬小麦增加幅度最大。

图6显示冬小麦、春玉米和马铃薯呈增加趋势,变化率分别为13.82, 3.61和2.78 mm/10 a。其中,冬小麦突变年份有4个,马铃薯和春玉米突变年份有5个,增加趋势不稳定。春谷子需水量呈逐年减少趋势(-2.76 mm/10 a),且在2001年出现1个突变点,减少趋势稳定。

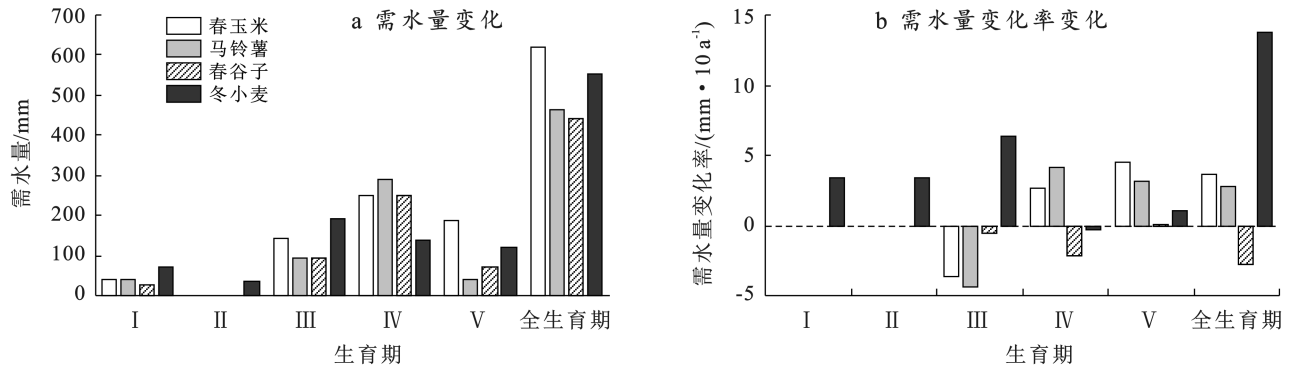


图 5 延安市作物生育期平均需水量及变化率(2000—2020年)

Fig.5 Average water requirement and its change rate of during growth period of crops in Yan'an City (2000—2020)

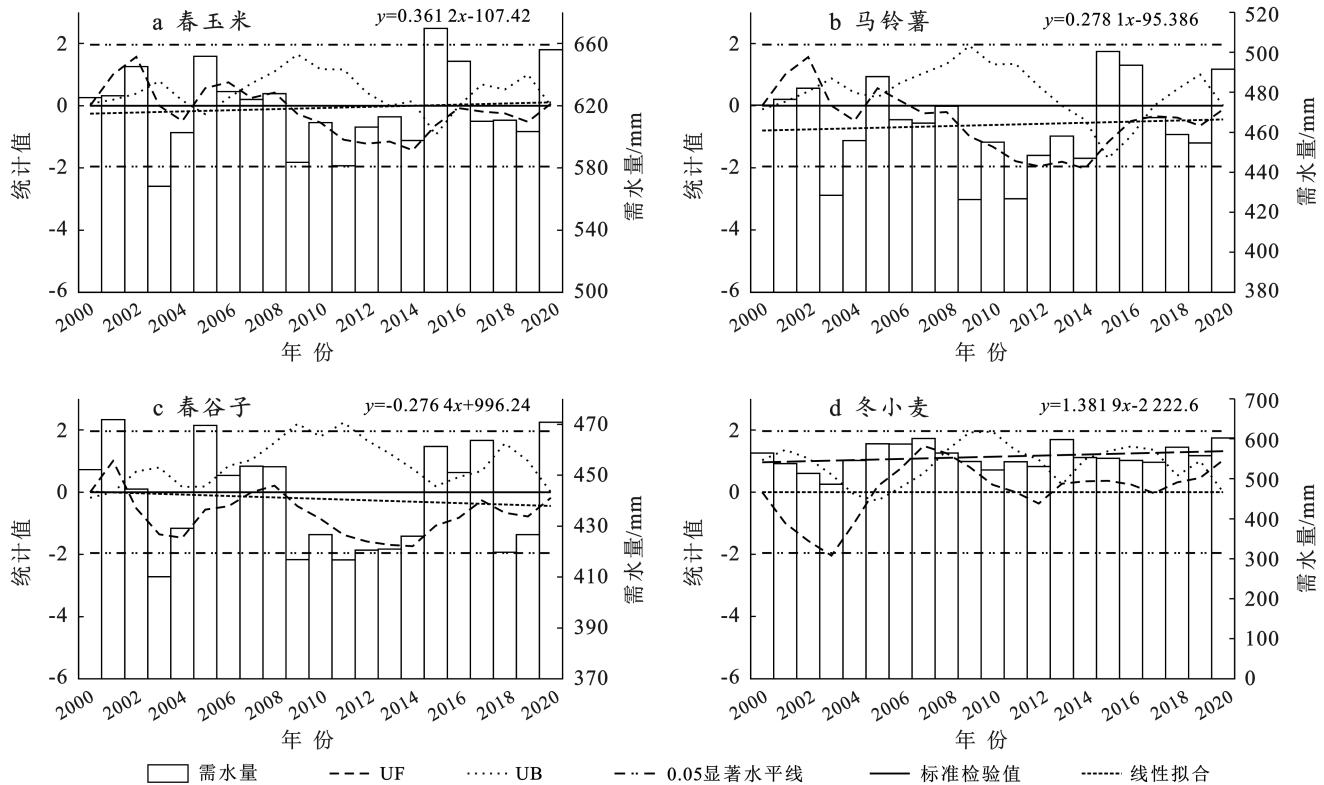


图 6 延安市作物需水量年际变化趋势(2000—2020年)

Fig.6 Interannual trend of crop water requirement change in Yan'an City (2000—2020)

分析主要作物在不同生育阶段的多年平均灌溉需水量(图 7a)可知,全生育期马铃薯灌溉需水量最小,为 280.57 mm,春谷子与之接近,为 281.59 mm,其次是春玉米(432.47 mm)和冬小麦(457.03 mm)。马铃薯和春谷子在中期的灌溉需水量最大,分别为 199.29 和 176.61 mm;而春玉米和冬小麦在快速发育期、中期和成熟期这 3 个时期的灌溉需水量均分别在 98.88 和 103.58 mm 以上。此外,由图 7b 可知,春玉米和马铃薯在成熟期灌溉需水量增长最快,均为 10.76 mm/10 a,冬小麦在快速发育期增长最快,为 4.39 mm/10 a;而春谷子在各生育阶段灌溉需水量均

为减少趋势,变化率小于零。

由图 8 可以看出,冬小麦、春玉米和马铃薯的灌溉需水量呈逐年增加趋势,变化率分别为 9.94, 6.61 和 5.75 mm/10 a。冬小麦和春玉米突变年份有 4 个,马铃薯突变年份有 5 个,均呈现减增交替的增加趋势。春谷子灌溉需水量呈逐年减少趋势,变化率为 -7.0 mm/10 a,突变年份有 2 个,呈现增减交替的下降趋势。

### 2.3 耦合度与作物水分盈亏分析

通过表 3 可以看出,延安地区马铃薯全生育期有效降水与作物需水耦合度最高(0.40),其次是春谷子

(0.36)和春玉米(0.30),冬小麦最低,为0.18。从各生育阶段来看,马铃薯的耦合度在生育初期、快速发育期和生育中期是4种作物中最高的,其耦合度值分别

为0.77,0.42,0.31。春玉米和春谷子在生育初期、快速发育期和生育中期相近,而在成熟期春谷子的耦合度是春玉米的2.29倍。

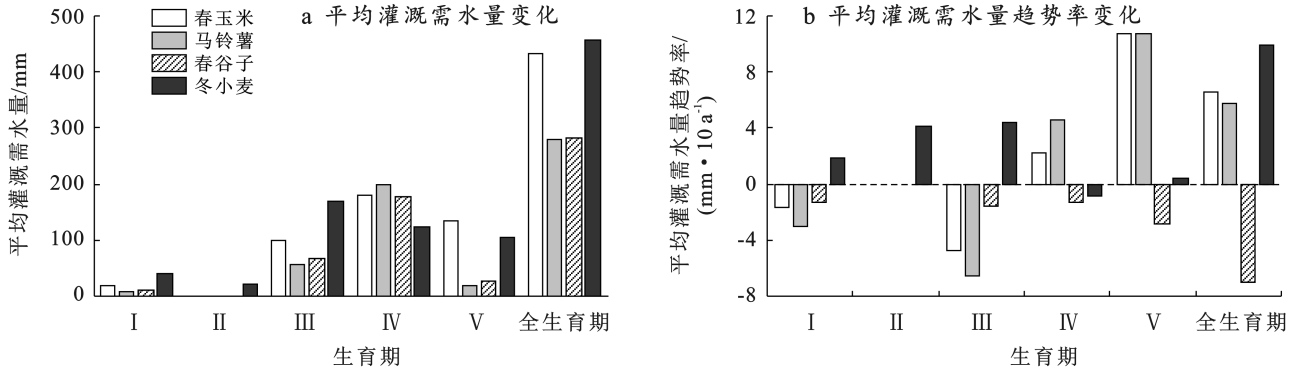


图 7 延安市作物生育阶段平均灌溉水量及其变化率(2000—2020年)

Fig.7 Average irrigation water volume and its change rate during crop growth stages in Yan'an City (2000—2020)

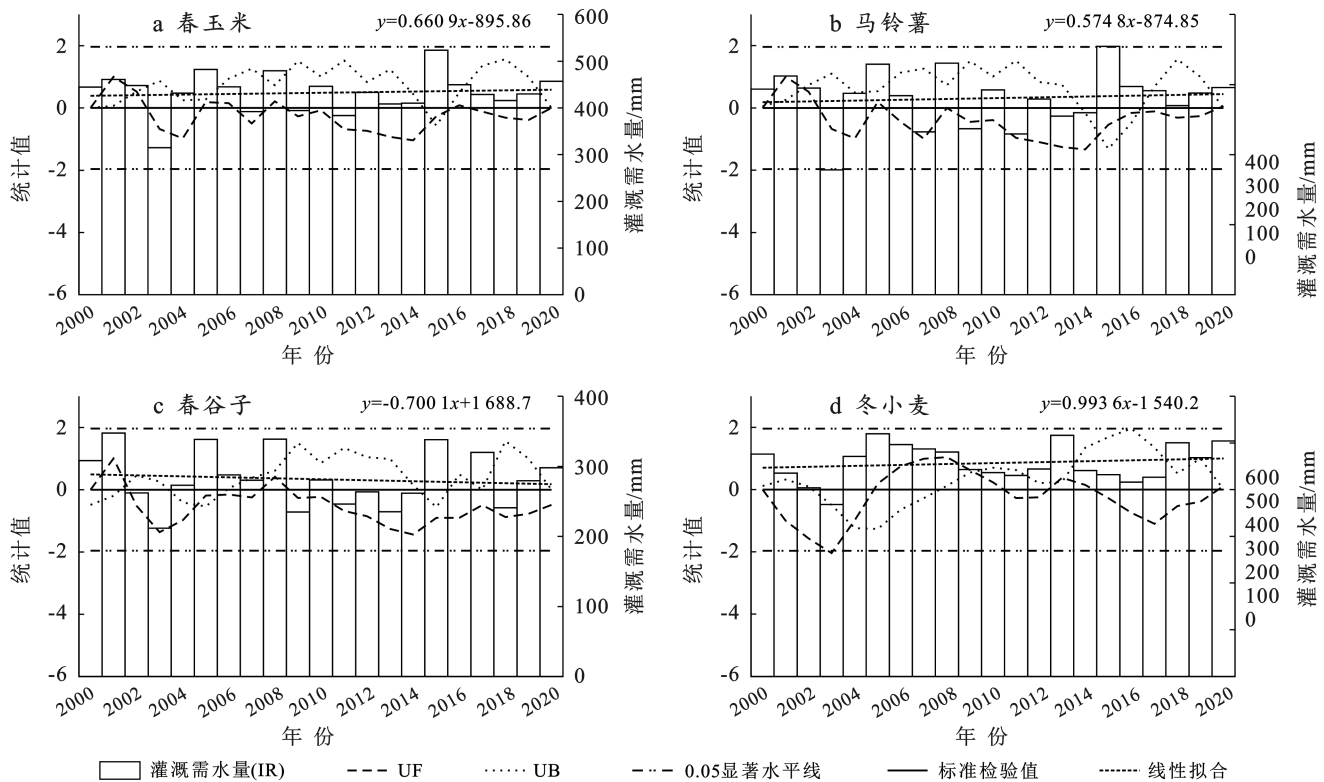


图 8 延安市作物灌溉需水量年际变化趋势(2000—2020年)

Fig.8 Interannual trend of irrigation water requirement change for crops in Yan'an City (2000—2020)

表 3 2000—2020年延安市主要作物生育期内耦合度

Table 3 Coupling degree of major crops' growth stages in Yan'an City from 2000 to 2020

主要作物	耦合度 $\lambda_i$					
	生育初期	越冬期	快速发育期	生育中期	成熟期	全生育期
春玉米	0.55	—	0.31	0.28	0.28	0.30
马铃薯	0.77	—	0.42	0.31	0.52	0.40
春谷子	0.59	—	0.27	0.29	0.64	0.36
冬小麦	0.46	0.39	0.12	0.12	0.13	0.18

由表 4 可以看出,延安地区主要作物全生育期水分盈亏指数。由大到小依次为马铃薯(-0.60)、春谷子(-0.64)、春玉米(-0.70)和冬小麦(-0.81)。其中冬小麦干旱等级属于重旱,春玉米属于中旱,马铃

薯和春谷子属于轻旱。从不同作物生育阶段来看,马铃薯在生育初期、快速发育期和生育中期具有更轻的干旱等级,其次是春谷子和春玉米,而冬小麦的干旱等级更严重,与其对应的盈亏指数也更小。

表 4 2000—2020 年延安市主要作物生育期内水分盈亏指数

Table 4 Crop water deficit index during growth stages of major crops in Yan'an City from 2000 to 2020

主要作物	水分盈亏指数/干旱等级					
	生育初期	越冬期	快速发育期	生育中期	成熟期	全生育期
春玉米	-0.45/MID	—	-0.69/MD	-0.60/MID	-0.57/MID	-0.70/MD
马铃薯	-0.18/N	—	-0.58/MID	-0.53/MID	-0.69/MD	-0.60/MID
春谷子	-0.38/N	—	-0.73/MD	-0.58/MID	-0.73/MD	-0.64/MID
冬小麦	-0.54/MID	-0.61/MD	-0.88/HD	-0.86/HD	-0.84/MD	-0.81/HD

注:ED 表示特旱;HD 表示重旱;MD 表示中旱;MID 表示轻旱;N 表示正常。

## 3 讨论

### 3.1 作物有效降水量与需水量及耦合度

在全球气候变化的影响下,中国潜在蒸散量逐年增减<sup>[15,17,19-20,22]</sup>。本研究发现,延安地区潜在蒸散量呈逐年增加趋势,这可能受全球气候变化影响<sup>[2-3]</sup>。另一方面,水分是限制该区旱作农业发展的突出因素,但在该区有效降水量时空分布不均<sup>[23]</sup>,由于作物生育期不同作物有效降水量变化趋势也不相同<sup>[15,19-20]</sup>,本研究中春谷子和冬小麦的有效降水量为增加趋势,分别为 4.24 和 3.88 mm/10 a,春玉米和马铃薯为减少趋势(图 3b),分别为 -3.0 和 -2.97 mm/10 a。且有效降水量并不能满足作物对水分的需求,在作物生育期内,春玉米、马铃薯和春谷子的有效降水量峰值出现在生育中期(7—8 月),分别为 68.34, 89.53, 71.68 mm,而这 3 种作物需水量峰值同样出现在生育中期,分别为 247.85, 288.83, 248.29 mm,但依旧缺水,且该时段降水对作物需水量满足度较低(表 3),其耦合度分别为 0.28, 0.31, 0.29。冬小麦有效降水量峰值出现在生育初期(10 月),为 31.14 mm;而其作物需水量峰值出现在快速发育期(3—4 月),为 192.98 mm,此时该时段的冬小麦作物需水与降水耦合度最低,为 0.12,表示该时段内降水量对作物需水量的满足程度最小。

本研究还发现春谷子是该区需水量最低的粮食作物,且有研究表明该作物具备抗旱和耐贫瘠的特性,是应对未来水资源短缺,建设可持续生态农业的首选战略储备作物<sup>[24]</sup>。该作物生育期需水量和有效降水量耦合度虽高于春玉米但略低于马铃薯,可以通过集雨补灌技术弥补这一情况,同时减少高耗水作物,适当扩大谷子种植面积,以优化当地粮食产业结

构<sup>[25]</sup>。此外,北方冬小麦区,主要分布在秦岭以北、长城以南地区,耕作制度以一年两熟为主,但在该区作物种植以一年一熟为主,且随着近年来冬季变暖,冬小麦种植区积温上升<sup>[11]</sup>。从理论上,该区可以实现冬小麦和春谷子的一年两熟耕作制度。虽然现实情况存在一定难度和挑战,但从国家战略粮食安全角度出发,可以在有条件的地块,如水浇地积极探索一年两熟的耕作制度,充分发挥该区土地生产力,实现更加高效和可持续的农业发展模式。

### 3.2 作物缺水量与水分盈亏

作物缺水量是作物需水量与有效降雨量的差值,水分盈亏可以表征作物的旱涝情况<sup>[21]</sup>。本研究发现春玉米与马铃薯和春谷子具有相似生长期,但是全生育期缺水最高达 432.47 mm,水分盈亏指数为 -70%,中度受旱,这是由于春玉米需水量也较高的原因;此外,冬小麦虽全生育期缺水最多(457.03 mm),水分盈亏指数为 -81%,严重受旱,但该作物有效降水量最少(97.99 mm),且需水量较多造成。如何解决作物缺水问题,科学高效地利用旱作农业区降水是关键<sup>[22]</sup>。近年来,该区受气候变化影响极端事件频发<sup>[26-27]</sup>,极端干旱和极端降水对该区生态环境和作物生产带来巨大威胁。如在 1951—2012 年发生的极端干旱事件与 2013, 2020, 2022 年极端降水事件影响下<sup>[26-27]</sup>,导致该区土壤水分亏缺、水质恶化、作物歉收、蝗灾严重等后果,直接造成粮食减产,给当地经济带来创伤。有学者提出通过发展集雨补灌技术,来实现对天然降水在时空上的调配,以此来满足作物生育期内对水分的需求<sup>[22]</sup>。该技术的发展不仅可以提高水分利用效率,增加作物产量<sup>[25]</sup>,还能提升土壤水分,改善土壤肥力、微生物及土壤理化性状<sup>[28]</sup>。因此,对于春玉米、马铃薯和春谷子这些生育期与降水期较为



吻合的作物可以大力发展相关技术,以满足作物在生育中期的大量需水<sup>[9]</sup>。同时,通过对天然降水的集蓄,也可以对冬小麦实现补灌,以此来解决作物需水和降水供需错位的问题,提高半干旱半湿润区水资源利用效率<sup>[20]</sup>。

## 4 结论

(1) 春玉米生长季有效降水量呈减少趋势,全生育期需水量大,降水与需水耦合度低,受旱较重,适应性差;春谷子与之相反。

(2) 马铃薯生长季有效降水量呈减少趋势,全生育期需水量较小,降水与需水耦合度高,受旱较轻,适应性好;冬小麦与之相反。

(3) 不考虑灌溉条件下,该区可减少春玉米种植,扩大马铃薯和春谷子的种植以改善作物种植结构。

(4) 各生育阶段主要作物生长对水分的需求巨大,水分供需错位,有效降雨水分分配不均,且达峰值时也不能满足作物生长对水分的需求。

因此需要在延安地区适当合理地布设农田集水设施或调节种植结构,以保障延安地区粮食产量和农业可持续发展。

**致谢:**感谢西北农林科技大学水土保持研究所焦菊英、史尚渝老师提供的专业性指导。也对本研究团队的才璐、刘元昊、郭鹏、刘星廷、赵体侠对论文的修改帮助,表示感谢!

## 参考文献(References)

- [1] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [2] 刘荔昀,鲁瑞洁,丁之勇,等.黄土高原气候变化特征及原因分析[J].*地球环境学报*,2021,12(6):615-631.  
Liu Liyun, Lu Ruijie, Ding Zhiyong, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 2021,12(6):615-631.
- [3] Xu Xiaoming, Huang Tao. Spatiotemporal trends and variation of precipitation over China's Loess Plateau across 1957—2018 [J]. *Atmosphere*, 2023,14(2):323.
- [4] Zhang Qiang, Peng Juntai, Singh V P, et al. Spatiotemporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: The Yellow River basin as a case study [J]. *Global and Planetary Change*, 2014,114:38-49.
- [5] Chen Xiaoping, Qi Zhiming, Gui Dongwei, et al. Simulating impacts of climate change on cotton yield and water requirement using RZWQM2 [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,222:231-241.
- [6] Rajagopalan K, Chinnayakanahalli K J, Stockle C O, et al. Impacts of near-term climate change on irrigation demands and crop yields in the Columbia River basin [J]. *Water Resources Research*, 2018,54(3):2152-2182.
- [7] 王文娥,马孝义,李坤,等.陕北、渭北玉米降水—产量关系与最佳补充灌溉时期初步研究[J].*灌溉排水*,2001,20(3):45-48.  
Wang Wene, Ma Xiaoyi, Li Kun, et al. Relations between corn yield and rainfall and optimal irrigation date in North Shaanxi and Weibei Plateau [J]. *Irrigation and Drainage*, 2001,20(3):45-48.
- [8] 王幼奇,樊军,邵明安.陕北黄土高原雨养区谷子棵间蒸发与田间蒸散规律[J].*农业工程学报*,2010,26(1):6-10.  
Wang Youqi, Fan Jun, Shao Ming'an, Rules of soil evaporation and millet evapotranspiration in rain-fed region of Loess Plateau in Northern Shaanxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010,26(1):6-10.
- [9] 陆静,朱文哲,高志永.陕北黄土丘陵区主要作物需水与降水耦合分析[J].*节水灌溉*,2019(12):72-76.  
Lu Jing, Zhu Wenzhe, Gao Zhiyong. Analysis of coupling degree between water demand of main crops and rainfall in loess hilly region of Northern Shaanxi [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(12):72-76.
- [10] 杨慧.陕西省粮食产量及其影响因素分析[D].陕西西安:长安大学,2021.  
Yang Hui. Analysis of grain yield and its influencing factors in Shaanxi Province [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2021.
- [11] 周英霞,王全九,何斌,等.气温和CO<sub>2</sub>浓度变化对陕北地区冬小麦产量影响的模拟分析[J].*水土保持学报*,2017,31(5):292-297.  
Zhou Yingxia, Wang Quanjiu, He Bin, et al. Effects of temperature and CO<sub>2</sub> concentration on the yield of winter wheat in Northern Shaanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(5):292-297.
- [12] 周英霞,王全九,张继红,等.基于 AquaCrop 模型的气候变化对陕西省冬小麦产量影响模拟分析[J].*水土保持研究*,2018,25(6):357-364.  
Zhou Yingxia, Wang Quanjiu, Zhang Jihong, et al. Simulation analysis of the impact of climate change on the yield of winter wheat in Shaanxi Province based on the AquaCrop model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(6):357-364.
- [13] 台灵啸.延安市耕地时空变化及其驱动力分析[D].陕西西安:长安大学,2023.

- Tai Lingxiao. Analysis of the spatiotemporal changes of cultivated land and their driving forces in Yan'an City [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [14] 徐学选, 高鹏, 蒋定生. 延安降水对农作物生长适宜性的模糊分析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 73-76.
- Xu Xuexuan, Gao Peng, Jiang Dingsheng. Fuzzy analysis on the suitability of precipitation to the agro-crops growing in Yan'an City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(2): 73-76.
- [15] 张旭辉, 玉素甫江·如素力, 仇忠丽, 等. 新疆焉耆盆地主要作物需水量特征及影响因素分析[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 57-67.
- Zhang Xuhui, Yusufujiang Rusuli, Qiu Zhongli, et al. Water requirements and influencing factors of main crops in Yanqi Basin, Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 57-67.
- [16] 王金平. 黄土高原典型农作物耗水规律与水分生产率研究[D]. 甘肃, 兰州: 兰州大学, 2018.
- Wang Jinping. Study on the water consumption characteristics and water productivity of typical crops in the Loess Plateau [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2018.
- [17] Liu Yanqi, Lin Yifan, Huo Zailin, 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: 107451.
- [18] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): e2001wr000355.
- [19] 曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570.
- Cao Yongqiang, Zhu Mingming, Li Weijia. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 560-570.
- [20] 张燕, 廖允成, 强生才, 等. 宁夏地区春玉米灌溉需水量特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 21-32.
- Zhang Yan, Liao Yuncheng, Qiang Shengcai, et al. Characteristics of irrigation requirement of spring maize in Ningxia [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 21-32.
- [21] 张秋平, 杨晓光, 薛昌颖, 等. 北京地区旱稻作物需水与降水的耦合分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 51-56.
- Zhang Qiuping, Yang Xiaoguang, Xue Changying, et al. Analysis of coupling degree between crop water requirement of aerobic rice and rainfall in Beijing areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(10): 51-56.
- [22] 陆静, 汪星, 孙波, 等. 陕北黄土丘陵区主要作物需水量变化趋势及其应对策略[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 64-72.
- Lu Jing, Wang Xing, Sun Bo, et al. Research on the trend and response strategies of water requirement of main crops in the loess hilly region of northern Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 64-72.
- [23] Qu Lulu, Li Yurui, Chen Zongfeng, et al. Exploring the spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of gully agricultural production transformation in the Chinese Loess Plateau: A case study of loess hilly and gully region in Yan'an City [J]. Land Use Policy, 2022, 123: 106369.
- [24] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 531-535.
- Li Shunguo, Liu Fei, Liu Meng, et al. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5): 531-535.
- [25] 王小林, 纪晓玲, 张静, 等. 密度和集雨补灌对黄土旱区谷子产量及水分利用效率的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(3): 10-16.
- Wang Xiaolin, Ji Xiaoling, Zhang Jing, et al. Effects of density and supplemental irrigation by rainwater collection on foxtail millet yield and water utilization efficiency in dryland area of Loess Plateau [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2019, 65(3): 10-16.
- [26] Jiang Rengui, Xie Jiancang, He Hailong, et al. Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951—2012 [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2885-2903.
- [27] 杨波, 焦菊英, 马晓武, 等. 2022 年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 1-13.
- Yang Bo, Jiao Juying, Ma Xiaowu, et al. Investigation and analysis of typical rainstorm erosion and flood disaster on Loess Plateau in 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 1-13.
- [28] 周子军, 郭松, 陈琨, 等. 长期秸秆覆盖对免耕稻—麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1148-1159.
- Zhou Zijun, Guo Song, Chen Kun, et al. Long-term straw mulching affects rice and wheat yields, soil nitrogen fractions, and microbial community under a no-till system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1148-1159.