

半干旱区春小麦水分与产量 关系及其影响因素分析

赵福年¹, 刘江³, 张强¹, 王润元¹, 王鹤龄¹, 雷俊²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 定西市气象局, 甘肃定西 743000; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 水分是影响半干旱雨养作物生长、发育及产量形成最重要的环境因素。以中国西北半干旱区田间试验为基础, 收集长期观测资料和文献数据, 分析春小麦产量与水分之间的关系及其环境影响因素, 揭示不同环境条件下春小麦水分限制特征和调控机制。研究表明: 半干旱区常规管理水平下, 雨养春小麦产量与水分间的关系相对稳定, 然而播前土壤储水影响生育期降水与春小麦产量间的关系, 不同播前土壤储水条件下, 每增加 1 mm 降水量, 春小麦产量的增加量分别为 $21.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。生育期大气干湿条件(潜在蒸发量与降水的差值)对播前土壤储水与春小麦产量间的关系也有影响, 其中大气较为干燥时(潜在蒸发量与降水的差值大于 425 mm), 产量与土壤水分间关系斜率为 $22.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 大气较为湿润时(潜在蒸发量与降水的差值小于 425 mm), 斜率为 $20.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。相较生育期降水, 播前土壤储水对春小麦产量更具有决定性作用。半干旱雨养春小麦的气候年型由播前土壤储水和生育期大气干湿条件共同决定。增加播前土壤水分储量、在生育期的特定阶段灌溉均会改变小麦耗水量与产量之间的关系, 并最终导致小麦水分利用效率发生变化。大气干湿条件和灌溉条件共同导致中国西北不同地区春小麦边界函数存在差异。

关键词: 春小麦; 土壤含水量; 产量; 降水; 耗水量

中图分类号: S512.1⁺2; S16 **文献标志码:** A

Water-yield relationship and its impact on yield of spring wheat in semi-arid area

ZHAO Funian¹, LIU Jiang³, ZHANG Qiang¹, WANG Runyuan¹, WANG Heling¹, LEI Jun²

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Dingxi Meteorological Bureau, Dingxi, Gansu 743000, China; 3. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Water availability is the most important environmental factor influencing the growth, development, and yield formation of semi-arid rain-fed crops. This study collected long-term observation data and literature data to analyze the relationship between spring wheat yield and water availability, as well as the environmental factors affecting it. The study aimed to reveal the characteristics and regulatory mechanisms of water limitation in spring wheat under different environmental conditions. The research results showed that under conventional management levels in the semi-arid region, the relationship between rain-fed spring wheat yield and water availability was relatively stable. However, pre-sowing soil water storage affected the relationship between precipitation during the growing season and spring wheat yield. Under different pre-sowing soil water storage conditions, for each additional 1 mm of precipitation, the increase in spring wheat yield was $21.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $16.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. At the same time, the atmospheric moisture conditions during the growing season (difference between potential evapo-

收稿日期: 2023-03-14

修回日期: 2023-06-27

基金项目: 中国气象局兰州干旱气象研究所博士后科研基金项目 (BSH-2022001); 国家自然科学基金项目 (42230611, 42005097, 42175192)

作者简介: 赵福年 (1987-), 男, 甘肃武威人, 副研究员, 主要从事作物水分关系研究。E-mail: zfn0622@163.com

通信作者: 刘江 (1999-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为作物水分关系。E-mail: gauliujiang@163.com

ration and precipitation) also affected the relationship between pre-sowing soil water storage and spring wheat yield. When the atmosphere was relatively dry (difference between potential evaporation and precipitation exceeds 425 mm), the slope of the relationship between yield and soil water content was $22.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$. When the atmosphere was relatively humid (difference between potential evaporation and precipitation is less than 425 mm), the slope was $20.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$. Compared to precipitation during the growing season, pre-sowing soil water storage played a more decisive role in spring wheat yield. The climatic year type of semi-arid rain-fed spring wheat in the region was jointly determined by pre-sowing soil water storage and atmospheric moisture conditions during the growing season. Increasing pre-sowing soil water storage and irrigation at specific stages of the growing season could alter the relationship between wheat water consumption and yield, ultimately affecting water use efficiency. Both atmospheric moisture conditions and irrigation conditions contributed to the regional differences in the boundary function of spring wheat in northwest China.

Keywords: spring wheat; soil water content; yield; precipitation; water use

在全球许多半干旱地区的粮食作物中,小麦占据极大比重^[1]。由于半干旱地区降水不足且分布极不均匀,导致这些地区的小麦产量低且不稳定。作物与水分关系研究是实现农业用水有效管理的基础^[2],因此量化小麦水分利用与产量之间的关系,并分析二者关系的影响因素对实现半干旱区小麦稳产高产具有重要意义。

关键期的水分供给对作物产量具有决定作用^[3]。对小麦而言,一般认为拔节期和开花期的水分亏缺会显著降低其产量^[4],这意味着生育期的降水或者关键期的降水决定了小麦的最终产量。事实上,在半干旱区小麦生长期内的降水量非常有限,如果缺乏灌溉补充,播前土壤储水将是其非常重要的水分供给来源。Stone 等^[5]和 Taliec 等^[6]通过试验发现播前土壤储水可以解释冬小麦 32.2% 的产量变率。Lyon 等^[7]指出,播前土壤储水可以解释 6 种春播作物 30%~70% 的产量变率,而且生育期越短,土壤播前储水对作物产量的影响作用越大。与冬小麦相比,春小麦的生育期较短,因此,播前土壤储水对春小麦产量具有重要作用。尽管作物产量与生育期降水或播前土壤储水之间的关系被研究者所重视,但生育期降水与播前土壤储水之间的交互作用对作物产量的影响却鲜有研究,而且研究结果也存在诸多矛盾^[5,8]。Stone 等^[5]和 Taliec 等^[6]研究发现,在高粱产量形成过程中播前土壤储水与降水之间无交互作用,但播前土壤储水会影响小麦产量对生育期降水的响应关系。而 Nielsen 等^[9]则发现播前土壤储水的大小会改变玉米产量与关键期降水之间的关系。同时,一些研究发现作物生育期降水也会影响播前土壤储水与作物产量之间的关系,如 Schlegel 等^[10]发现生育期降水量影响旱地玉米与高粱产量对播前土壤储水的响应关系。

作物产量与耗水量之间的关系(也被称为作物水分生产函数)是作物产量与水分关系研究的重要问题之一。很多研究指出,旱地作物水分生产函数为线性或曲线形式^[11-13]。然而不同地区即使是相同作物,其水分生产函数也不尽相同。由于作物水分生产函数涉及到耗水量和作物产量两个变量,因此引起作物水分生产函数变化的因子众多。一些研究发现,不同气候条件、不同品种会引起小麦作物水分生产函数发生改变^[12-14]。另外,降水时期、播前或生育期灌溉以及灌溉量的大小也会改变小麦产量,并引起小麦水分利用效率(产量与耗水量的比值)发生变化^[14-16]。然而播前土壤水分、生育期降水及灌溉量是否改变半干旱区小麦产量与耗水量之间的关系目前尚不清楚。此外,根据作物产量与耗水量之间的关系不仅可以用来确定作物水分生产函数,还可以用来计算作物在水分限制条件下的最大产量^[17-18]。French 等^[19]首先提出并定义了小麦的产量边界函数,并论述了潜在蒸腾效率这一概念,用以描述小麦在水分限制条件下的最大产量。尽管这一方法非常简单,也缺乏充足的生物机制,但在确定水分限制条件下的作物最大产量方面却非常实用便捷,目前很多研究者采用这一方法研究不同作物的潜在产量及其产量差^[1,20]。全球半干旱区冬小麦水分限制条件下的最大产量已有研究者进行了界定^[17],然而半干旱区春小麦水分限制条件下的最大产量如何,及其与冬小麦相比差异如何目前还尚不清楚。

由于半干旱区灌溉水资源缺乏,因而难以有效地缓解水分亏缺对小麦产量的影响。分析不同气候年型下小麦的产量变化状况,有利于及时有效地实施管理措施以避免产量损失。半干旱区作物产量主要由水分供给决定,Yu 等^[21]提出澳大利亚半

干旱区冬小麦产量年型完全可由营养和生殖生长阶段的降雨和非降雨天气决定。不过考虑到春小麦生育期短于冬小麦,而且春小麦生育期的气候条件和冬小麦差异较大,因此半干旱区春小麦的气候年型划分方式应与冬小麦不完全相同,因此需要通过试验数据确定半干旱区春小麦气候年型的划分方法。

为解决上述问题,明确半干旱区春小麦产量水分关系及其影响因素,本研究特提出以下假设:(1)播前土壤储水能够单独解释春小麦产量的大部分变率,而且生育期降水的大小会对播前土壤储水与春小麦产量关系造成影响;(2)春小麦产量气候年型可以由播前土壤储水和生育期降水划分;(3)播前土壤储水和生育期降水可能会改变春小麦产量-耗水量关系,并最终改变小麦的水分利用效率;(4)在中国西北部半干旱区,春小麦潜在蒸腾效率和水分限制条件下的最大产量应大于干旱区的数值。本研究通过多种方式,收集大量中国西北部春小麦产量、播前土壤储水以及气候资料数据,以验证以上假设。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验数据包括两部分,一部分为观测试验,一部分为文献收集数据。观测试验在中国黄土高原西端进行,该地区属于典型的气候过渡带地区,气候类型为半干旱气候,站点包括定西农业气象试验站(35°58' N, 104°62' E, 海拔 1 896 m)、中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验站(35°33' N, 104°35' E, 海拔 1 898 m)、彭阳旱农试验站(35°55' N, 106°39' E, 海拔 1 682 m)。文献收集数据所涉及的区域包括黄土高原西端半干旱区、河西走廊中部以及宁夏北部等干旱区。

定西(数据集为 1987—2011 年间)农业气象试验站春小麦试验属于长期定位观测试验(后文也称“定西站”),只有 1 个试验处理,即雨养处理,春小麦全生育期不灌水,完全依赖自然雨养。试验站站点位置固定,小麦的播种品种每隔 5~6 a 调整一次,但每年的农业管理方式均保持相对稳定,变化较小。2016 年在彭阳旱农试验站设置了 6 个不同的灌溉处理,即遮雨、雨养、全生育期补水 30 mm、全生育期补水 60 mm、全生育期补水 90 mm、全生育期补水 150 mm,补水均分 3 次进行,每次补水量为总量的平均,补水时期分别为 6 叶期、拔节期和灌浆期;2017 年在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干

旱气象与生态环境试验站设置了不同的春小麦灌溉试验,试验包括 6 个不同的水分处理,即播前不灌溉、灌水 20、40、60、80、100 mm。

1.2 指标测定与数据收集

本研究中试验观测项目依据《农业气象观测规范》进行,主要包括生育期、收获后产量和地上部生物量等。定西 2017 年田间试验土壤含水量的观测深度是 150 cm,彭阳站的观测深度是 200 cm,在本研究中于小麦播种前和收获后各测定一次土壤水分。

在定西农业气象试验站旁边有地面气象观测站,本文所用到的部分气象观测数据来源于地面气象观测站,主要包括日照时数、大气温度、大气湿度、风速、水汽压、蒸发皿蒸发量以及降水等。

干旱和半干旱地区春小麦和耗水量关系数据由中国期刊全文数据库(CNKI)和 Web of Science 数据库通过检索以下关键词获得:“耗水量”(或“蒸散量”)、“春小麦”、“半干旱地区”、“定西”、“黄土高原西端”、“宁夏”、“张掖”、“武威”以及“河西”等。耗水量和春小麦产量数据直接由检索获得的文献表格中提取,或者由 GetData 图像处理软件(<http://getdata-graph-digitizer.com>)从文献中提取。检索获得文献中包括不同的水分和肥料处理试验,干旱地区的试验本研究只选取包括传统的大田漫灌试验处理,不包括亏缺灌溉以及覆盖试验处理,而半干旱地区的试验既选取传统的雨养处理,又包括不同的补水灌溉(播前灌溉和生育期灌溉处理)和覆盖处理(覆膜处理和稻草秸秆覆盖处理)。

1.3 数据分析

由于田间试验在半干旱地区进行,所以可忽略地表径流和深层土壤渗漏,本研究中大田试验小麦耗水量由水分平衡公式计算获得,即小麦播前土壤含水量与收获后含水量的差值与生育期的降水之和为小麦生育期的耗水量。

小麦生育期气象要素观测值为日值,累加计算月总值,取平均计算月平均值。本研究中大气干湿条件定义为所研究时段蒸发皿蒸发量与大气降水之间的差值(Atmospheric dry condition, ADC),如某个月份大气干湿条件、小麦生长季大气干湿条件等。

本研究中小麦生长发育和产量的气候年型分析由聚类分析完成。在本研究中将春小麦产量作为年型划分的依据,将播前土壤储水、生育期空气温度、生育期日照时数、空气饱和水汽压差、风速以及生育期降水等作为划分因子。先假设任一两组因子可能会对春小麦产量形成具有决定作用,然后

依据春小麦产量将对应的因子划分为 8 组,观察 8 组数据的产量是否存在显著性差异 ($P<0.05$),如不存在显著性差异,则合并不存在显著差异的两组数据,如存在差异则保持两组数据不变。在聚类过程中,采用 K-means 方法同时采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 测试检验两组数据之间是否存在显著性差异。上述分析过程由 SPSS15.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 环境因素与地上生物量、收获指数、产量以及产量组成的关系

定西站 4~5 月以及主要生育期的降水与春小麦地上部生物量呈显著正相关关系(表 1),主要生

表 1 环境要素与定西站春小麦生物量、收获指数以及产量的关系系数

Table 1 The five most and lowest related environment factors withbiomass, HI and grain yield in Dingxi station					
生物量 Biomass					
正相关最大值排序 Positive correlation maximum sorting	P_5	PGS	P_4	SWC	P_3
	0.663 **	0.603 **	0.460 *	0.333	0.280
负相关最小值排序 Negative correlation minimum sorting	ADC_5	$EVAP_5$	T_{MAX5}	VPD_5	ADC
	-0.753 **	-0.636 *	-0.628 **	-0.617 **	-0.569 **
收获指数 HI					
正相关最大值排序 Positive correlation maximum sorting	P_6	$RPRE_7$	PGS	SWC	P_3
	0.511 **	0.307	0.236	0.105	0.100
负相关最小值排序 Negative correlation minimum sorting	T_{MAX6}	VPD_6	ADC_6	$EVAP_6$	E
	-0.582 **	-0.532 *	-0.523 **	-0.469 *	-0.406 *
产量 Grain yield					
正相关最大值排序 Positive correlation maximum sorting	PGS	P_5	P_4	SWC	$RPRE_7$
	0.629 **	0.624 **	0.443 *	0.3911	0.3207
负相关最小值排序 Negative correlation minimum sorting	ADC_5	ADC	T_{MAX5}	VPD_5	$EVAP_5$
	-0.696 **	-0.658 *	-0.658 **	-0.651 **	-0.573 **

注: P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 分别表示 3、4、5、6 月的降水; PGS 表示主要生育期的降水; SWC 表示播前土壤含水量; ADC 表示大气干湿条件; $EVAP$ 表示蒸发量; VPD 表示空气饱和度; T_{MAX} 表示最高温度; $RPRE_7$ 表示播前 1 年 8 月~第 2 年 2 月总降水量。* 代表达到统计显著水平 $P<0.05$, ** 代表达到统计显著水平 $P<0.01$ 。

Note: P_3 , P_4 , P_5 , and P_6 represent the precipitation in March, April, May, and June, respectively; PGS represents precipitation during the main growth period; SWC represents the soil moisture content before sowing; ADC represents atmospheric dry and wet conditions; $EVAP$ represents evaporation capacity, VPD represents the poor air saturation; T_{MAX} represents the maximum temperature; $RPRE_7$ represents the total precipitation from August to February of the following year. * represents reaching a statistically significant level of $P<0.05$, ** represents reaching a statistically significant level of $P<0.01$.

育期大气干湿条件、蒸发量、最高温度以及 5 月的空气饱和差和大气干湿条件与生物量呈极显著负相关关系。6 月的降水与作物经济产量与生物产量之比所得的收获指数 (Harvest index, HI) 呈正相关关系,6 月的最高温度、空气饱和差以及大气干湿条件则与 HI 呈负相关关系,主要生育期的蒸发量也与 HI 呈负相关关系。主要生育期的降水、4~5 月份的降水与春小麦产量呈正相关关系,5 月份以及主要生育期的大气干湿条件、最高温度、空气饱和差和蒸发量与春小麦产量呈负相关关系。播前土壤储水、3 月的最高温度和空气饱和差与不孕小穗率呈负相关关系,播前土壤储水、5 月的降水以及 4 月的温度则与小穗数呈正相关关系。播前土壤储水、5 月的大气干湿条件还与千粒重呈正相关关系。

2.2 春小麦产量对播前土壤储水及生育期降水的响应

2.2.1 多元分析 播前土壤储水和生育期降水可以解释春小麦 60.4% 的产量变率(表 2)。播前土壤储水与生育期降水对产量的贡献相近,分别为 13.1、13.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,如果考虑播前土壤储水与降水的交互作用,可发现两个因素可解释春小麦产量变率的数值并未提高。而如果考虑不同月份降水对春小麦产量的影响,分月份降水可解释春小麦 72.4% 的产量变率,这数值要高于土壤储量与生育期总降水所解释的值。同时可以看出,3 月份的降水对产量变动的影 响大于其他月份,而 6 月份降水对产量变动影响最小,不过导致这种结果的原因可能是 5~6 月的降水总量大于其他月份,因此这两个月份降水的轻微变化可能对产量的影响反而会降低。

表 2 春小麦产量与播前土壤储水以及生育期降水的多元统计关系

Table 2 Multivariate statistical relationship between spring wheat yield, soil water storage before sowing, and precipitation during growth period			
公式 Formula	回归方程 Regression equation	R^2	RMSE
1	$Y = 13.1SWC + 13.4PGS - 3110.5$	0.604 ***	566.1
2	$Y = 11.6SWC + 10.5PGS + 0.013PSWC - 2776.1$	0.604 ***	579.2
3	$Y = 13.8SWC + 34.4P_3 + 17.1P_4 + 14.5P_5 + 2.9P_6 - 3090.4$	0.724 ***	508.1

注: Y 是春小麦产量, SWC 是播前土壤水分, PGS 是主要生育期降水。 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 分别表示 3、4、5、6 月的降水量,*** 代表达到统计显著水平 $P<0.001$ 。

Note: Y is the yield of spring wheat, SWC is the soil moisture before sowing, and PGS is the precipitation during the main growth period. P_3 , P_4 , P_5 , and P_6 represent the precipitation in March, April, May, and June, respectively, *** represents reaching a statistically significant level of $P<0.001$.

此外,考虑到在多元回归分析时,3 月和 6 月份降水与春小麦产量关系不显著,可推断得出这两个月份的降水与其他月份相比,对春小麦产量的作用较小。考虑到与产量的关系以及降水的数量,5 月份可能是春小麦产量形成最重要的水分供给时期。

2.2.2 春小麦产量与生育期降水的关系 春小麦产量与生育期降水呈显著正相关关系(图 1a),生育期降水每增加 1 mm,产量增加 12.5 kg · hm⁻²。由春小麦产量与生育期降水关系可发现,春小麦产量与生育期降水存在两种明显不同的响应关系(图 1b),而这种响应关系可以由播前土壤储水进行分割,即由播前土壤的干湿条件(以 240 mm 为界,小于 240 mm 则为干燥条件,大于 240 mm 则为湿润条件)所决定。

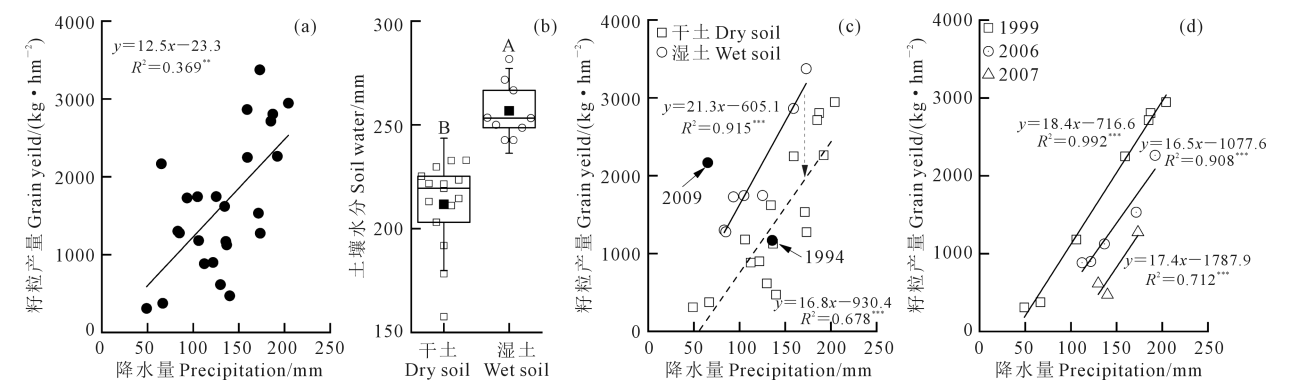
考虑到一些极端年份对产量的影响不利于环境因素与产量的关系分析,将其中一些年份剔除。其中 2009 年播前土壤储水量非常大,生育期降水非常小,而这一年春小麦产量却很高,将其剔除;而在 1994 年,在春小麦籽粒产量形成时期降水异常大,对产量形成非常不利,也将该年份剔除。分析剩余数据,可以发现在播前土壤湿润条件下,生育期降水可以解释春小麦 91.5% 的产量变率,降水每增加 1 mm,产量增加 21.3 kg · hm⁻²。在播前土壤干燥情形下,生育期降水可以解释春小麦 67.8% 的产量变率,增加 1 mm 降水,产量增加 16.8 kg · hm⁻²。观察发现,1999、2006、2007 年降水与春小麦产量关系数据明显低于干燥条件下拟合的回归线。分析数据发现这 3 a 中,播前土壤储水与 3~4 月份的降水非常少,春小麦生长初期受旱严重,导致春小麦生长初

期地上部生物量形成缓慢,叶面积指数偏小,生育期延迟,即使后期降水有所增多,也无法补充前期干旱对春小麦产量降低的影响。而如果将这 3 a 数据剔除,则在播前土壤干燥条件下,生育期降水可解释 87.0% 的春小麦产量变率(图 1d)。此外,播前干湿条件也可以将 5 月份降水与春小麦产量的关系分为两组。

2.2.3 春小麦产量与播前土壤储水之间的关系 若不考虑其他因素的影响,播前土壤水分每增加 1 mm,春小麦产量增加 11.2 kg · hm⁻²,播前土壤储水只能解释春小麦 11.6% 的产量变率(图 2a)。由春小麦产量与播前土壤储水之间的关系可发现,二者关系可以由生育期干湿条件划分为两组(图 2b),当生育期大气干湿条件大于 425 mm 时定义为干燥条件,小于 425 mm 时定义为湿润条件。

在大气湿润条件下,春小麦产量随播前土壤储水变化的关系斜率为 20.1 kg · hm⁻² · mm⁻¹,土壤储水可以解释春小麦 78.3% 的产量变率(图 2c)。在大气干燥条件下(由于 1996 年生育期降水非常少,将该年份数据剔除),土壤储水可以解释春小麦 82.8% 的产量变率,而且土壤储水每增加 1 mm,产量增加 22.9 kg · hm⁻²。

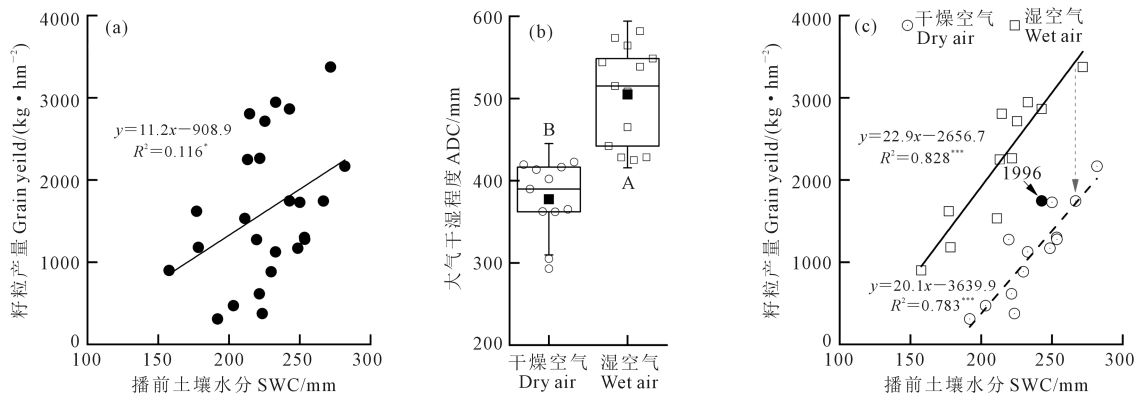
2.2.4 以大田观测试验验证生育期降水以及播前土壤储水与产量关系 彭阳站 2016 年播前土壤储水条件为湿润级别,春小麦产量与土壤供水量呈正相关关系,而春小麦产量对降水的响应数据均匀分布于 2.2.3 小节所得的春小麦产量与降水的回归拟合直线周围,证实了上节中春小麦产量与降水关系的合理性(图 3a)。在定西站,2017 年



注:土壤水分指播前土壤含水量。(a)为所有收集文献数据小麦产量与生育期降水关系图;(b)为播前土壤水分划分图;(c)为剔除 1994、2009 年极端年份后小麦产量与生育期降水关系图;(d)为 1999、2006 以及 2007 年小麦产量与生育期降水关系图。

Note: Soil moisture refers to the pre-sowing soil moisture content. (a) shows the relationship between wheat yield and growth period precipitation for all collected literature data, (b) shows the soil moisture division map before sowing, (c) shows the relationship between wheat yield and growth period precipitation after excluding extreme years in 1994 and 2009, and (d) shows the relationship between wheat yield and growth period precipitation for 1999, 2006, and 2007.

图 1 春小麦产量对生育期降水的响应
Fig.1 Response of spring wheat yield to precipitation during growing season



注:ADC 表示大气干湿程度,为潜在蒸散与降水的差值。

Note: ADC represents the degree of atmospheric dryness and wetness, and represents the difference between potential evapo-transpiration and precipitation.

图 2 春小麦产量对播前土壤储水的响应

Fig.2 Response of spring wheat yield to soil water content at sowing

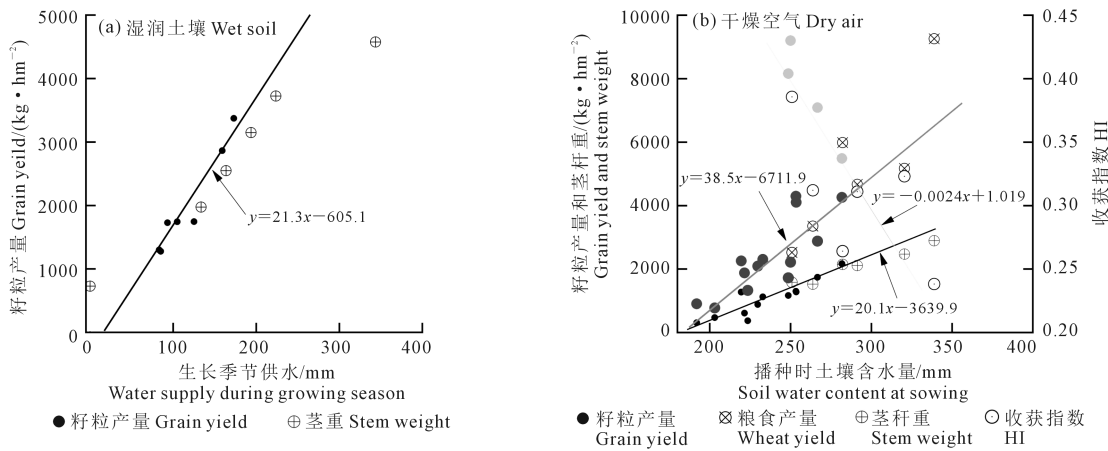


图 3 彭阳和定西两站田间观测水分供给和播前土壤储水与春小麦产量的关系

Fig.3 Response of yield and stem weight to water supply during growing season and soil water content at sowing in Pengyang and Dingxi stations

(大气干湿条件为干燥情形) 试验春小麦茎秆重和产量与播前土壤储水均呈正相关关系,而 HI 与土壤储水呈负相关关系(图 3b)。定西春小麦试验数据所得数据均匀分布于上节所得大气干燥条件下土壤储水与春小麦产量的拟合回归线周围,证实了半干旱区播前土壤水分条件与春小麦产量之间稳定的关系。

2.3 春小麦生长发育的气候年型

依据产量变化及生育期气候条件,可以将春小麦生长发育的气候类型划分为 5 种(图 4)。其中气候 P1 年型条件下,播前土壤储水最大,而生育期大气干湿条件最小(图 4a、b),春小麦能够获得最高的茎秆重和产量(图 4c、d)。在气候 P5 年型条件下,生育期大气干湿条件最大,土壤播前储水量最小,小麦产量和茎秆重最低;在其他 3 个气候年型中,春小麦茎秆重和产量则介于气候年型 P1 和 P5 之间。同时,气候年型 P1 的生育期降水显著高于其他气

候年型,而气候年型 P2、P3、P4 和 P5 之间的生育期降水则差异不显著。除了气候年型 P4 和 P5 之外,其他气候年型之间的耗水量和水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)也存在显著差异(图 4f、h)。与其他气候年型相比,气候年型 P3 和 P5 条件下的春小麦 HI 最小。

2.4 春小麦耗水量与产量之间的关系

春小麦耗水量与产量之间存在显著的线性关系,关系斜率为 $13.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,截距为 130.4 mm (图 5a)。与传统种植方式下的春小麦耗水量产量关系相比,播前灌水条件下的斜率和截距明显偏小,而生育期灌水条件下的斜率和截距却明显偏大(表 3)。对于有覆盖的春小麦处理,耗水量和产量关系斜率则要大于传统的种植方式,但是截距却偏小。与传统种植方式相比,如果对春小麦既实施覆盖措施,又在生育期补充灌溉则会使春小麦耗水量

和产量关系斜率和截距降低。值得注意的是,上述几种处理春小麦耗水量与产量关系斜率均显著不同,但除了播前灌溉、生育期灌溉、有覆盖措施和既有覆盖措施又有播前灌溉的处理外,这些处理蒸腾效率却差异不显著。传统种植方式、播前灌溉以及既有播前灌溉又在生育期覆盖的几种处理春小麦耗水量与产量关系的截距也显著不同。

不同的种植管理方式下,春小麦的 WUE 也不

完全相同(图 5b)。覆盖措施下的春小麦具有最高的 WUE($11.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$),而传统种植方式下的春小麦 WUE 则最小($6.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$),而生育期灌溉和播前灌溉处理的春小麦 WUE 则分别为 $10.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $7.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。播前进行灌溉并在生育期有覆盖的春小麦 WUE 却小于仅有覆盖而无灌溉的 WUE,这二者 WUE 分别为 $8.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $11.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

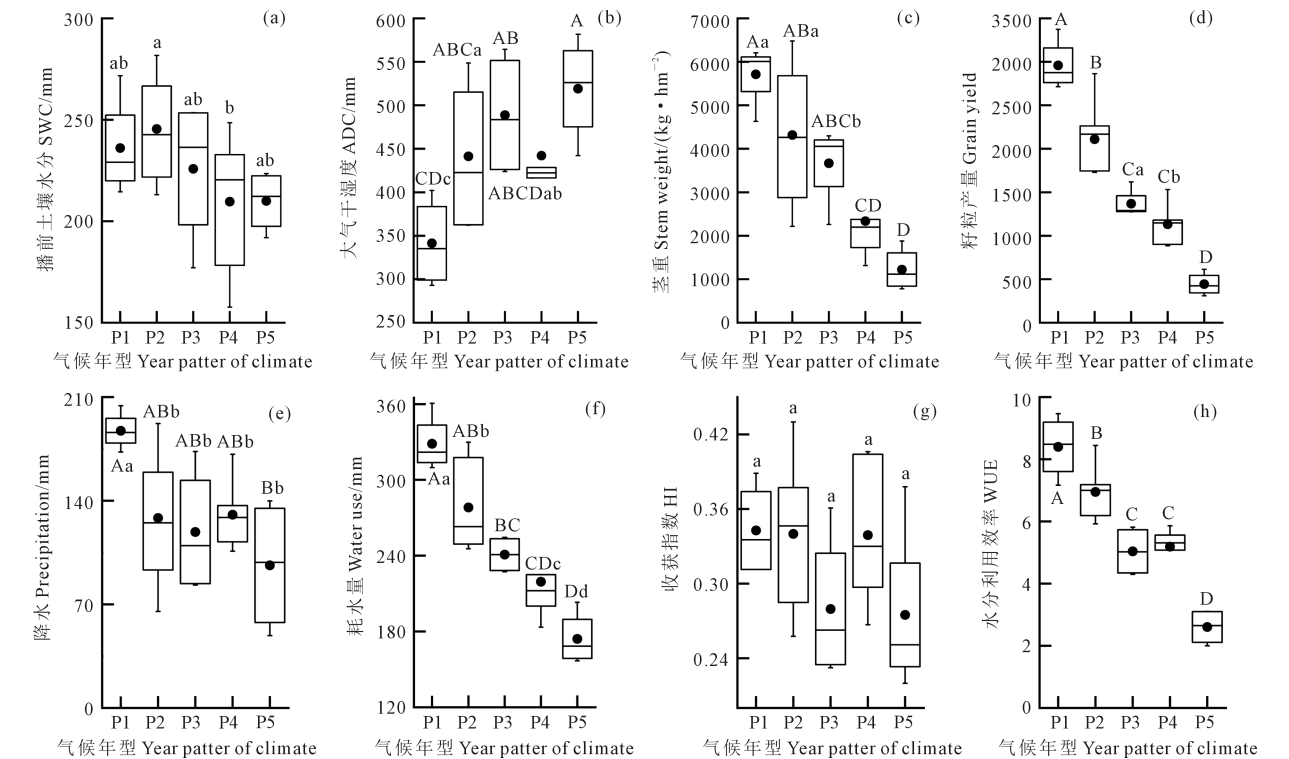
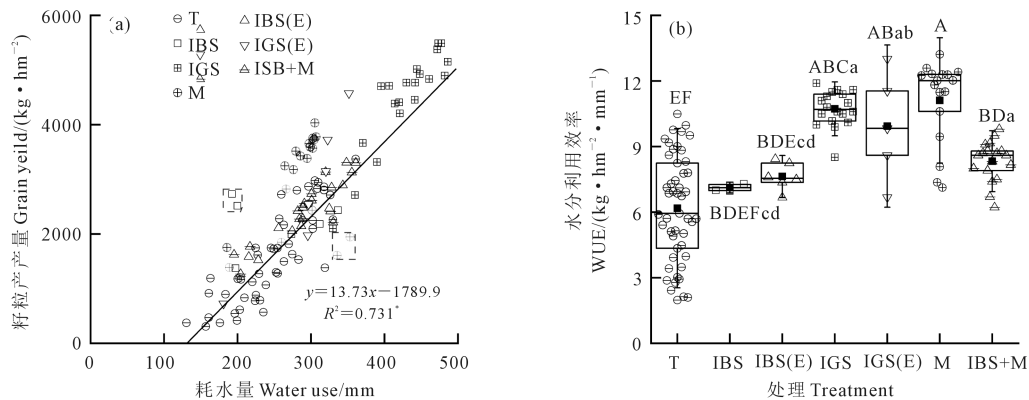


图 4 半干旱雨养农业区定西站春小麦生长发育的气候年型

Fig.4 Year patters of climate for spring wheat in semi-arid area at Dingxi, Northwest China



注: T 表示无覆盖雨养处理;IBS 表示播期灌溉处理;IGS 表示生育期灌溉处理;M 表示覆盖处理;E 表示数据来源于本研究试验观测,未标注表示数据来源于文献。

Note: T represents non-covered rain treatment; IBS represents irrigation treatment during sowing period; IGS represents irrigation treatment during the growth period; M represents coverage processing; E indicates that the data comes from experimental observations in this study, and unlabeled indicates that the data comes from literature.

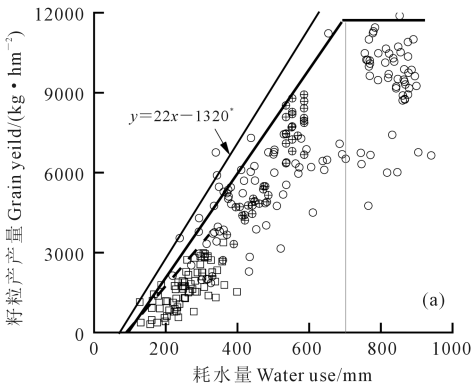
图 5 不同农业管理方式下春小麦耗水量与产量关系

Fig.5 Water use and yield relations for spring wheat under different agricultural managements

表 3 不同农业管理方式下春小麦耗水量与产量关系分析
Table 3 Water use and yield relations under different agricultural managements

农业管理方式 Agricultural management methods	资料资源 Data resources	关系斜率 Relationship Slope /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	关系截距 Relationship intercept/mm	R^2
T	R+E	13.73abcde	130.4abcd	0.731***
	R	7.39ef	9.59h	0.992***
	E	9.75ef	73.2e	0.933***
IBS	R+E	8.71ef	48.6efg	0.934***
	R	18.65abc	188.4a	0.817***
	E	21.00a	162.0ab	0.848***
M	R+E	15.3abcd	130.5abc	0.847***
	R	19.54ab	118.9abc	0.773***
	E	10.52ef	59.4 ef	0.806***

注;T 表示无覆盖雨养处理;IBS 表示播期灌溉处理;IGS 表示生育期灌溉处理;M 表示覆盖处理;E 表示数据来源于本研究试验观测,R 表示数据来源于文献,*** 代表达到统计显著水平 $P<0.001$ 。
Note: T represents non-covered rain treatment; IBS represents irrigation treatment during sowing period; IGS represents irrigation treatment during the growth period; M represents coverage processing; E indicates that the data comes from experimental observations in this study, and R indicates that the data comes from literature, *** represents reaching a statistically significant level of $P<0.001$.



注: * 表示边界函数来源于 Sadras and Angus 等^[17] 的研究,其他两条边界函数分别为 $y=19.463x-1770$ (实线) 和 $y=15.976x-1458.7$ (虚线)

Note: * indicates that the boundary function is derived from the research of Sadras and Angus et al. [17]. The other two boundary functions are $y=19.463x-1770$ (solid line) and $y=15.976x-1458.7$ (dotted line), respectively.

图 6 西北地区不同气候条件下春小麦产量与耗水量关系

Fig.6 Response of yield for rainfed and irrigated spring wheat to water use in different areas of Northwest China

3 讨论与结论

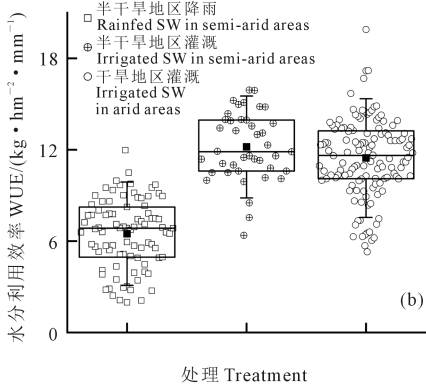
3.1 半干旱地区播前土壤储水对春小麦产量的作用

与生育期降水相比,播前土壤储水对半干旱雨养春小麦产量更具有决定性作用。首先,若不考虑二者的交互作用时,尽管降水所能够解释的春小麦产量变率要高于播前土壤储水所能够解释的产量变率(36.9%和 11.6%),但是以多元线性回归分析法发现这二者变动对产量的变化贡献相近。其次,

2.5 中国西北部春小麦潜在蒸腾效率和水分利用效率

中国西北部干旱和半干旱地区春小麦水分边界函数不完全相同(图 6a),位于半干旱雨养农业区的春小麦潜在蒸腾效率明显偏小($15.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$),而生育期平均土壤直接蒸发量则为 91.3 mm。位于干旱区灌溉农业区的春小麦潜在蒸腾效率为 $19.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,土壤直接蒸发量为 90.9 mm。本研究所获得春小麦潜在蒸腾效率也小于其他研究者获得的半干旱区冬小麦潜在蒸腾效率($22.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)。

将定西与宁夏南部半干旱地区春小麦水分利用效率数据整合,发现半干旱地区春小麦水分利用效率为 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,而河西地区和宁夏北部两个干旱灌溉农业区的春小麦水分利用效率则为 $12.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $12.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,干旱灌溉农业区的水分利用效率明显高于半干旱雨养农业区的数值(图 6b)。



大部分年份播前土壤储水的数值远大于生育期降水,而且播前土壤储量年际变率更小,数量更稳定,在考虑生育期的干湿条件或者播前土壤的干湿条件情形下,土壤储水所能够解释的小麦产量变率要明显高于生育期降水所解释的产量变率。已有研究发现,对于短生育期作物,由于播前土壤储水不仅能够供给作物营养生长阶段使用,而且在生殖生长阶段这一部分土壤水分也可能依然有效^[7],因此土壤储水比降水更能有效地解释短生育期作物的产量变动状况。在本研究中春小麦的生育期少于

120 d,如果播前土壤储水比较充足,则春小麦可以在生育期降水相对不足的情况下,在营养生长阶段就积累一定数量的地上部生物量,避免产量因生育期降水不足而严重降低^[8]。如果5~6月份降水较多,则会进一步提高地上部生物量和HI,从而会更大可能地提高春小麦最终产量。因此,对于半干旱雨养春小麦而言,播前土壤水分对产量形成作用很大,但是生育期降水的作用也不能完全忽略。

播前土壤储水会影响生育期降水与春小麦产量之间的关系。在播前土壤湿润情形下,春小麦种子会较早地萌发,加快生育进程,形成地上部生物量,有利于更快地在干燥天气来临之前有效地遮蔽裸露的土壤,从而减少土壤直接蒸发,减少水分无效损耗。当生育期发生降水时,更多的降水将会通过蒸腾被小麦使用,而不是裸土蒸发,这将会有效地提高小麦的水分利用量,从而提高小麦最终产量。因此播前土壤水分条件越湿润,相同的生育期降水条件下,小麦的产量可能会更高。

生育期大气干湿条件会对播前土壤储水与春小麦最终产量之间的关系产生影响。本研究发现,在湿润的大气条件下,相同的土壤储水,春小麦能获得更高的产量,这与Nielsen等^[22]研究结果相似。Nielsen等^[9]发现玉米生长的关键期降水越充足,玉米与播前土壤储水之间的关系斜率越大。这意味着在水分限制条件下,生育期更多的水分供给能够有效地提高作物播前土壤储水的利用效率。但是Schlegel等^[10]却认为当生育期降水增大时,玉米和高粱的土壤播前水分利用效率会减小。Schlegel等^[10]研究中作物生育期的降水范围为163~383 mm^[10],本研究中降水介于46~206 mm,据此推断如果生育期降水足够大,可以满足作物的生长需求,那么播前土壤储水可能无法被作物充分利用,生育期降水增大到一定程度反而会降低作物对土壤水分的利用效率,因此猜测作物对播前土壤水分的利用效率随生育期降水的变化可能会是二次函数关系,即先随生育期降水增大,而后当降水对作物最终产量的作用大于土壤储水对产量的作用后达到峰值,然后随降水的增大会逐渐下降。但是由于本研究所掌握的数据不足以找到这个临界值,因此这个结论还有待进一步通过更多的试验进行验证。

3.2 半干旱地区春小麦年型的划分因素

尽管辐射、温度还有其他气候因素会影响作物产量变动,但是在半干旱雨养农业区,水分供给依然是限制作物产量变化的最重要因素。由于降水

的变动与其他气候条件是紧密相关的,故半干旱雨养农业区作物的气候年型由降水直接决定。考虑到每一种作物的生育期长短存在差异,因此半干旱地区不同作物的气候年型决定因素存在差异。Yu等^[21]发现澳大利亚南部半干旱区冬小麦产量气候年型由小麦营养生长和生殖生长阶段的降水共同决定。在澳大利亚南部,冬小麦生育期长达6个月,因此生育期降水对该区小麦形成具有决定作用,但是在本研究中,春小麦生长周期短,播前土壤储水比生育期降水对春小麦产量形成作用更大,因此划分春小麦产量气候年型时,播前土壤水分必须要加以考虑。

在半干旱地区,大气蒸发力或空气饱和差对作物产量变动具有很大影响,因此在这些地区分析作物产量与水分的关系,不仅要考虑水分供给,还需考虑水分消耗的因素。本研究发现,生育期降水并不单独影响播前土壤储水与春小麦产量之间的关系,而是大气蒸发力与降水的综合,即大气干湿条件在影响播前土壤储水与产量之间的关系(图2)。在湿润的大气条件下,土壤直接蒸发会相对较小,土壤水分更多地通过根系被小麦吸收,并通过蒸腾作用被小麦消耗,因此播前土壤水分的利用效率会相应地提高。生育期较为充足的降水有利于小麦形成地上部分,进而获得较大的叶面积指数,从而防止水分从裸露的土壤直接损耗,土壤水分中被小麦通过蒸腾作用利用的比例越大,在相同土壤水分条件下,作物产量会越高。此外,大气蒸发力越小,小麦的蒸腾效率也越高。因此,越是湿润的大气条件,单位数量的播前土壤水分消耗能获得更高的小麦产量。

一般而言,在半干旱雨养农业区,作物播种之前的土壤储水与过去几个月的降水呈正相关关系,本研究中春小麦产量的气候年型是由春小麦前一年夏季、冬季的降水以及生长当年春季和初夏的大气干湿状况共同决定的。

3.3 不同管理方式下春小麦耗水量和产量关系

增加播前土壤水分储量以及在生育期的特定阶段灌溉均会改变小麦耗水量与产量之间的关系,并最终导致小麦水分利用效率发生改变。在播前进行灌溉处理,能够增加小麦播种前的土壤水分存储,进而会间接促进小麦地上部生物量的积累,而较多的地上部生物量则会有效防止裸土无效蒸发损失水分,这也是本研究播前灌水量处理小麦边界函数截距小于传统种植方式的原因(表3)。不过,生育期进行灌溉处理的小麦具有较高的HI,这一方

面能够促进小麦获得较高的产量,但是也会导致土壤的直接蒸发增大,因此生育期进行灌溉的小麦一般具有较高的水分利用效率和较大的边界函数截距。对于播前灌溉且生育期具有覆盖的小麦而言,由于大量的水分通过蒸腾作用被小麦利用,因此这种处理下的小麦具有较高的地上部生物量,但是同时这种处理的也会导致小麦 HI 降低,而其水分利用效率也会低于有覆盖而无播前灌溉的小麦。

大气蒸发力和灌溉条件二者共同作用导致中国西北不同地区春小麦边界函数存在差异。一般而言,大气蒸发力能够决定相同作物的边界函数^[17]。与春小麦相比,冬小麦主要生育期在春季,其大气蒸发力远小于春小麦生长时期的大气蒸发力,因此本研究中春小麦水分边界函数斜率小于其他研究所得冬小麦水分边界函数的斜率^[17]。然而对于生长于中国西北部干旱区的春小麦而言,尽管其生长时期大气蒸发力大于半干旱雨养农业区的大气蒸发力,但是由于该区春小麦能够在不同时期获得充足的灌溉水分供给,因此该区春小麦生长发育要优于半干旱雨养春小麦,其具有更高的叶面积指数和 HI。因此,中国西北干旱区的春小麦水分边界函数斜率要大于半干旱雨养春小麦的数值。

参 考 文 献:

[1] RATTALINO EDREIRA J I, GUILPART N, SADRAS V, et al. Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 364-373.

[2] 王振华, 陈学庚, 郑旭荣, 等. 关于我国大田滴灌未来发展的思考 [J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 1-9, 38.

WANG Z H, CHEN X G, ZHENG X R, et al. Discussion of the future development of field drip irrigation in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 1-9, 38.

[3] 雷俊, 蔡迪花, 齐月, 等. 水分胁迫对半干旱区马铃薯产量形成的影响研究[J]. *干旱气象*, 2023, 41(2): 233-240.

LEI J, CAI D H, QI Y, et al. Effects of water stress on potato yield formation in semi-arid region[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(2): 233-240.

[4] THAPA S, XUE Q W, JESSUP K E, et al. Yield determination in winter wheat under different water regimes[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 80-87.

[5] STONE L R, SCHLEGEL A J. Yield-water supply relationships of grain sorghum and winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(5): 1359-1366.

[6] TALLEC T, BÉZIAT P, JAROSZ N, et al. Crop's water use efficiencies in temperate climate: comparison of stand, ecosystem and agro-nomical approaches [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168: 69-81.

[7] LYON D J, BOA F, ARKEBAUER T J. Water-yield relations of several spring-planted dryland crops following winter wheat [J]. *Journal of Production Agriculture*, 1995, 8(2): 281-286.

[8] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, et al. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9-18.

[9] NIELSEN D C, VIGIL M F, BENJAMIN J G. The variable response of dryland corn yield to soil water content at planting[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2): 330-336.

[10] SCHLEGEL A J, LAMM F R, ASSEFA Y, et al. Dryland corn and grain sorghum yield response to available soil water at planting[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(1): 236-245.

[11] VARZI M M. Crop water production functions-a review of available mathematical method [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 8(4): 76-83.

[12] NIELSEN D C, VIGIL M F. Defining a dryland grain sorghum production function for the central Great Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(4): 1582-1590.

[13] NIELSEN D C, VIGIL M F. Water use and environmental parameters influence proso millet yield[J]. *Field Crops Research*, 2017, 212: 34-44.

[14] MOBERLY J T, AIKEN R M, LIN X M, et al. Crop water production functions of grain sorghum and winter wheat in Kansas and Texas[J]. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 2017, 162(1): 42-60.

[15] 蒙强, 刘静霞, 李玉庆, 等. 土壤水分下限调控灌溉对春青稞生长、产量和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 173-182.

MENG Q, LIU J X, LI Y Q, et al. Effects of regulated irrigation of lower limits of soil moisture on growth, yield and water use efficiency of spring highland barley [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 173-182.

[16] 张丽华, 姚海波, 姚艳荣, 等. 不同降雨分配年型小麦春灌 1 水与播期、密度的互作效应[J]. *华北农学报*, 2021, 36(3): 96-104.

ZHANG L H, YAO H P, YAO Y R, et al. Interaction effect of irrigating once in spring with sowing date, density of wheat under different rainfall distribution years[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3): 96-104.

[17] SADRAS V O, ANGUS J F. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2006, 57(8): 847-856.

[18] 李中恺, 刘鹄, 赵文智. 作物水分生产函数研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1781-1794.

LI Z K, LIU G, ZHAO W Z. Revisiting crop water production functions in terms of cross-regional applications [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1781-1794.

[19] FRENCH R J, SCHULTZ J E. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1984, 35(6): 743-764.

[20] HATFIELD J L, DOLD C. Agroclimatology and wheat production: coping with climate change [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 224.

[21] YU Q, LI L H, LUO Q Y, et al. Year patterns of climate impact on wheat yields[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(2): 518-528.

[22] NIELSEN D C, VIGIL M F, ANDERSON R L, et al. Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 962-967.