

2 个不同抗旱性小麦品种耗水特征及根系生理特性对开花期干旱的响应

王荣荣¹, 王海琪¹, 蒋桂英¹, 尹豪杰¹, 谢冰莹¹, 张 婷¹

(石河子大学农学院,新疆 石河子 832000)

摘要: 为探明不同抗旱性小麦品种的耗水特征、根系生理特性及产量对开花期干旱的响应,以抗旱性强品种“新春 6 号”(XC 6)和抗旱性弱品种“新春 22 号”(XC 22)为试材,在土柱栽培和大田条件下设置常规灌溉(CK)、开花期轻度干旱(T1)和中度干旱(T2)处理,研究干旱胁迫对滴灌麦田耗水特征、不同土层根系生理特性和产量的影响。结果表明:开花期干旱后 2 个小麦品种全生育期耗水量和耗水强度均表现为 CK>T1>T2,拔节—孕穗期耗水模系数最大。T1 处理复水后伤流液、根系活力、根系水力学导度(*Lpr*)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性及可溶性蛋白(SP)含量显著提高,进而促进地上部质量和千粒重增加,提高产量和水分利用效率。与 XC 22 相比,XC 6 伤流液、*Lpr*、根系活力、SOD、POD、SP 含量、地上部质量以及产量均显著增加,T1 处理下 XC 6 的伤流液、*Lpr* 较 XC 22 高 5.4%~25.1%,2.2%~15.7%;0—20,20—40,40—60 cm 土层 SOD(6.9%~20.0%,2.6%~24.7%和 3.6%~31.1%)、POD(4.1%~19.1%,3.9%~25.2%和 3.7%~21.6%)、CAT(7.8%~15.2%,8.3%~13.3%和 10.8%~13.3%)活性及 SP(4.5%~20.4%,0.8%~29.4%和 1.3%~7.9%)含量显著高于 XC 22。根质量、地上部质量和产量与耗水量呈二次抛物线关系,与伤流液、*Lpr*、MDA 和 CAT 活性呈显著正相关。水分处理与品种互作对 *Lpr*、POD、CAT 活性及 SP 含量影响显著。因此,抗旱性强品种开花期轻度干旱可降低耗水量,提高根系 SP 含量及抗氧化酶活性,增强根系活力,促进地上部质量提高,有利于提高产量和水分利用效率。

关键词: 滴灌春小麦; 干旱胁迫; 耗水特征; 根系生理特性; 产量

中图分类号:S512.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)04-0253-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.032

Response of Water Consumption and Root Physiological Characteristics of Two Different Drought-tolerant Wheat Varieties to Anthesis Stage Drought

WANG Rongrong¹, WANG Haiqi¹, JIANG Guiying¹, YIN Haojie¹, XIE Bingying¹, ZHANG Ting¹

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to explore the water consumption characteristics, root physiological characteristics and yield response to anthesis stage drought of different drought-tolerant wheat varieties, taking drought-tolerant variety “Xinchun 6” (XC 6) and drought-intolerant variety “Xinchun 22” (XC 22) as the experimental materials, conventional irrigation (CK), mild drought (T1) and moderate drought (T2) at anthesis stage were set up under soil column cultivation and field conditions to investigate the effects of drought stress on water consumption characteristics, root physiological characteristics of different soil layers and yield of drip irrigation wheat field. The results showed that after anthesis stage drought, the water consumption and water consumption intensity of the two wheat varieties in the whole growth period were CK>T1>T2, and the water consumption model coefficient reached the maximum at the jointing-booting stage. After rehydration with T1 treatment, the bleeding fluid, root activity, hydraulic conductivity (*Lpr*), the activity of catalase (CAT), peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) and soluble protein (SP) content significantly increased, which promoted the increase of shoot mass and 1 000 grain weight, and improved yield and water use efficiency. Compared with XC 22, bleeding fluid, *Lpr*, root activity, SOD, POD, SP content, shoot quality and yield of XC 6 all significantly increased. In T1 treatment, the bleeding fluid and *Lpr* of XC 6 were

收稿日期:2021-12-11
资助项目:国家自然科学基金项目(32060422)
第一作者:王荣荣(1997—),女,硕士研究生,主要从事作物生理生态研究。E-mail:1179679457@qq.com
通信作者:蒋桂英(1967—),女,教授,主要从事作物生理生态研究。E-mail:jgy67@126.com

5.4% to 25.1%, 2.2% to 15.7% higher than those of XC 22, respectively, and the SOD (6.9% to 20.0%, 2.6% to 24.7% and 3.6% to 31.1%), POD (4.1% to 19.1%, 3.9% to 25.2% and 3.7% to 21.6%), CAT (7.8% to 15.2%, 8.3% to 13.3% and 10.8% to 13.3%) activities and SP content (4.5% to 20.4%, 0.8% to 29.4% and 1.3% to 7.9%) in 0—20, 20—40 and 40—60 cm soil layers were significantly higher than those of XC 22, respectively. Root mass, shoot mass and yield had a quadratic parabola relationship with water consumption, and there was a significant positive correlation with bleeding fluid, *Lpr*, MDA and CAT activities. The interaction between water treatment and varieties had significant effects on *Lpr*, POD, CAT and SP content. Therefore, mild anthesis stage drought of drought-tolerant variety could reduce water consumption, improve root SP content and antioxidant enzyme activity, so as to enhance root activity, improve shoot mass, and improve yield and water use efficiency.

Keywords: drip irrigated spring wheat; drought; water consumption characteristics; root physiological characteristics; yield

小麦是新疆第一大粮食作物,在保障区域粮食安全中有着不可替代的作用^[1]。新疆整体干旱少雨,小麦生育中后期(5—6月)>25℃的高温天气出现频率较高,尤其以开花期(6月初)最为明显^[2],且高温与干热风时常相伴^[3],严重影响籽粒结实率和千粒重的提高。目前,新疆大力推广和发展滴灌节水高效生产技术,环境水资源利用效率得到深入挖掘。因此,如何利用小麦自身的调节能力,挖掘其生物节水潜力,减轻花期干旱对籽粒灌浆的影响,协同提高产量和水分利用率是新疆小麦产业可持续发展的关键。

根系是作物吸收土壤水分的主要器官。水分亏缺条件下,根系通过其生长和代谢的“补偿效应”,仍能维持必要的生长发育^[4]。补偿效应是作物根系对水分亏缺的适应策略,也是作物生育期间进行水分调控,充分挖掘根系高效利用水分潜力,实现生物节水的重要生理依据^[5]。已有研究^[6]表明,春小麦生育期耗水量在 312.0~331.2 mm,抽穗—开花期耗水模系数最大,耗水量每增加 1 mm,可增产 16~40 kg/hm²,水分利用效率提高 2%~14%。当开花期田间持水量达 70%~75%时,可提高大豆根系活力和伤流液含量,此时土壤水分充足,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性较低^[7],但水分利用效率降低 9.86%^[8]。而开花期田间持水量从 75%降至 65%时,小麦根系中 SOD、POD、CAT 活性及可溶性蛋白(SP)不同程度增加来清除根系产生的活性氧(ROS)^[9]。西北地区冬小麦开花期维持田间持水量的 60%左右时,抗氧化酶活性升高,产量可达 9 000 kg/hm²,耗水量减少 9.40%,从而提高水分利用效率^[10],但随胁迫时间增加,抗氧化酶活性降低,丙二醛(MDA)增加^[11]。罗宏海等^[12]在棉花节水研究证明,开花期田间持水量降低至 50%左右时,根系活力降低 33.33%,根冠比提高 19.90%,水分利用效率降低 35.19%,且开花

期田间持水量维持在 45%~50%时,棉花根系 SOD 和 POD 活性显著升高,SP 含量也持续升高来调节干旱对根系产生的损伤^[13]。可见,开花期适度干旱有利于增强作物抗旱性和根系生理活性,进而调控产量形成和提高水分利用效率。

滴灌条件下春小麦根系生理特性及产量对开花期适度干旱的响应鲜有报道,对开花期根系活性及抗氧化能力的影响及其与产量、水分利用效率的关系尚不清楚。为此,本研究从适度亏水后复水作物根系补偿效应着手,选取抗旱性差异较大的 2 个基因型小麦材料,研究开花期适度水分亏缺条件下滴灌春小麦耗水规律及根系生理特征的动态变化与产量的关系,明确花期适度干旱根系水分高效利用的补偿效应,阐明滴灌春小麦根系生理功能调控产量形成和水分利用率提升的生理机制,为新疆滴灌小麦高产节水栽培技术体系的制定提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 4—7 月在石河子大学农学试验站(44°18'N, 85°59'E)进行。供试土壤为灌溉灰漠土,试验地 0—40 cm 土层土壤含有机质、全氮含量分别为 28.4、1.3 g/kg;碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 71.2、15.7、148.0 mg/kg;土壤电导率为 0.15 dS/m,容重为 1.4 g/cm³,pH 7.8。生育期内最高气温出现在 5 月下旬至 7 月,开花期最高温度可达 39.0℃。年平均降水量 201.3 mm,年蒸发量 1 516.2 mm。小麦生育期间 4—7 月的降雨量和温度见图 1。

1.2 试验设计

采用裂区设计,水分处理为主区,品种为副区。选取经抗性鉴定的 2 个小麦品种:抗旱性弱的“新春 22 号”(XC 22)与抗旱性强的“新春 6 号”(XC 6)。开花期设置 3 个水分处理,正常水分(75%~80%田间持水量,CK)、轻度干旱(60%~65%田间持水量,

T1)和中度干旱(45%~50%田间持水量,T2),分蘖期和拔节期保持 75%~80%的田间持水量。于 2021 年 5 月 27 日开始控水,为保证轻度干旱和中度干旱复水时间一致,中度较轻度干旱提前 5 天进行控水,在达到相应的土壤含水量后,干旱处理时间为 8 天,干旱解除日期为 2021 年 6 月 11 日。

分别于各小区埋设厚 1 cm、直径 10 cm、长 20 cm 的硬质 PE 管进行土柱栽培试验,每 3 个 PE 管纵向连接成 1 个整体管,每个处理 16 管,用于生理指标取样(图 2)。采用 Watermark 电阻式水分张力感应器(model 200SS; Irrometer Co., River-side, USA)监测土壤水分变化,将 Watermark 放置于大田 12.5 cm 麦行中间(图 2),垂直埋于 0—20,20—40,40—60 cm 不同深度测

定土壤水分张力值。于小麦生育期每日 20:00 测定 Watermark 读数,土壤含水量与 Watermark 读数拟合曲线见图 3。

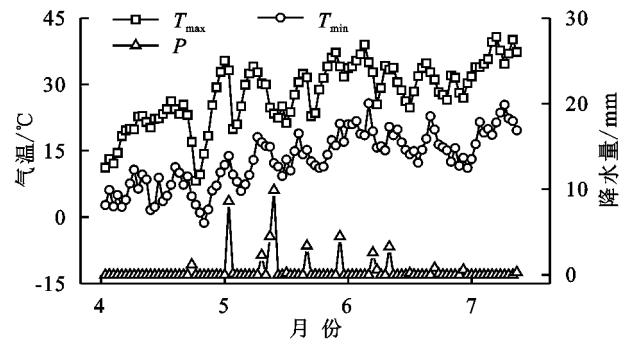


图 1 2021 年春小麦生育期最高气温($T_{\max}$)、最低气温($T_{\min}$)和降水量(P)

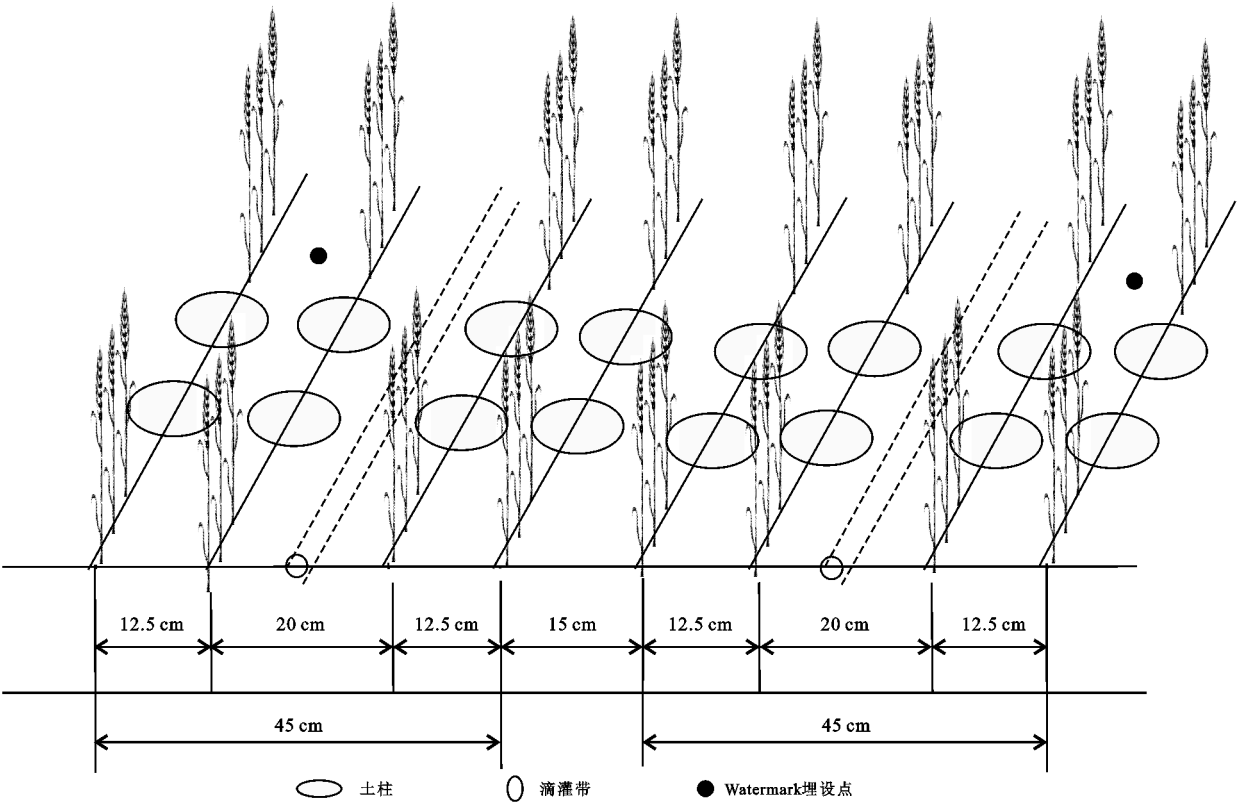


图 2 田间种植示意

小区面积为 20 m² (4 m×5 m),重复 3 次。各个小区间埋置 100 cm 深度的防渗膜,防止水分与肥料外移。试验中所用氮肥为尿素(N=46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅=12%),播种前各小区将 120 kg/hm² 的 P₂O₅作底肥翻耕于土壤;生育期内施氮量 255 kg/hm²,基追比为 3:7,基肥施入 76.5 kg/hm²,分别于分蘖期、拔节期、孕穗—扬花期、灌浆期追肥 20%, 40%, 35%, 5%。播期为 2021 年 4 月 3 日,播种量为 345 kg/hm²,采用宽窄行、“一管四行”的方式种植,行间距为 12.5,20,12.5,15 cm(图 2),滴灌带(管径 16 mm,滴头间距 30 cm,流量 2.6 L/h)放置在 20 cm 的宽行。小麦于 2021 年 7 月 10 日收获,其他田间管

理措施与当地生产一致。

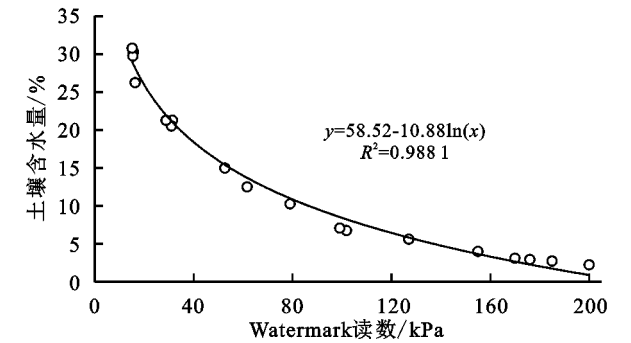


图 3 土壤含水量与 Watermark 读数曲线

1.3 测定项目与方法

1.3.1 耗水特征 于小麦分蘖期、拔节—孕穗期、抽

穗—开花期、灌浆—成熟期,采用土壤水分平衡法^[14]计算土壤水分蒸散总量: $ET=SWD+P+I-D+W_g-R$ 。式中:SWD 为生育期土壤水分变化量(mm); P 为降雨量(mm); I 为灌溉量(mm); D 为灌溉后土壤水向下层流动量(mm); W_g 为深层地下水利用量(mm); R 为地表径流(mm)。无地表径流, W_g 、 D 和 R 均可忽略。各生育阶段土壤水分蒸散总量采用同样方法计算。

水分利用特征^[15]参数计算公式为:
耗水模系数(%)=生育阶段水分蒸散量/全生育期水分蒸散总量×100%

耗水强度(mm/d)=生育阶段水分蒸散量/生育阶段持续天数

1.3.2 根系生理参数 于小麦开花期、花后 14,28,35 天,在距离根基 2 cm 处切断茎秆,称取 0.2 g 脱脂棉,迅速包住茎秆,再用保鲜膜包好脱脂棉,收集 12 h (20:00—翌日 8:00)后称重法测定伤流量,重复 3 次。同时,分别取 0—20,20—40,40—60 cm 土层根系,按不同土层清洗根系,并去除杂根、死根等,用冰袋保存迅速带回实验室,立即置于液氮中速冻,−80 ℃冰箱中保存。参照李合生^[16]的方法测定根系活力、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白(SP)含量、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性。

1.3.3 根系水力学导度(L_{pr}) 取样时期同 1.3.2。取样前 1 天,将土柱中灌水浸泡 24 h 后完整取出,迅速将根系浸入蒸馏水中带回实验室。测定时,在距离根基 2 cm 处切断茎,清除切口液体(以防污染),将整株根系用硅胶塞密封放入压力室(PMS1505D—EXP, USA),按照 Miyamoto 等^[17]的方法测定。

1.3.4 根冠比、产量及水分利用效率 成熟期,每个

处理内选取 1 m² 的小麦植株,进行人工收割并脱粒,称取重量。同时选取长势均匀的 10 株小麦,从分蘖节处切断为地上植物样品,地下部分生物量则将根挖出,冲洗干净,烘干称重,重复 3 次,计算籽粒产量、根冠比^[18]及水分利用效率^[19]。

根冠比=单位面积根系生物量/单位面积地上部分生物量

水分利用效率(kg/(hm²·mm))=经济产量/生长季水分总蒸散量

1.4 数据处理

用 SPSS 26.0 软件进行处理间的统计分析,采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用 Excel 和 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 耗水特征

2.1.1 总耗水量及阶段耗水 由表 1 可知,从分蘖到成熟期,小麦阶段耗水量呈现出先升高后降低的趋势,在拔节—孕穗期达到最大。开花期受旱程度增强,生育期总耗水量呈减少趋势,CK 处理显著高于 T1、T2 处理($p<0.05$),XC 6 和 XC 22 在 T1、T2 处理下比 CK 分别节水 7.2%,10.0%和 18.2%,16.7%。XC 6 开花期和灌浆—成熟期 T1 耗水量比 CK 分别减少 16.9%和 10.3%,T2 则减少 45.8%和 20.1%;XC 22 开花期和灌浆—成熟期 T1、T2 处理比 CK 分别减少 24.5%,14.4%和 47.0%,16.9%。品种间,XC 6 (抗旱性强)在 CK、T1 和 T2 处理下全生育期耗水量较 XC 22(抗旱性弱)分别提高 2.1%,5.2%和 0.1%。品种和水分处理互作对抽穗—开花期、灌浆—成熟期以及全生育期耗水量有显著影响。

表 1 滴灌春小麦不同生育阶段耗水量的变化

品种	处理	全生育期	阶段耗水/mm			
		总耗水/mm	苗期—分蘖期	拔节—孕穗期	抽穗—开花期	灌浆—成熟期
XC 6	CK	540.6±3.1a	126.9±2.5a	146.9±1.9a	142.8±1.6a	124.0±1.0a
	T1	501.6±3.1b	123.2±2.8a	148.5±1.3a	118.7±2.8b	111.2±1.9b
	T2	442.1±1.5c	122.5±0.5a	143.2±1.9b	77.4±1.3c	99.1±2.1c
XC 22	CK	529.6±8.6a	124.4±2.4a	144.1±1.8a	141.7±2.1a	119.4±3.9a
	T1	476.7±4.0b	122.3±1.2a	145.2±1.3a	107.0±2.9b	102.2±1.3b
	T2	441.5±5.4c	123.9±3.2a	143.2±1.6a	75.1±1.5c	99.2±2.0b
F 值	品种	28.3**	0.4ns	6.9*	24.5**	18.4**
	处理	557.5**	2.7ns	7.7**	1440.2**	162.2**
	品种×处理	9.5**	1.1ns	1.8ns	11.2**	6.4*

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);ns 表示处理间在 0.05 水平差异不显著;“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著。下同。

2.1.2 耗水模系数和耗水强度 由表 2 可知,耗水模系数与生育期耗水强度变化趋势一致,均随生育期的推进表现为先增后减的趋势,耗水模系数在拔节—孕穗期达到最大,而耗水强度在 CK 处理下抽穗—开花期达到最大,T1、T2 处理在拔节—孕穗

期达到最大。水分胁迫程度增强,耗水模系数及耗水强度均逐渐下降,CK 处理显著高于 T1、T2 ($p<0.05$),其耗水模系数和耗水强度比 T1、T2 处理分别高出 3.5%~19.3%和 11.5%~32.5%,0.3%~75.0%和 20.4%~88.6%。XC 6 和 XC 22 全生育期耗水强度

CK 处理较 T1、T2 处理分别高出 7.8% 和 11.1%，0.1%~5.2%。水分处理和品种互作对分蘖期和抽穗—开花期耗水模系数影响显著，对抽穗—开花期、22.3%和 20.0%。灌浆—成熟期及全生育期耗水强度影响显著。

品种间,XC 6 全生育期耗水强度较 XC 22 高出

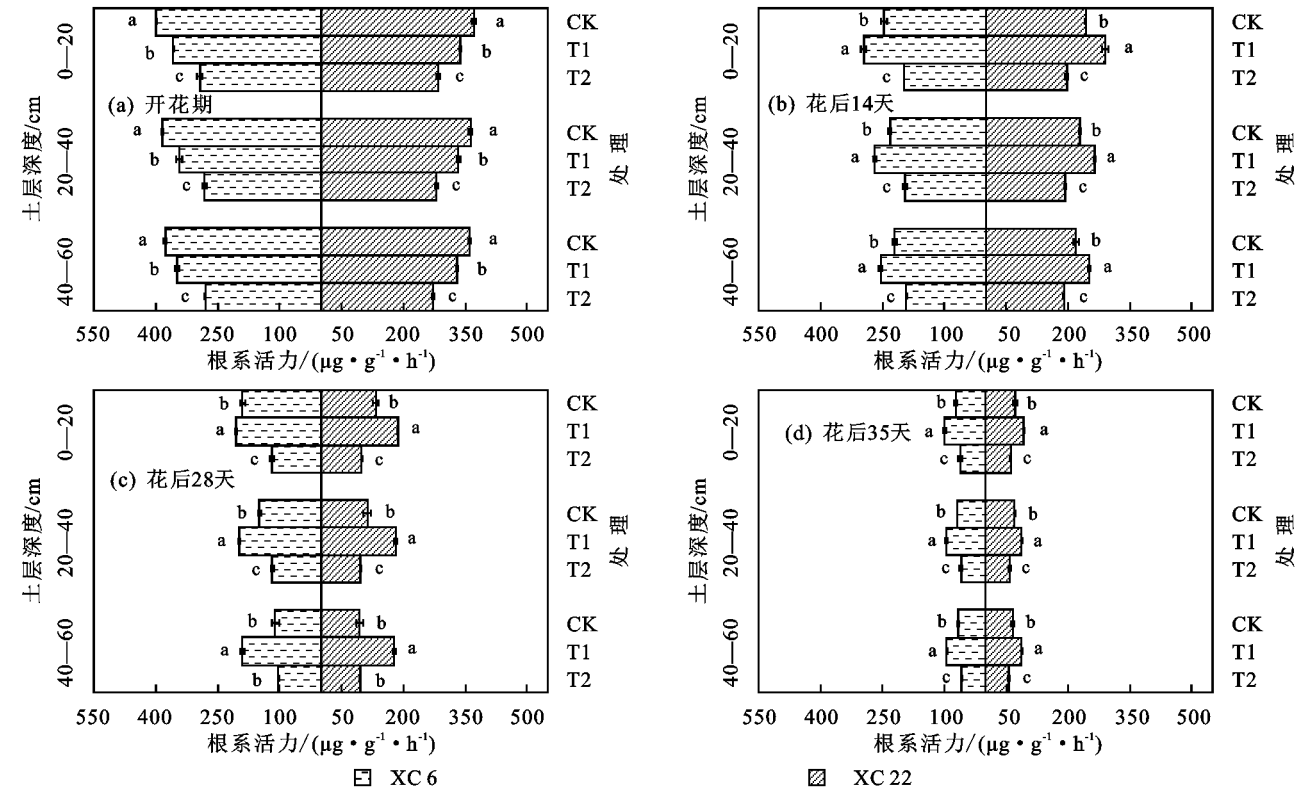
表 2 不同处理各生育期、全生育期耗水强度和耗水模系数

品种	处理	分蘖期		拔节—孕穗期		抽穗—开花期		灌浆—成熟期		全生育期	
		耗水模	耗水强度/	耗水模	耗水强度/	耗水模	耗水强度/	耗水模	耗水强度/	耗水模	耗水强度/
		系数/%	(mm·d ⁻¹)	系数/%	(mm·d ⁻¹)	系数/%	(mm·d ⁻¹)	系数/%	(mm·d ⁻¹)	系数/%	(mm·d ⁻¹)
XC 6	CK	23.7±0.3c	5.1±0.1a	27.2±0.5c	6.4±0.1a	26.4±0.2a	7.5±0.1a	22.9±0.1a	4.4±0.03a	100	5.7±0.03a
	T1	24.6±0.4b	4.9±0.1a	29.6±0.1b	6.5±0.1a	23.7±0.7b	6.3±0.2b	22.2±0.2b	4.0±0.1b	100	5.3±0.03b
	T2	27.7±0.1a	4.9±0.0a	32.4±0.5a	6.2±0.1b	15.1±0.2c	4.1±0.1c	22.4±0.4ab	3.4±0.1c	100	4.7±0.02c
XC 22	CK	23.5±0.1c	5.0±0.1a	27.2±0.4c	6.3±0.1a	26.8±0.2a	7.5±0.1a	22.6±0.5a	4.3±0.1a	100	5.6±0.1a
	T1	25.7±0.4b	4.9±0.1a	30.5±0.0b	6.3±0.1a	22.4±0.5b	5.6±0.2b	21.4±0.2b	3.7±0.1b	100	5.0±0.04b
	T2	28.1±0.4a	5.0±0.1a	32.4±0.3a	6.2±0.1a	17.0±0.3c	4.0±0.1c	22.5±0.5a	3.5±0.1b	100	4.7±0.1c
F 值	品种	10.6**	0.4ns	3.4ns	6.9*	5.9*	24.5**	4.7ns	18.4**	—	28.3**
	处理	291.6**	2.7ns	327.7**	7.7**	869.0**	1440.2**	11.7**	162.2**	—	557.5**
	品种×处理	4.5*	1.1ns	2.6ns	1.8ns	6.1*	11.2**	2.0ns	6.4*	—	9.5**

2.2 根系生理参数

2.2.1 根系活力 由图 4 可知,根系活力随生育进程推进呈逐渐降低趋势。随水分胁迫程度增强,2 个品种开花期根系活力在 CK 处理下较 T1、T2 处理分别高 8.3%~12.1%,29.7%~36.3%,而花后 14,28,35 天根系活力在 T1 处理达到最大,各土层 T1 处理显著较 CK 和 T2 处理高 8.3%~40.2%和 47.0%~87.9%,15.4%~61.8%和 37.6%~88.0%,15.2%~89.7%和 33.0%~87.7%。2 个品种根系活力在花后

14~28 天各土层的平均降幅(27.6%~57.9%)略大于花后 28~35 天降幅(38.9%~53.8%)。品种间,XC 6 在 3 种处理下 0—20 cm 土层较 XC 22 分别高出 0.5%~42.1%,2.2%~9.8%,0.8%~20.5%;20—40 cm 土层较 XC 22 增加 1.9%~32.4%,1.4%~8.9%,0.7%~21.6%;40—60 cm 土层高出 0.6%~17.3%,1.4%~6.9%,1.3%~8.2%。品种、水分处理对根系活力影响显著,品种和水分处理互作对开花期、花后 28,35 天根系活力影响显著。



注:CK 为全生育期正常灌溉;T1 为开花期轻度干旱;T2 为开花期中度干旱;不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 4 不同水分处理对根系活力的影响

2.2.2 根系伤流液 由图 5 可知,随生育进程推进,伤流液逐渐下降。开花期干旱程度增强,根系伤流液呈下降趋势,CK 较 T1、T2 处理分别提高 11.9% 和 4.9%,46.6% 和 55.4%,而花后 14,28,35 天 T1 处理显著高于 CK、T2,分别提高 5.2%~48.7% 和 5.6%~

30.9%,46.2%~156.2% 和 44.0%~96.2%。品种间,XC 6 伤流液在各处理下比 XC 22 分别提高 8.3%~18.4%,5.4%~25.1% 和 7.7%~44.6%。水分处理对小麦伤流液影响显著,水分处理和品种互作对开花期伤流液影响显著。

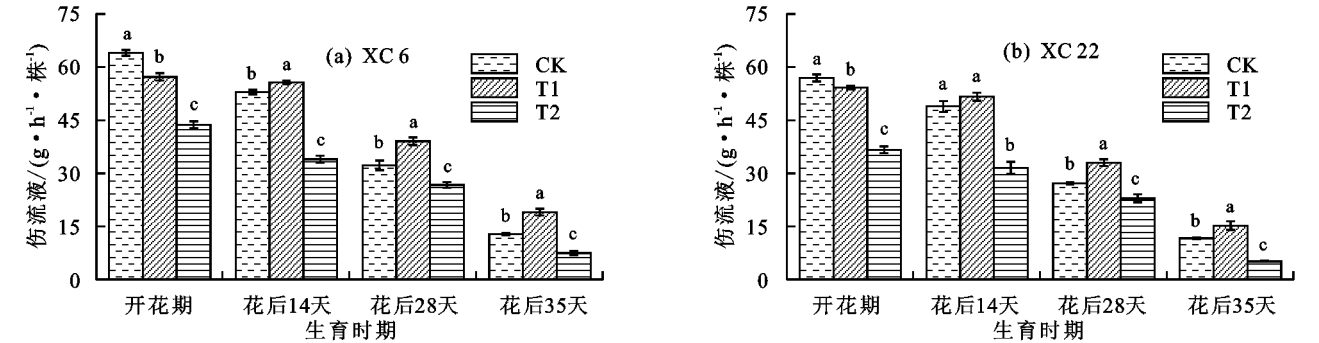


图 5 不同水分处理对伤流液的影响

2.2.3 根系抗氧化酶 随生育进程推进,根系 SOD、POD 活性呈先升后降的趋势,在花后 14 天达到最大,而

CAT 活性随生育时期推进逐渐降低,且随土层深度加深,SOD、POD、CAT 活性降低(图 6、图 7、图 8)。

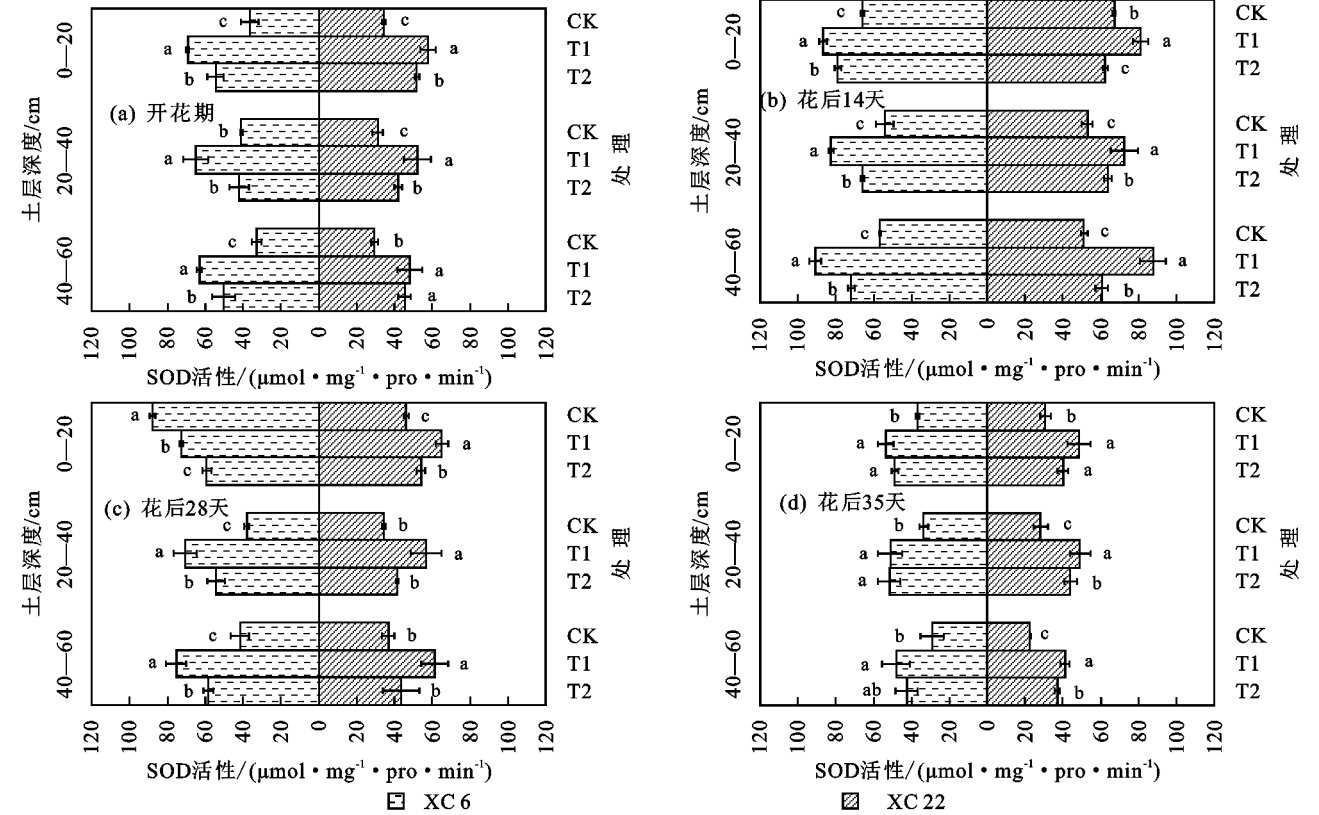


图 6 不同水分处理对根系 SOD 活性的影响

随水分胁迫增加,SOD、POD、CAT 活性表现为先上升后降低。XC 6 在 T1 条件下 0~20,20~40,40~60 cm SOD 活性较 CK 分别高 32.0%~90.7%,29.9%~115.9%,32.6%~117.6%,POD 活性分别增加 19.6%~67.7%,11.7%~53.1%,22.4%~148.7%,CAT 活性分别增加 8.6%~14.7%,9.1%~18.9%,3.7%~19.5%;XC 22 在 T1 处理下不同土层 SOD 活性较 CK 分别高出 18.9%~68.0%,37.1%~76.3%,63.1%~82.1%,POD 活性分别增加 15.6%~78.5%,11.3%~

90.1%,26.4%~88.7%,CAT 活性分别增加 17.3%~42.7%,17.7%~42.8%,15.4%~39.0%。CAT 活性在开花期至花后 14 天的平均降幅(8.8%~25.2%)小于花后 28~35 天的降幅(23.9%~33.0%)。T1 处理下,XC 6 不同土层 SOD(6.9%~20.0%,2.6%~24.7% 和 3.6%~31.1%)、POD(4.1%~19.1%,3.9%~25.2%,3.7%~21.6%)、CAT(7.8%~15.2%,8.3%~13.3%和 10.8%~13.3%)活性显著高于 XC 22。水分处理与品种互作对开花期、花后 14 天 SOD 活

性,开花期、花后 14,28 天 POD 活性以及 CAT 活性

影响显著。

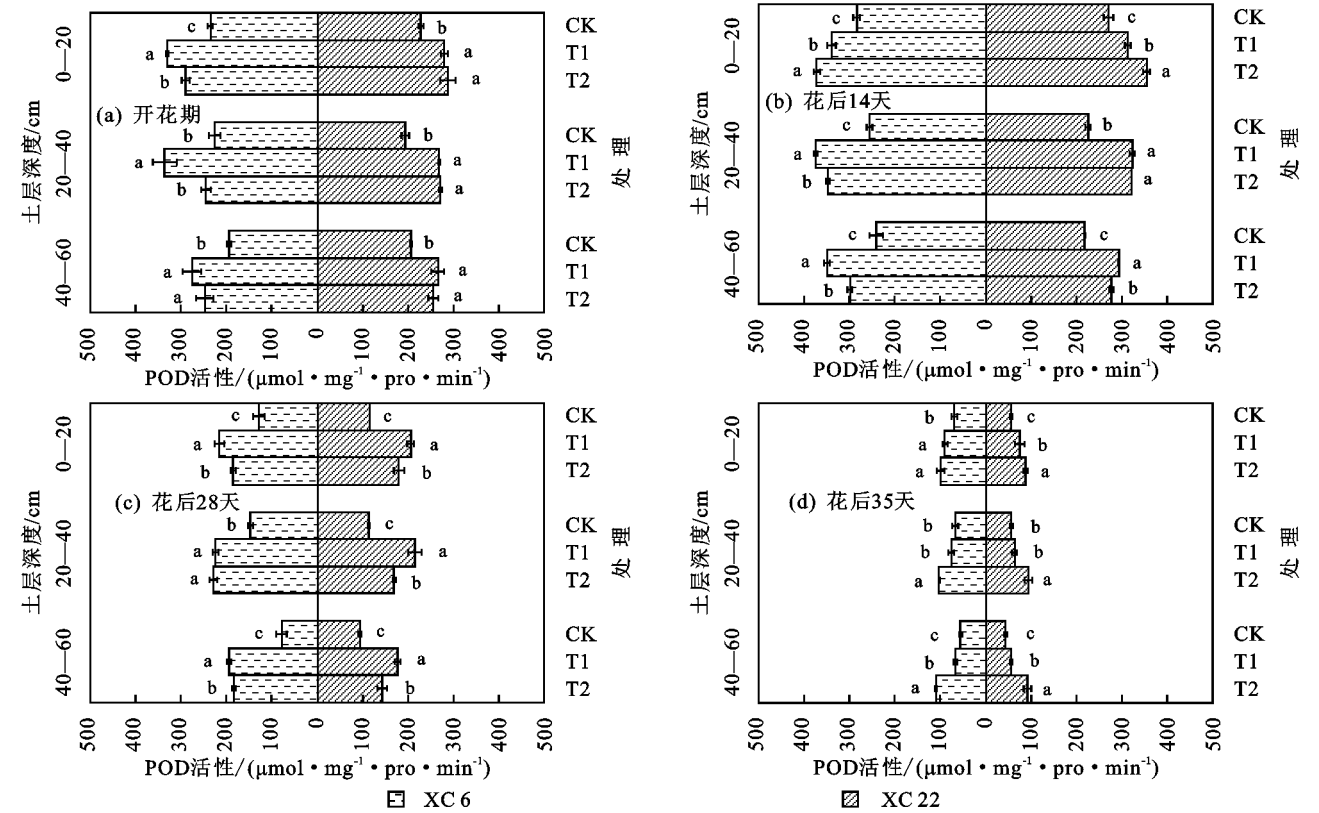


图 7 不同水分处理对根系 POD 活性的影响

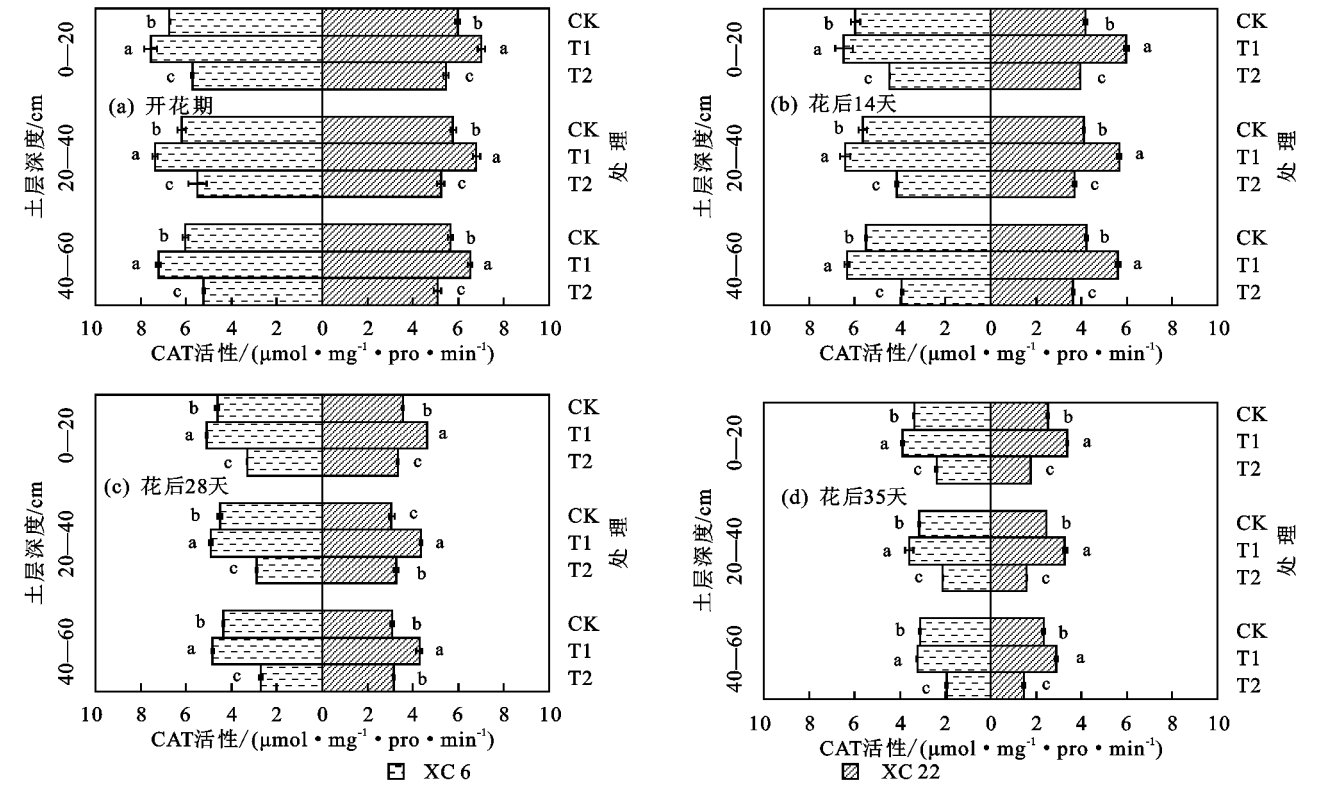


图 8 不同水分处理对根系 CAT 活性的影响

2.2.4 SP 含量 随生育时期推进,SP 含量呈先增后降的趋势(图 9),花后 14 天达到最大,且干旱胁迫增加,各土层均在 T1 处理达到最大,XC 6 各土层 T1 处理较 CK 和 T2 分别提高 7.0%~61.2%和 20.4%~87.2%,13.6%~72.6%和 28.3%~108.4%,25.1%~38.6%和 1.3%~100.0%;XC 22 在 T1 处理下较 CK 和 T2 分别提高 8.0%~36.5%和 35.0%~114.4%,29.9%~63.5%和 22.4%~116.2%,28.5%~44.7%

和 14.0%~112.4%。T1 处理下, XC 6 不同土层根系 SP 含量比 XC 22 分别提高 4.5%~20.4%, 0.8%~29.4%和 1.3%~7.9%。品种与水分处理互作对 SP 含量影响显著。

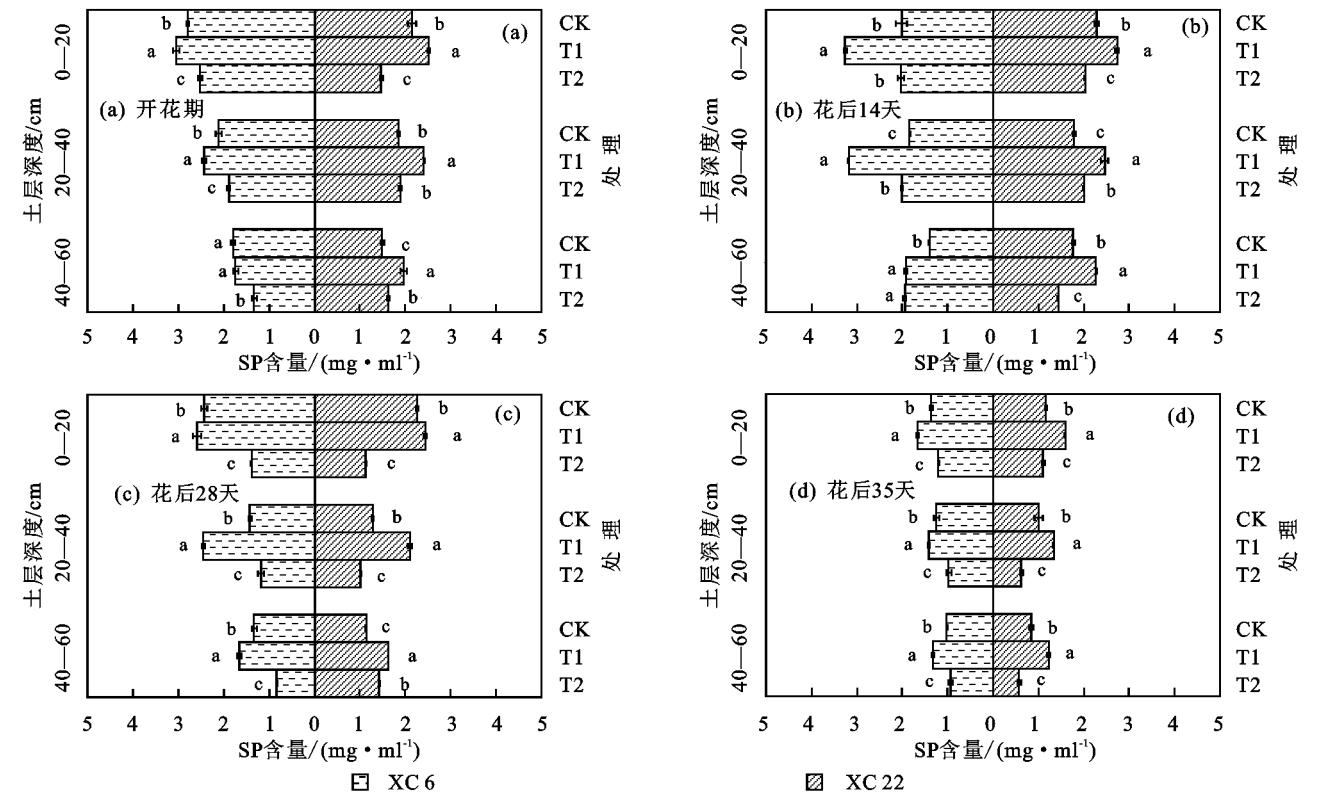


图 9 不同水分处理对根系 SP 含量的影响

2.2.5 MDA 含量 由图 10 可知,随生育进程推进,MDA 含量逐渐增加。开花期干旱程度增加,MDA 含量呈上升趋势,T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理 ($p<0.05$),XC 6 不同土层 T2 较 CK 和 T1 处理分别提高 25.5%~54.1%和 1.6%~40.9%,16.9%~68.0%和 3.2%~25.4%,13.3%~87.9%和 11.4%~31.4%;XC 22 在 T2 处理下较 CK 和 T1 处理分别提高 51.5%~72.3%和 9.1%~29.7%,10.0%~94.6%和 18.4%~43.1%,9.4%~56.2%和 19.9%~34.7%。开花期至花后 14 天 MDA 含量的平均增幅(31.1%~78.0%)大于花后 28~35 天的增幅(19.1%~45.1%)。T2 处理下,XC 6 不同土层根系 MDA 含量较 XC 22 分别降低 3.8%~19.3%,14.2%~32.1%,4.2%~21.2%。品种与水分处理互作对开花期、花后 14,28 天 MDA 含量影响显著。

2.3 根系水力学导度(Lpr)

根系 Lpr 变化趋势与根系活力和伤流液变化趋势一致,均随生育期推进逐渐降低(图 11)。开花期干旱程度增强,Lpr 呈降低趋势,2 个品种 CK 较 T1、T2 处理分别高 4.8%和 13.6%,30.0%和 34.8%,而花后 14,28,35 天 T1 处理显著较 CK、T2 高 17.1%~31.9%和 16.8%~47.6%,45.1%~129.6%和 48.2%~146.3%。开花期~花后 14 天 Lpr 的降幅(15.2%~60.6%)小于花后 14~28 天的降幅(57.6%~92.4%)。品种间,XC 6 根系 Lpr 优于 XC 22,3 种处理下,XC 6 较 XC 22 分别提高

6.7%~14.5%,2.2%~15.7%和 10.6%~25.2%。品种、水分处理对 Lpr 影响显著,品种和水分处理互作对开花期和花后 28 天 Lpr 影响显著。

2.4 产量和水分利用效率

由表 3 可知,开花期水分胁迫程度增强,2 个品种根系质量逐渐降低,表现为 CK>T1>T2,CK 比 T1、T2 处理分别提高 6.8%和 10.3%,24.5%和 85.4%,但 XC 6 和 XC 22 地上部质量在 T1 处理下较其他处理分别提高 11.3%和 15.1%,39.6%和 64.7%。XC 6 根冠比在 T2 处理下较 CK、T1 分别提高 0.7%,19.6%,而 XC 22 根冠比在 CK 处理下达到最大,较其他处理分别提高 27.2%,29.9%。水分处理对穗数、穗粒数、千粒重影响显著。XC 6 和 XC 22 穗数均在 T1 处理最大,较其他处理分别提高 1.9%,2.7%和 0.7%,2.6%;随水分胁迫增加,XC 6 穗粒数、千粒重呈先增后降的趋势,且各处理间差异显著,而 XC 22 穗粒数和千粒重均在 CK 处理达到最大,CK 较其他处理分别提高 8.5%,20.1%和 1.8%,20.6%。品种与水分处理互作对千粒重影响显著。XC 6 产量和水分利用效率呈先增后降的趋势,T1 处理显著较其他处理分别提高 1.8%和 16.2%,13.9%和 6.5%,XC 22 产量在 CK 处理达到最大,较其他处理分别提高 2.6%,15.3%,但水分利用效率在 T1 处理达到最大,较其他处理分别提高 10.8%,6.5%。品种和水分处理互作对根质量、地上部质量、根冠比和产量影响显著。

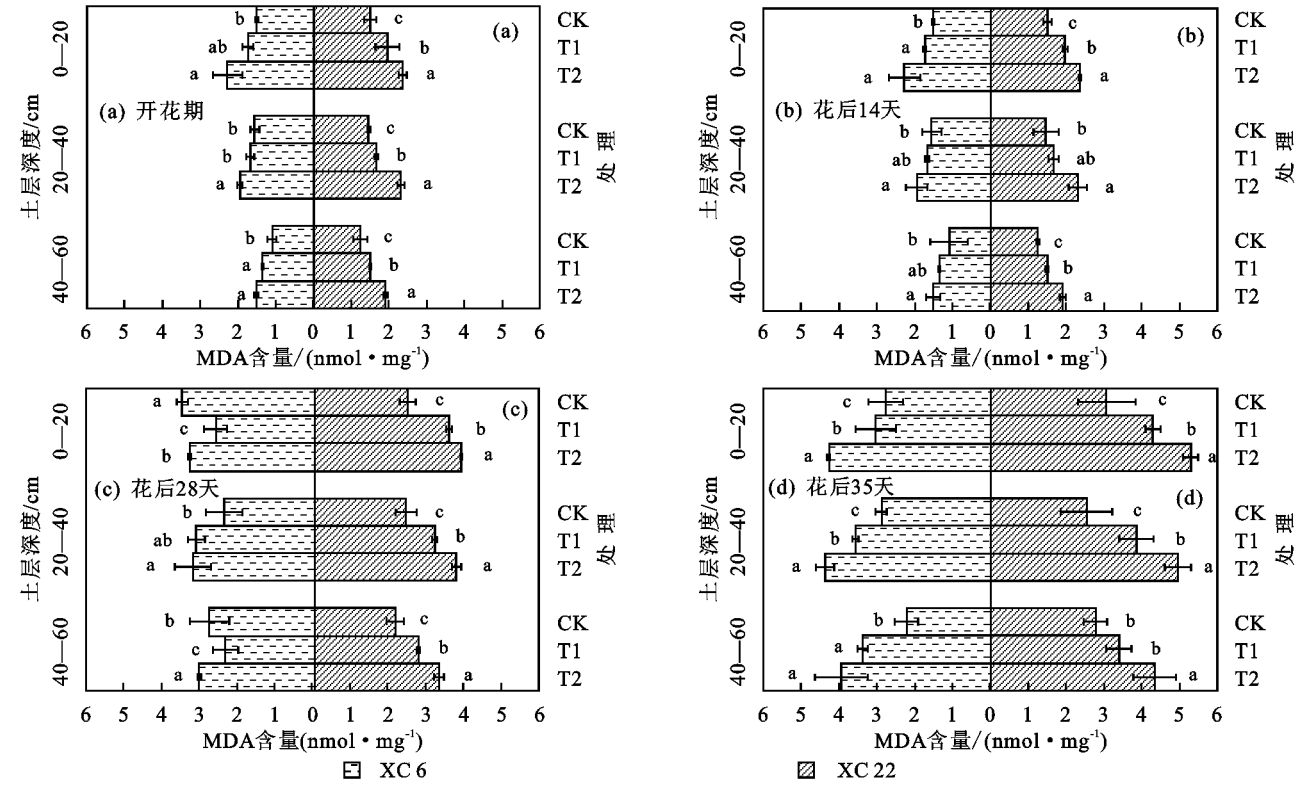


图 10 不同水分处理对根系 MDA 含量的影响

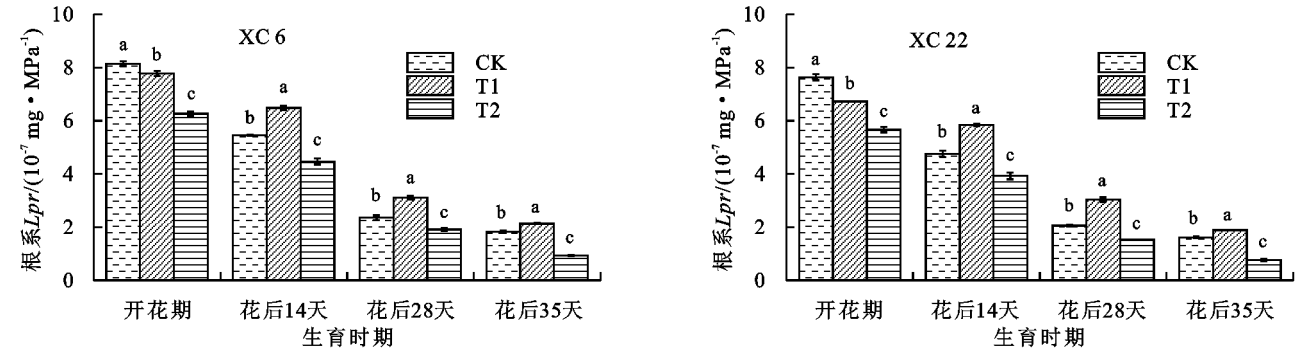


图 11 不同水分处理对根系 Lpr 的影响

表 3 开花期不同水分处理对小麦干物质及产量的影响

品种	处理	根系质量/ (kg·hm ⁻²)	地上部质量/ (kg·hm ⁻²)	根冠比	穗数/ 10 ⁴ hm ⁻²	穗粒数	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
XC 6	CK	3657.0±257.2a	22728.2±380.5b	0.2±0.02a	429.1±9.5b	36.9±1.9a	46.3±0.2b	7354.3±31.1b	13.4±0.1c
	T1	3425.3±79.9a	25296.9±1012.0a	0.1±0.01b	437.3±9.6a	37.2±2.5a	47.8±1.0a	7487.6±10.2a	15.6±0.2a
	T2	2936.3±152.0b	18122.2±773.8c	0.2±0.01a	425.7±9.4b	30.3±4.1b	40.4±0.9c	6457.5±46.5c	14.6±0.1b
XC 22	CK	4561.7±300.3a	20967.6±492.6b	0.2±0.02a	421.9±4.9ab	35.9±0.9a	45.7±0.3a	7236.6±12.7a	13.7±0.2c
	T1	4134.3±252.1a	24140.4±773.6a	0.2±0.01b	424.9±4.1a	33.1±3.0ab	44.9±0.3b	7054.1±9.7b	15.1±0.1a
	T2	2460.0±370.0b	14654.0±123.4c	0.2±0.02b	413.7±3.2b	29.9±1.6b	37.9±0.5c	6274.5±33.9c	14.2±0.3b
品种		10.1**	46.6**	22.1**	42.1**	5.5*	41.4**	347.6**	9.0*
F 值		50.9**	245.7**	9.3**	16.6**	25.2**	237.2**	2170.6**	139.7**
品种×处理		13.0**	4.9*	4.6*	1.0ns	2.2ns	7.5**	53.8**	3.5ns

2.5 根系指标的相关分析

由表 4 可知,根系质量、地上部质量和产量与耗水强度、耗水量、BF、 Lpr 、MDA 和 CAT 活性呈显著正相关($p<0.05$),与 POD 活性呈显著负相关,与 SOD 活性无相关性;地上部质量和产量与 RV 和 SP

含量显著相关。

2.6 耗水量与干物质、产量的关系

由图 12 可知,2 个品种在不同水分处理下,干物质、产量与耗水量呈二次抛物线,当耗水量增加到一定程度时,产量反而降低。当 XC 6 耗水量为 646.8,

502.5,508.4 mm 时,根质量、地上部质量、产量分别可达 3 539.5,24 126.8,6 996.6 kg/hm²;当 XC 22 耗水量为 509.9,498.0,510.1 mm 时,对应根质量、地上部质量、产量分别为3 767.0,25 707.9,6 772.3 kg/hm²。

表 4 麦田耗水量、根系生理特性与干物质及产量的相关系数

项目	根系质量	地上部质量	产量
耗水量	0.57 *	0.47 *	0.77 **
BF	0.54 *	0.97 **	0.88 **
<i>Lpr</i>	0.65 **	0.96 **	0.96 **
RV	0.43	0.86 **	0.71 **
SP	0.42	0.94 **	0.75 **
MDA	-0.67 **	-0.61 **	-0.84 **
SOD	-0.39	0.20	-0.14
POD	-0.87 **	-0.59 **	-0.75 **
CAT	0.50 *	0.97 **	0.89 **

注:BF 为伤流液;RV 为根系活力;SP 为可溶性蛋白;*Lpr* 为根系水力学导度;MDA 为丙二醛;SOD 为超氧化物歧化酶;POD 为过氧化物酶;CAT 为过氧化氢酶。

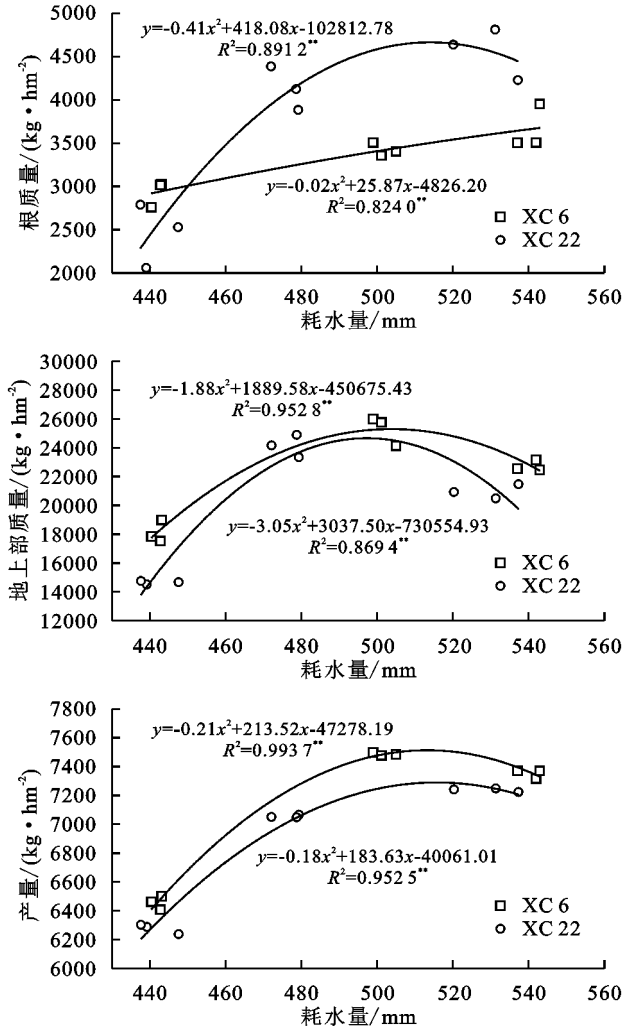


图 12 生育期间耗水量与干物质、产量的曲线关系

3 讨论

3.1 开花期水分调控对生育期间耗水特征的影响

开花期是小麦需水最敏感的时期,此时正值高

温,耗水强度大,需要充足的水分维持小麦灌浆^[20],且耗水量随水分胁迫程度的增强而降低^[21]。本研究认为,正常水分处理(CK)下抽穗—开花期耗水量占总耗水量的 1/4 左右,日耗水量达到 7.0 mm/d 左右,开花期水分胁迫程度增强,耗水量及耗水强度显著降低,且灌浆—成熟期耗水量、耗水模系数存在显著差异,这与刘佳等^[22]研究结果一致。耐旱性不同的品种对水分亏缺的响应有一定差异^[23-24]。前人^[25-26]研究表明,高产、高水分利用效率品种耗水量均高于低耗水型品种。在轻度和中度水分胁迫下,XC 6 和 XC 22 在 T1、T2 处理下比 CK 分别节水 7.2%,10.0% 和 18.2%,16.7%,抗旱性强品种较抗旱性弱品种总耗水量高出 0.1%~5.2%。根质量、地上部质量和产量与耗水量呈显著正相关。水分处理和品种互作对生育期间总耗水量、分蘖期和抽穗—开花期耗水模系数影响显著,对抽穗—开花期、灌浆—成熟期及生育期间耗水强度影响显著,说明抗旱性强品种在小麦关键生育期进行轻度水分调控可以达到节水且不减产的目的。

3.2 开花期水分调控对根系生理活性的影响

干旱条件下,作物通过增强根系生理活性,提升生物活性物质在根系中的合成进程,从而避免、耐受、适应干旱逆境^[27]。根系 *Lpr* 和伤流液是表征水分亏缺程度和根系活力强弱的重要指标^[28]。本研究,开花期轻度干旱后复水,*Lpr* 和伤流液显著高于 CK,表现出生理补偿效应,这与柏彦超等^[29]研究结果一致。植株体内抗氧化系统的平衡变化是逆境胁迫的直接生理表现,当植株体内抗氧化酶活性过低时,易引起膜脂过氧化^[30]。本研究发现,开花期轻度水分胁迫初期,MDA 先打破根系内物质平衡,引起 SP 含量和抗氧化酶活性增强,轻度水分胁迫后复水,抗氧化酶活性高于 CK,而 MDA 含量却低于 CK,这可能是轻度水分胁迫后复水根系产生生理补偿效应,闫振华等^[31]研究也证明这一点。中度干旱处理下抗氧化酶活性和 SP 含量显著低于 CK,主要是由于随着干旱程度加强,过氧化物增加速度远高于抗氧化酶的清除速度和 SP 的调节能力失去平衡,造成 SP 含量和抗氧化酶活性降低。随土层深度增加,SOD、POD 和 CAT 活性逐渐降低,说明浅层及中层根系在小麦生长发育中发挥主要作用,而深层根系发挥辅助作用。XC 6 抗氧化酶活性和 SP 含量优于 XC 22,MDA 含量相对较少,说明 XC 6 在逆境条件下清除自由基降低膜脂过氧化水平能力高^[32],具有较强的耐旱性。相关分析表明,BF、*Lpr*、MDA 和 CAT 活性与根质量、地上部质量和产量呈显著正相关,说明抗旱性强品种在小麦关键生育期进行轻度干旱,可增强根系的生理功能,有利于提高根系向地上部分的运

输能力, 进而提高产量。

3.3 开花期水分调控对产量和水分利用效率的影响

良好的根系生理活性有利于植株冠层发育和产量形成, 适度干旱可优化小麦籽粒灌浆过程, 增加穗粒数和千粒重, 实现高产^[33-34]。本研究中, 开花期轻度水分胁迫后复水, 穗数、穗粒数均能恢复至对照水平, 表现出明显的补偿效应, 而中度干旱引起穗数、穗粒数、千粒重不可逆损伤, 分别较 CK 降低 0.8% 和 1.9%, 17.9% 和 16.7%, 12.7% 和 17.1%, 说明补偿效应与胁迫程度有关, 且胁迫时间越长, 补偿效应降低, 甚至产生伤害效应^[7]。XC 6 轻度处理下穗粒数与对照无显著差异, 而穗数、千粒重和产量显著高于对照, 表现为超补偿效应, 主要是轻度干旱后复水, 有利于灌浆期同化物质向籽粒转运。XC 22 轻度和中度处理穗数和穗粒数较对照无显著差异, 说明穗数和穗粒数复水补偿效应最明显, 而千粒重恢复能力弱。小麦生育期间适宜的田间持水量可显著提高产量和水分利用效率^[35]。Panda 等^[36]研究表明, 冬小麦开花期保持 65% 田间持水量, 产量达到 9 000 kg/hm², 水分利用效率提高 11.5%。本研究中, 产量与耗水量呈二次抛物线, 当耗水量 501.6~529.6 mm, 产量可达 7 236.6~7 487.6 kg/hm²。与对照相比, XC 6 在 T1 处理产量显著提高 1.8%, 表现为产量补偿效应, 水分利用效率增加 16.2%, 而 XC 22 产量则降低 2.5%, 水分利用效率仅增加 10.8%, 水分处理和品种互作对千粒重和产量有显著影响, 说明抗旱性强的品种在轻度干旱后复水, 可促进千粒重增加, 进而提高产量, 达到稳产高产的目的。

4 结论

开花期轻度水分胁迫后复水导致根系活性、渗透调节物质、抗氧化酶活性以及水分利用效率显著增加, 生育期间耗水量降低, 最终增加地上部质量。产量与根系生理参数(BF、*Lpr*、MDA、CAT)呈显著正相关。与“新春 22 号”相比, 抗旱性品种“新春 6 号”在适度干旱下通过保持较高的根系活性, 有利于产量的形成, 是其具有较高耐旱性的生理机制。

参考文献:

[1] 韩一军, 韩亭辉. “十四五”时期我国小麦增产潜力分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2021(7): 38-46.

[2] 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球 1.5 °C 变暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.

[3] Cairns J E, Crossa J, Zaidi P H, et al. Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize[J]. Crop Science, 2013, 53(4): 1335-1346.

[4] Farshad N, Soodabeh J, Mehdi G, et al. Studying the

physiological and yield responses of sunflower inbred lines to full and limited irrigation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(7): 1605-1611.

[5] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523-526.

[6] 程裕伟, 马富裕, 冯治磊, 等. 滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 112-117.

[7] 王利彬, 祖伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 150-156.

[8] 李盛有, 董丽杰, 王雅珍, 等. 不同土壤水分下大豆根冠互作对产量和农艺性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 251-256, 268.

[9] Barnabás B, Jäger K, Fehér A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals[J]. Plant Cell and Environment, 2010, 31(1): 11-38.

[10] 张秀, 朱文美, 董述鑫, 等. 灌水量与密度互作对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 163-174.

[11] 张军, 李晓萍, 陈新宏, 等. 长期土壤干旱下扬花期冬小麦部分生理生化反应及抗旱性分析[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(6): 765-773.

[12] 罗宏海, 张宏芝, 张亚黎, 等. 干旱区膜下滴灌条件下土壤深层水对棉花根系生长、分布及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 395-402.

[13] 牛静. 花铃期干旱胁迫复水后棉花根系的补偿机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[14] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85: 211-218.

[15] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55: 203-216.

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[17] Miyamoto N, Steudle E, Hirasawa T, et al. Hydraulic conductivity of adventitious roots of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Japanese Journal of Crop Science, 2001, 70(1): 198-199.

[18] 樊勇明, 李伟, 温仲明, 等. 黄土区不同恢复年限草地群落生物量及根冠比对氮添加的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 1-12.

[19] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1982-1990.

[20] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 512-516.

[21] 王泽义, 张恒嘉, 王玉才, 等. 板蓝根耗水特性和其产量及品质对膜下滴灌调亏的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 318-325.

- [22] 刘佳,袁宏伟,杨继伟.不同气候条件下不同生育期干旱胁迫对冬小麦耗水量和水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2020(12):22-27,31.
- [23] 刘为健,杨文稼,王盈盈,等.2 个小麦品种水分利用效率的差异及其与深层水分利用的关系[J].水土保持学报,2020,34(3):245-251,258.
- [24] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.
- [25] 黄超,刘战东,赵犇,等.不同产量水平下冬小麦生长发育和耗水特性研究[J].灌溉排水学报,2019,38(10):10-16.
- [26] 闫学梅,于振文,张永丽,等.不同小麦品种耗水特性和籽粒产量的差异[J].应用生态学报,2011,22(3):694-700.
- [27] Rejeth R, Manikanta C L N, Beena R, et al. Water stress mediated root trait dynamics and identification of microsatellite markers associated with root traits in rice (*Oryza sativa* L.)[J].Physiology and Molecular Biology of Plants,2020,26(6):1225-1236.
- [28] 张芸香,王林,田吉,等.盐碱胁迫对文冠果幼苗水力学特征和碳素分配的影响[J].水土保持学报,2019,3(6):299-304.
- [29] 柏彦超,钱晓晴,沈淮东,等.不同水、氮条件对水稻苗生长及伤流液的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):76-81.
- [30] Luo H H, Tao X P, Hu Y Y, et al. Response of cotton root growth and yield to root restriction under various water and nitrogen regimes[J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2015,178(3):384-392.
- [31] 闫振华,刘东尧,贾绪存,等.花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响[J].中国农业科学,2021,54(17):3592-3608.
- [32] Alhoshan M, Ramin A A, Zahedi M, et al. Effects of water deficit on shoot, root and some physiological characteristics in some greenhouse grown potato cultivars[J].Journal of Crop Science and Biotechnology,2020,23:433-444.
- [33] 王美,赵广才,石书兵,等.施氮及花后土壤相对含水量对黑粒小麦灌浆期氮素吸收转运及分配的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(7):864-873.
- [34] Wu B, Zhang H, Wang D. Timely supplemental irrigation changed nitrogen use of wheat by regulating root vertical distribution[J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2018,181(3):396-408.
- [35] 张胜全,方保停,王志敏,等.春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J].生态学报,2009,29(4):2035-2044.
- [36] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed-conditions[J].Agricultural Water Management,2003,63(1):37-56.
- (上接第 252 页)
- [17] Wang G A, Han J M, Liu D S. The carbon isotope composition of C_3 herbaceous plants in loess area of northern China[J].Science In China (Earth Sciences),2003,46(10):1069-1076.
- [18] 曲桂敏,束怀瑞,王鸿霞.钾对苹果树水分利用效率及有关参数的影响[J].土壤学报,2000,37(2):257-262.
- [19] 曲桂敏,王鸿霞,束怀瑞.氮对苹果幼树水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2000,11(2):199-201.
- [20] 孙霞,柴仲平,蒋平安.不同氮磷钾肥配比对南疆红富士苹果光合特性的影响[J].西南农业学报,2012,25(4):1352-1357.
- [21] 接玉玲,张伟,杨洪强,等.有机物对苹果叶片脯氨酸和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2008,24(5):20-24.
- [22] 何方,胡芳名.经济林栽培学[M].2 版.北京:中国林业出版社,2004:242-253.
- [23] 叶苗泰.黄土高原林冠修剪对山地苹果耗水与生产的调控及模拟[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [24] Zheng S X, Shang Guan Z P. Spatial patterns of foliar stable carbon isotope compositions of C_3 plant species in the Loess Plateau of China[J].Ecological Research,2007,22(2):342-353.
- [25] Ma J Y, Chen T, Qiang W Y, et al. Correlations between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors in desert plant *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim[J].Journal of Integrative Plant Biology,2005,47(9):1065-1073.
- [26] Gulias J, Seddaiu G, Cifre J, et al. Leaf and plant water use efficiency in cocksfoot and tall fescue accessions under differing soil water availability[J].Crop Physiology,2012,52(5):2321-2331.
- [27] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, et al. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques[J].Global Change Biology,2010,12(2):294-310.
- [28] Loader N J, Switsur V R, Field E M. High-resolution stable isotope analysis of tree rings: Implications of 'microdendroclimatology' for palaeoenvironmental research[J].Holocene,1995,5(4):457-460.
- [29] Nicotra A B, Cosgrove M J, Cowling A, et al. Leaf shape linked to photosynthetic rates and temperature optima in South African Pelargonium species[J].Oecologia,2008,154(4):625-635.