

史田斌, 刘 震, 李志涛, 等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2024, 40( 2 ): 193-202.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.02.001

# 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响

史田斌<sup>1</sup>, 刘 震<sup>1</sup>, 李志涛<sup>1</sup>, 陈丽敏<sup>1</sup>, 朱金勇<sup>1</sup>, 李泓阳<sup>1</sup>, 王玮璐<sup>1</sup>, 齐喆颖<sup>1</sup>,  
张俊莲<sup>2</sup>, 李亚杰<sup>3</sup>, 刘玉汇<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院/省部共建干旱生境作物学国家重点实验室/甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 743000)

**摘要:** 为了探究马铃薯对不同生育期干旱胁迫的响应, 明确马铃薯各生育期的需水特性, 本研究以马铃薯栽培品种华颂7号为试验材料, 在大田遮雨棚下对马铃薯各生育期进行干旱胁迫处理, 研究不同生育期干旱胁迫对马铃薯植株生长、干物质积累、块茎产量及水分利用效率的影响。结果表明, 幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )后恢复灌水, 相较于对照, 成熟期马铃薯株高、根长、干物质积累量和水分利用效率显著提高。在产量和产量构成方面, 幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水, 大薯率较对照显著提高 11.00 个百分点、小薯率较对照显著降低 10.34 个百分点, 块茎产量较对照显著增加 31.34%。块茎形成期和块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_2$ 、 $T_3$ )的块茎产量较 CK 显著下降 58.41% 和 27.84%,  $T_2$  处理的大薯率较对照显著降低了 25.34 个百分点, 但  $T_3$  处理的大薯率、中薯率、小薯率与对照相比无显著差异。相较于对照, 淀粉积累期干旱胁迫处理( $T_4$ )对马铃薯单株干物质积累、块茎产量和产量构成影响不显著。因此, 可对华颂7号在幼苗期进行适当干旱胁迫以提高块茎产量和水分利用效率, 而在块茎形成期和块茎膨大期应保持充足的水分供应以确保块茎产量的形成, 从而达到高产高效的目的。

**关键词:** 马铃薯; 干旱胁迫; 生长特性; 块茎产量; 水分利用效率

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)02-0193-10

## Effects of drought stress treatments on potato growth characteristics, tuber yield and water use efficiency at different growth stages

SHI Tian-bin<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, LI Zhi-tao<sup>1</sup>, CHEN Li-min<sup>1</sup>, ZHU Jin-yong<sup>1</sup>, LI Hong-yang<sup>1</sup>,  
WANG Wei-lu<sup>1</sup>, QI Zhe-ying<sup>1</sup>, ZHANG Jun-lian<sup>2</sup>, LI Ya-jie<sup>3</sup>, LIU Yu-hui<sup>1</sup>

(1. Agronomy College, Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science/Gansu Provincial Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, China; 2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi 743000, China)

收稿日期: 2022-12-01

**基金项目:** 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P14); 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室(甘肃农业大学)开放基金项目(GSCS-2021-Z02); 甘肃农业大学“伏羲人才”计划项目(Gaufx-02Y04); 甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2020-11)

**作者简介:** 史田斌(1998-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事马铃薯栽培生理研究。(E-mail) 2916204775@qq.com

**通讯作者:** 刘玉汇, (E-mail) lyhui@gsau.edu.cn

**Abstract:** In order to explore the response of potato to drought stress at different growth periods and clarify the water demand characteristics of potato at each growth stage, this study used the potato cultivar Huasong 7 as the test material to carry out drought stress treatments at each growth stage of potato under the field canopy. The effects of drought stress on plant growth, dry matter accumulation, tuber yield and water use efficiency at different growth sta-

ges were studied. The results showed that the plant height, root length, dry matter accumulation and water use efficiency of potato at the mature stage were significantly increased under drought stress treatment at seedling stage ( $T_1$ ). In terms of yield and yield components compared with control, the rate of big tuber under  $T_1$  treatment was significantly increased by 11.00 percentage points, the rate of small tuber was significantly decreased by 10.34 percentage points, and the yield of tuber was significantly increased by 31.34%. Tuber yield under drought stress treatments at tuber formation stage ( $T_2$ ) and tuber expansion stage ( $T_3$ ) was significantly decreased by 58.41% and 27.84% compared with control. The rate of large tuber under  $T_2$  treatment was significantly decreased by 25.34 percentage points compared with control, but there was no significant difference in the rates of large tuber, medium tuber and small tuber between  $T_3$  and control. Drought stress treatment at starch accumulation stage ( $T_4$ ) had no significant effect on dry matter accumulation per plant, tuber yield and yield components compared with control. Therefore, appropriate drought stress treatment can be applied to Huasong 7 at seedling stage to improve tuber yield and water use efficiency, while in the period of tuber formation and tuber expansion, sufficient water supply should be maintained to ensure the formation of tuber yield, so as to achieve high yield and high efficiency.

**Key words:** potato; drought stress; growth characteristics; tuber yield; water use efficiency

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)因其营养价值丰富,适应能力强,已在全世界 150 多个国家和地区种植,是仅次于玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)和小麦(*Triticum aestivum* L.)的第四大粮食作物<sup>[1-2]</sup>。2015 年中国提出了马铃薯主粮化战略<sup>[3]</sup>,形成了众多绿色新兴和特色优势马铃薯产业<sup>[4]</sup>。目前,马铃薯已成为确保中国粮食安全、促进居民膳食结构转型升级的主要粮食作物之一。

随着全球生态环境的恶化、可利用的淡水资源和人均耕地面积的减少,如何提高粮食产量和水分利用效率、实现农业可持续发展成为当前科学研究的热点问题之一<sup>[5-6]</sup>。其中,淡水资源短缺严重制约了现代农业的发展,更是限制了中国农业的发展。中国干旱半干旱地区面积占国土总面积的 47%,干旱半干旱地区耕地面积占全国总耕地面积的 51%<sup>[7]</sup>,干旱造成的作物减产超过了其他逆境造成的作物减产的总和<sup>[8-10]</sup>。在中国甘肃等西北干旱半干旱地区,降雨时空分布不均、水资源短缺是限制该地区马铃薯产业发展的主要原因。

在马铃薯水分需求特性方面,前人已开展了大量研究。已有研究表明,干旱胁迫会直接造成植株萎焉,抑制其株高、茎叶、根系的生长发育,还会造成马铃薯单株结薯数、单株产量及生物量大幅度降低<sup>[11]</sup>。前人在室内盆栽<sup>[12-15]</sup>或露天栽培<sup>[16-22]</sup>下,开展了大量干旱胁迫对马铃薯植株生长及产量影响的相关研究。研究表明,马铃薯幼苗期干旱胁迫后复水可提高成薯率,原因是幼苗期干旱胁迫减少了匍匐茎数量,降低了串薯比例,从而提高了块茎成薯率<sup>[14]</sup>;也有研究表明,马铃薯块茎形成期之前受到干旱胁迫会降低

马铃薯单株结薯数;块茎形成期之后遭受干旱胁迫,块茎膨大受阻,块茎占全株干物质比例降低,导致产量降低<sup>[19]</sup>。抗艳红等<sup>[14]</sup>认为,在马铃薯块茎形成期干旱胁迫处理单株结薯数、匍匐茎数、成薯率最低;块茎膨大期干旱胁迫处理可以增加匍匐茎和单株结薯数,提高大薯率、降低小薯率。但张万恒<sup>[21]</sup>发现,块茎膨大期进行干旱胁迫有利于提高马铃薯大薯率,而随着胁迫程度的加大,大薯率下降幅度明显。同时刘素军<sup>[15]</sup>发现,块茎膨大期干旱胁迫会降低单块茎质量和大薯率,从而导致减产。薛道信等<sup>[22]</sup>则认为,薯块形成期、淀粉积累期轻度亏水可达到节水和增产的双重目的。上述研究由于种植条件、种植模式、灌溉方式、品种类型的不同,其结果也不尽相同,且盆栽试验结果对实际生产指导意义不足,而露天大田试验结果容易受到自然降雨的影响。马铃薯品种华颂 7 号是一个在西北地区广泛种植的高产鲜食优良品种,对其需水特性的研究尚未见报道。因此,本试验在大田防雨棚条件下,以华颂 7 号为试验材料,探究不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响,明确马铃薯需水关键期和水分临界期,为进一步优化西北地区马铃薯灌溉制度,促进马铃薯产业的绿色可持续发展提供理论依据。

## 1 材料方法

### 1.1 试验地概况

本试验在甘肃省定西市农业科学研究院试验基地进行。该试验基地位于东经 104°50′,北纬 35°42′,平均海拔高度 1 900 m,属于典型的温带大陆性干旱半干旱气候,气温年较差为 6.3℃,年平均日照

时数2 500.1 h,全年无霜期 141 d,近 3 年年平均降雨量 380 mm,降雨主要集中在 5 月至 9 月,年蒸发量 1 526 mm,为典型的半干旱雨养农业区。土壤为黄绵土,土壤容重  $1.31 \text{ g/cm}^3$ 。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
8.48	19.00	1.30	29.06	143.74

## 1.2 试验材料

供试材料为华颂 7 号原原种,由定西马铃薯研究所提供,大小均匀一致(10 g),无病虫害等。

## 1.3 试验设计

本试验在大田防雨棚内进行,于 2021 年 5 月 4 日播种,9 月 16 日收获。在马铃薯出苗后 7 d(播种后 40 d)开始进行水分处理,收获前 15 d 停止灌水。对马铃薯不同生育时期进行干旱胁迫,分为 5 个处理,播种后 41~60 d(幼苗期)不灌水处理为  $T_1$ ,播种后 61~80 d(块茎形成期)不灌水处理为  $T_2$ ,播种后 81~100 d(块茎膨大期)不灌水处理为  $T_3$ ,播种后 101~120 d(淀粉积累期)不灌水处理为  $T_4$ ,以全生育期均匀灌水处理为 CK,试验设计如表 2 所示。为确保出苗整齐,在芽条期灌水 2 次,每次灌水 20 mm,共 40 mm。试验期间如需灌水,灌水间隔为 5 d, $T_1$ ~ $T_4$ 全生育期灌水 355 mm,CK 全生育期灌水 460 mm。本试验为单因素随机区组设计,设 4 个重复,共 20 个小区,每个小区面积为  $10.5 \text{ m}^2$  ( $3.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ )。试验采用起垄覆膜与膜下滴灌相结合的栽培方式,单垄单行种植,种植方式如图 1 所示。

表 2 不同试验处理的灌溉量

Table 2 Irrigation amount of different experimental treatments

处理	灌溉量(mm)				
	芽条生长期	幼苗期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期
CK	40	105	105	105	105
$T_1$	40	0	105	105	105
$T_2$	40	105	0	105	105
$T_3$	40	105	105	0	105
$T_4$	40	105	105	105	0

CK:对照,全生育期均匀灌水; $T_1$ :播种后 41~60 d(幼苗期)不灌水; $T_2$ :播种后 61~80 d(块茎形成期)不灌水; $T_3$ :播种后 81~100 d(块茎膨大期)不灌水; $T_4$ :播种后 101~120 d(淀粉积累期)不灌水。

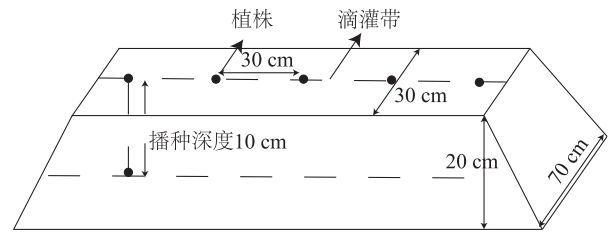


图 1 供试马铃薯栽培和种植方式

Fig.1 Cultivation and planting methods of potatoes

灌水时间由以色列耐特菲姆公司生产的滴灌控制系统(CMT)和各小区的电磁阀控制,每个小区为 1 个滴灌支管控制单位。灌水时间由下式确定:

$$H = (M \times S) / (d \times n);$$

式中: $H$ 为灌水时间(h); $M$ 为灌水量(mm); $S$ 为小区面积( $\text{m}^2$ ); $d$ 为滴头流量( $1.60 \text{ L/h}$ ), $n$ 为每个小区的滴头个数(50 个)。

播种前试验地均匀撒施尿素  $107.18 \text{ kg/hm}^2$ 、磷酸二铵  $326.09 \text{ kg/hm}^2$ 、硫酸钾镁  $562.50 \text{ kg/hm}^2$  作为基底肥,并追施尿素和硫酸钾各 3 次,尿素每次  $52.17 \text{ kg/hm}^2$ ,硫酸钾每次  $57.69 \text{ kg/hm}^2$ ,出苗后第 14 d、28 d、42 d 追施尿素,第 21 d、35 d、49 d 追施硫酸钾。

## 1.4 主要测定项目与方法

1.4.1 生长指标的测定 株高(cm):在各生育期,每个小区固定选择 3 株,用直尺测量茎基部到生长点的距离,求其均值。茎粗(mm):在各生育期,每个小区固定选择 3 株,用游标卡尺测量茎基部最粗处的纵横两向直径的平均值,求其均值。单株干物质积累量(g):每个小区选取可以代表整个小区的马铃薯植株 3 株,将植株的茎、叶、根系、薯块分开,洗净并用滤纸吸干,放入  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中杀青 30 min,然后在  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒质量并称质量。根长(cm):每个小区选取 3 株,使用 Win RHIZO 系统对各处理的根系分别进行扫描和形态指标的分析,求其均值。

1.4.2 水分利用效率 播种时土壤贮水量与收获时土壤贮水量之差( $\Delta W$ ):

$$\Delta W = SH \times SBD \times \Delta SW;$$

作物耗水量( $E_{ta}$ ):

$$E_{ta} = EP + I - \Delta W;$$

作物水分利用效率( $WUE$ ):

$$WUE = \frac{Y_a}{E_{ta}};$$

作物灌溉水利用效率( $IWUE$ ):

$$IWUE = \frac{Ya}{I};$$

式中: $SH$  为土层厚度(mm); $SBD$  为土壤容重( $g/cm^3$ ); $\Delta SW$  为播种与收获时土壤含水量之差。 $EP$  为降水量(mm); $I$  为试验期间的灌水量(mm);本试验在防雨棚下进行,故  $EP$  值为 0。 $Ya$  为  $1\text{ hm}^2$  的经济产量( $kg/hm^2$ )。

1.4.3 块茎产量的测定 产量:每个小区随机选取 15 株测产,测定单株结薯数(个)、单株总块茎质量(g),求平均值。根据小区面积换算  $1\text{ hm}^2$  的经济产量。

### 1.5 统计与分析

使用 Excel 2016 进行数据的统计,SPSS 22.0 进行单因素方差分析,显著性分析使用 Duncan's 法( $P<0.05$ ),使用 Origin 2021 作图。

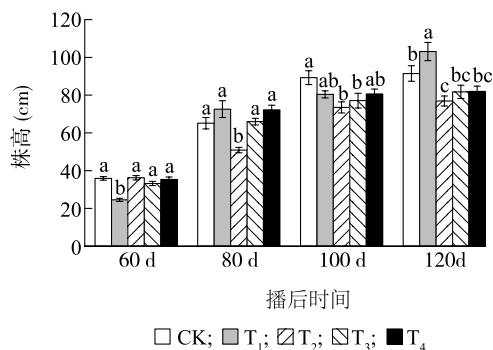
## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯株高的影响

由图 2 可以看出,分别在幼苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期进行干旱胁迫处理,在各时期结束后(播后 60 d、80 d、100 d 和 120 d)测定株高, $T_1$  处理的马铃薯株高在播后 60 d 时显著低于 CK, $T_2$  处理的马铃薯株高在播后 80 d 时显著低于 CK, $T_3$  处理的马铃薯株高在播后 100 d 时显著低于 CK, $T_1 \sim T_3$  各处理在干旱胁迫处理后的株高均显著均低于对应时期的 CK。相较于 CK, $T_1 \sim T_3$  处理的马铃薯株高下降幅度为 13.64%~31.67%。而在淀粉积累期进行干旱胁迫处理( $T_4$ ),其株高与 CK 无显著差异。在各生育期干旱胁迫结束后恢复灌水,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )的植株迅速生长,播后 80 d 时其株高与 CK 无显著差异,播后 120 d 时其株高显著高于对照 12.80%;块茎形成期干旱胁迫处理( $T_2$ )的植株则生长缓慢,恢复灌水后,在播后 100 d 和 120 d 时,其株高仍分别显著低于 CK 17.65%和 15.87%;块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_3$ )的植株,恢复灌水后,在播后 120 d 时其株高也与 CK 无显著差异。

试验结果说明,相较 CK,幼苗期干旱胁迫处理显著抑制了马铃薯株高的增长,但随着后期恢复灌水,马铃薯株高迅速增长,且显著高于 CK。而相较

CK,在块茎形成期干旱胁迫处理会显著抑制马铃薯株高的增长,即使后期恢复灌水这种抑制作用仍然无法消除。块茎膨大期和淀粉积累期干旱胁迫处理对马铃薯株高的影响较小,株高与 CK 相比无显著差异。



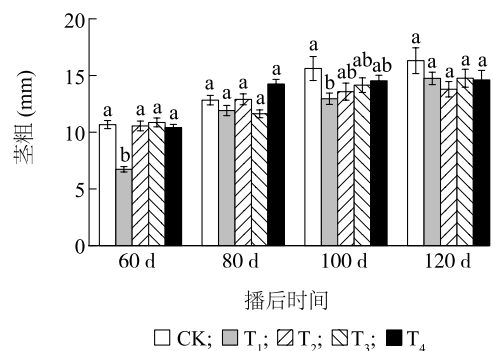
CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 见表 2 注。同一播后时间不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 2 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯株高的影响

Fig.2 Effects of different drought stress treatments on potato plant height at different growth stages

### 2.2 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯各生育期茎粗的影响

由图 3 可以看出,播后 60 d,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )的马铃薯茎粗较 CK 显著下降了 36.93%;恢复灌水后, $T_1$ 处理的植株茎粗快速增长,至播后 120 d, $T_1$ 处理茎粗与 CK 相比仅减少了 1.56 mm,且无显著差异。块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期干旱胁迫处理( $T_2 \sim T_4$ )对马铃薯植株茎粗影响较小,其植株茎粗与 CK 相比均无显著差异。



CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 见表 2 注。同一播后时间不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 3 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯茎粗的影响

Fig.3 Effects of different drought stress treatments on potato stem diameter at different growth stages



综上所述,尽管相较 CK 幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )对马铃薯植株茎粗有显著抑制作用,但恢复灌水后这种抑制作用逐渐减小。播后 120 d,各处理的茎粗与 CK 相比均无显著差异,说明各生育期干旱胁迫对马铃薯植株茎粗的影响不大。

### 2.3 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯根系长度的影响

由表 3 可以看出,在各处理结束后(播后 60 d, 80 d, 100 d 和 120 d)测定根系长度, $T_1 \sim T_4$ 干旱胁迫处理的马铃薯根系长度均显著低于 CK,相较于 CK,  $T_1 \sim T_4$ 处理的根系长度下降幅度为 8.93%~53.08%,其中幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )的根系长度下降幅度最大。在各生育期干旱胁迫结束后恢复灌水,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )的植株根系开始迅速生长,到播后 120 d 时,其根长显著高于 CK

22.99%;而  $T_2$  和  $T_3$  处理的根系生长缓慢,播后 120 d 时根系长度分别为 839.92 cm 和 985.93 cm,仍显著低于 CK 33.65%和 22.12%。

整体来看,相较 CK,各生育期干旱胁迫处理均会显著降低马铃薯植株根系长度,其中幼苗期干旱胁迫处理对根系生长的抑制作用最大,其次是块茎形成期干旱胁迫处理,块茎膨大期和淀粉积累期干旱胁迫处理对植株根系长度的影响相对较小。值得注意的是,虽然幼苗期干旱胁迫处理后植株根系长度降幅最大,但恢复灌水后根系迅速生长,至播后 120 d 补偿效应显著;而块茎形成期和块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_2$ 、 $T_3$ ),即使后期恢复灌水,干旱胁迫对根系长度的抑制作用仍然无法消除,至播后 120 d,其根系长度分别较 CK 显著降低。

表 3 不同生育期干旱胁迫对马铃薯根系长度的影响

Table 3 Effects of drought stress treatments on potato root length at different growth stages

处理	根系长度(cm)			
	播后 60 d	播后 80 d	播后 100 d	播后 120 d
CK	495.63±1.71a	794.14±4.04a	1 094.26±22.03a	1 265.94±7.99b
$T_1$	232.54±0.97b	504.10±9.59c	1 003.45±12.12b	1 556.95±11.00a
$T_2$	495.63±1.71a	577.68±0.89b	742.93±9.32c	839.92±25.66e
$T_3$	495.63±1.71a	794.14±4.04a	950.17±29.79b	985.93±17.36d
$T_4$	495.63±1.71a	794.14±4.04a	1 094.26±22.03a	1 152.86±38.43c

CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 见表 2 注。同一列数字后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.4 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯单株干物质积累的影响

由表 4 可以看出,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ ),结束后整株干物质积累量(播后 60 d),仅为 7.98 g,较 CK 显著降低 79.36%,而  $T_2 \sim T_4$ 干旱胁迫处理结束后整株干物质积累量与 CK 无显著差异。各个生育期干旱胁迫处理结束后恢复灌水, $T_1$ 处理的植株干物质积累量在播后 80~120 d 时仍显著低于 CK,但在收获期(播后 120~135 d)时加速积累,在播后 135 d 时干物质积累量达到 263.47 g,显著高于 CK 15.90%,而  $T_2$  和  $T_3$  处理的植株干物质积累缓慢,播后 135 d 时干物质积累量均显著低于 CK。其中  $T_2$  处理的干物质积累量最低,为 149.34 g,显著低于 CK 34.27%。 $T_4$ 处理的植株干物质积累量在全生育期与 CK 均无显著差异。

综上所述,相较 CK,虽然幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )显著抑制了马铃薯整株干物质积累,但后期恢

复灌水能够促进干物质迅速积累,至收获期干物质积累量最大,补偿效应显著。而块茎形成期和块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_2$ 、 $T_3$ )对马铃薯干物质积累的抑制作用是不可逆的,即使后期恢复灌水这种抑制作用仍无法消除。至收获期, $T_2$  和  $T_3$  处理的干物质积累量仍显著低于 CK,其中块茎形成期干旱胁迫处理( $T_2$ )对干物质积累的抑制作用最大;淀粉积累期干旱胁迫处理( $T_4$ )对马铃薯整株干物质积累量影响较小,与 CK 相比无显著差异。

### 2.5 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯干物质积累动态的影响

单株干物质快速积累持续时间( $\Delta t$ )与干物质快速积累期间平均积累速率( $V_{\text{mean}}$ )共同决定了植株干物质的积累量。由表 5 可以看出, $\Delta t$  由大到小依次为  $T_2>T_1>CK>T_3>T_4$ ,  $V_{\text{mean}}$  由大到小依次为  $T_1>T_4>CK>T_3>T_2$ 。 $T_1$ 处理的干物质积累最大速率出现在播后 112 d,虽然较 CK 推迟了 17 d,但快速积累

持续时间与 CK 基本一致,而  $V_{\max}$ 、 $V_{\text{mean}}$  分别较 CK 增加了 1.81 g/d、1.58 g/d,1 株。 $T_2$  处理的干物质积累最大速率出现在播后 109.51 d,较 CK 迟了 13.91 d,且  $V_{\max}$ 、 $V_{\text{mean}}$  分别较 CK 降低了 1.63 g/d、1.43 g/d,1 株,但  $\Delta t$  较 CK 延长了 36.63 d。 $T_3$  处理在播后 85.12 d 出现干物质积累最大速率,较 CK

提前了 10.48 d,但  $V_{\max}$ 、 $V_{\text{mean}}$  较 CK 分别降低了 0.25 g/d、0.22 g/d,1 株,且  $\Delta t$  较 CK 缩短 5.08 d。 $T_4$  处理的物质积累最大速率出现在播后 84.89 d,较 CK 提前了 10.71 d,其  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$  较 CK 增长了 0.36 g/d、0.31 g/d,1 株,但  $\Delta t$  较 CK 缩短了 9.35 d。

表 4 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯干物质积累的影响

Table 4 Effects of drought stress treatments on potato dry matter accumulation at different growth stages

处理	单株干物质积累量(g)				
	播后 60 d	播后 80 d	播后 100 d	播后 120 d	播后 135 d
CK	38.67±2.89a	90.11±9.53a	152.52±4.33a	201.05±2.11a	227.21±7.88b
$T_1$	7.98±1.24b	61.81±4.17b	115.33±1.34b	186.91±2.68b	263.47±6.62a
$T_2$	38.67±2.89a	73.44±3.06ab	93.44±2.92c	129.60±2.75d	149.34±3.19d
$T_3$	38.67±2.89a	90.11±9.53a	147.81±2.64a	165.69±2.66c	204.02±8.05c
$T_4$	38.67±2.89a	90.11±9.53a	152.52±4.33a	204.54±1.32a	212.51±6.64bc

CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 见表 2 注。同一列数字后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

表 5 不同生育期干旱胁迫处理的马铃薯干物质积累拟合 Logistic 方程及参数

Table 5 Logistic equations and parameters of dry matter accumulation of potatoes under drought stress treatments at different growth stages

处理	Logistic 方程	$T_a$ (d)	$T_b$ (d)	$T_c$ (d)	$\Delta t$ (d)	$V_{\max}$ (g/d, 1 株)	$V_{\text{mean}}$ (g/d, 1 株)	$R^2$
CK	$Y=248.69/[1+\exp(4.78-0.05x)]$	95.60	69.26	121.94	52.68	3.11	2.73	0.999 5
$T_1$	$Y=399.27/[1+\exp(5.51-0.05x)]$	112.06	85.33	138.80	53.47	4.92	4.31	0.990 3
$T_2$	$Y=201.02/[1+\exp(3.23-0.03x)]$	109.51	64.86	154.17	89.31	1.48	1.30	0.990 8
$T_3$	$Y=206.76/[1+\exp(4.71-0.06x)]$	85.12	61.32	108.92	47.60	2.86	2.51	0.978 1
$T_4$	$Y=228.44/[1+\exp(5.16-0.06x)]$	84.89	63.22	106.56	43.33	3.47	3.04	0.998 1

CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 见表 2 注。 $Y$ :马铃薯整株的干物质积累量; $T_a$ :全生育期内干物质积累最大速率出现的时间; $T_b$ 和  $T_c$ : Logistic 生长曲线的 2 个拐点,分别为干物质快速积累期的起点和终点时间; $\Delta t$ :干物质快速积累期持续的时间; $V_{\max}$ :生育期内干物质积累最大速率; $V_{\text{mean}}$ :干物质快速积累期的干物质平均积累速率<sup>[23]</sup>。

结果说明,幼苗期干旱胁迫处理虽然推迟了干物质快速积累的起始时间,但并未影响干物质快速积累的持续时间( $\Delta t$ )。此外,幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水可提高  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$ ,从而促进全株干物质的积累。块茎形成期干旱胁迫处理明显降低了  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$ ,尽管  $\Delta t$  较 CK 延长了 35.84 d,但整株干物质积累量仍然最低。膨大期干旱胁迫处理会降低  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$ ,其  $\Delta t$  较 CK 缩短了 5.08 d,降低了整株干物质积累量。淀粉积累期干旱胁迫处理虽然  $\Delta t$  缩短,但  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$  均高于 CK,对整株干物质积累量影响较小。

## 2.6 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯各生育期产量的影响

由表 6 可以看出,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )产

量最高,较 CK 显著增加了 31.34%。其余各处理块茎产量较 CK 均有所下降,其中块茎形成期干旱胁迫处理( $T_2$ )的块茎产量降幅最大,较 CK 显著下降了 58.41%。块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_3$ )的块茎产量较 CK 显著下降了 27.84%。淀粉积累期干旱胁迫处理( $T_4$ )块茎产量与 CK 相比无显著差异。各处理单株产量和产量变化趋势一致,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )单株产量最高,块茎形成期干旱胁迫处理( $T_2$ )的单株产量最低。与 CK 相比,各生育期干旱胁迫处理单株结薯数均显著降低,其中  $T_2$  和  $T_3$  处理的单株结薯数较少,较 CK 分别减少了 3.26 个和 3.00 个。此外,幼苗期干旱胁迫处理( $T_1$ )可显著提高马铃薯块茎的大薯率并降低小薯率,大薯率较 CK 增长了 11.00%,小薯率较 CK 降低了 10.34%。相

较 CK,块茎形成期干旱胁迫处理(T<sub>2</sub>)则显著降低了块茎的大薯率,提高了小薯率和中薯率,大薯率较 CK 显著降低了 25.34%,中、小薯率较 CK 分别显著提高了 12.66%和 12.33%。块茎膨大期和淀粉积累期干旱胁迫处理(T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>)对块茎的大薯率、中薯率、小薯率影响较小,与 CK 相比均无显著差异。

总而言之,和 CK 相比,幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水可以显著提高马铃薯大薯率、降低小薯率,

从而显著提高块茎产量。相较 CK,块茎形成期干旱胁迫处理导致马铃薯单株结薯数显著减少,同时大薯率显著降低,马铃薯严重减产。块茎膨大期干旱胁迫处理的块茎大薯率、中薯率、小薯率与 CK 相比均无显著差异,但与 CK 相比单株结薯数显著减少。相较 CK,淀粉积累期干旱胁迫处理对马铃薯块茎产量和产量构成无显著影响。

表 6 不同生育期干旱胁迫处理对马铃薯产量的影响  
Table 6 Effects of drought stress treatments on potato yield at different growth stages

处理	单株结薯数 (个)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	单株产量 (g)	大薯率 (%)	中薯率 (%)	小薯率 (%)
CK	7.43±0.35a	31 757.21±2 060.93b	666.57±43.28b	51.67±4.06b	25.67±4.48b	22.67±2.96b
T <sub>1</sub>	6.53±0.19b	41 708.78±1 155.62a	875.84±24.27a	62.67±1.20a	25.00±2.31b	12.33±1.20c
T <sub>2</sub>	4.17±0.15c	13 207.42±645.26d	277.24±13.55d	26.33±2.33c	38.33±2.40a	35.00±0.58a
T <sub>3</sub>	4.43±0.09c	22 915.21±1 637.32c	481.00±34.38c	55.33±2.03b	26.00±3.21b	19.00±1.53bc
T <sub>4</sub>	6.00±0.23b	28 035.97±1 407.69b	588.46±29.56b	49.33±0.88b	30.33±3.33ab	20.33±3.28b

CK、T1、T2、T3、T4 见表 2 注。同一列数字后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.7 不同生育期干旱胁迫处理对水分利用效率的影响

由表 7 可以看出,不同生育期干旱胁迫处理的水分利用效率(WUE)由大到小依次为,T<sub>1</sub>>T<sub>4</sub>>T<sub>3</sub>>CK>T<sub>2</sub>。T<sub>1</sub>处理的水分利用效率(WUE)和灌溉水利用效率(IWUE)最高,分别为 138.63 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)和 118.49 kg/(mm·hm<sup>2</sup>),较 CK 分别显著提高了 82.89%和 70.15%。T<sub>2</sub>处理的 WUE 和 IWUE 最低,分别为 60.00 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)和 37.52 kg/(mm·hm<sup>2</sup>),其 WUE 与 CK 相比无显著差异,但其 IWUE 较 CK 显著降低了 46.12%。T<sub>3</sub>和 T<sub>4</sub>处理的 WUE 和 IWUE 较 CK 均无显著差异水平。通过马铃薯产量与 WUE 和 IWUE 相关性分析发现,WUE 和 IWUE 与产量均呈极

显著正相关关系,因此在有限的水分供应下,如何提高 WUE 和 IWUE 是确保马铃薯高产的关键。

试验结果表明,在马铃薯幼苗期适当减少灌水量,将有限的灌溉水合理分配在生长后期,可较 CK 显著提高 WUE 和 IWUE;T<sub>1</sub>处理的产量越高,其 IWUE 也越高,合理的灌水时期及灌水量可以有效促进其产量的形成,从而提高马铃薯 IWUE。而块茎形成期是马铃薯的生长发育水分临界期,该时期干旱胁迫会使马铃薯的 IWUE 较 CK 显著下降,块茎膨大期干旱胁迫也会使马铃薯的 IWUE 下降,但较 CK 没有显著差异。因此,在马铃薯块茎形成期和膨大期应尽量保持良好的水分供应。

表 7 不同生育期干旱胁迫处理对水分利用效率的影响  
Table 7 Effects of drought stress treatments on water use efficiency at different growth stages

处理	播前土壤贮水量 (mm)	灌水量 (mm)	收获后土壤贮水量 (mm)	耗水量 (mm)	水分利用效率 [kg/(mm·hm <sup>2</sup> )]	灌溉水利用效率 [kg/(mm·hm <sup>2</sup> )]
CK	372.37	456.00	409.41	418.96	75.80±5.42b	69.64±4.52bc
T <sub>1</sub>	368.04	352.00	419.19	300.85	138.63±17.61a	118.49±3.28a
T <sub>2</sub>	355.57	352.00	487.46	220.11	60.00±9.78b	37.52±1.83d
T <sub>3</sub>	373.59	352.00	440.09	285.50	80.26±5.66b	65.10±4.65c
T <sub>4</sub>	362.73	352.00	403.89	310.84	90.19±4.15b	79.65±4.00b

CK、T1、T2、T3、T4 见表 2 注。同一列数字后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。



### 3 讨论

干旱胁迫会导致马铃薯植株生长缓慢,根系伸展受到抑制<sup>[23-25]</sup>,最终造成块茎产量和收获指数下降。本研究结果表明,各生育期干旱胁迫处理均会不同程度影响马铃薯植株的正常生长,但幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水,马铃薯最终株高、根长和块茎产量均显著高于对照,补偿效应显著,这可能是由于幼苗期干旱胁迫处理提高了植株抗逆性,达到了“炼苗”的效果,另外在中后期植株生长最大需水时期获得充足的水分供应,使植株株高、根系迅速生长,从而块茎产量的补偿效应显著,这一结果与王晓雪等<sup>[26]</sup>在燕麦(*Avena sativa* L.)上和 Deblonde 等<sup>[27]</sup>在马铃薯上的研究结果一致。他们认为在植株生长早期遭受干旱胁迫,阶段性恢复灌水能使植株生长得到恢复或补偿。本试验结果还表明,相较于对照,块茎形成期干旱胁迫处理会显著抑制马铃薯株高和根长的增长,即使后期恢复灌水这种抑制作用仍然无法消除,最终影响产量的形成。这与张凤军等<sup>[28]</sup>和胡萌萌<sup>[29]</sup>在马铃薯上的研究结果一致,块茎形成期是马铃薯生长发育的水分临界期,对土壤水分亏缺非常敏感,此时水分供应不足将严重影响植株株高、根长和产量。

水分是影响作物干物质积累的最大因素之一<sup>[30-33]</sup>。有研究表明,不同生育期水分调亏均可引起马铃薯单株干物质积累量降低<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,不同生育期干旱胁迫处理的马铃薯单株干物质积累量均有不同程度的降低,但幼苗期干旱胁迫后恢复灌水,单株干物质迅速积累,至收获期整株干物质积累量显著高于对照,补偿效应显著。这可能是幼苗期干旱胁迫处理起到了增加植株抗逆性的积极作用,加上复水后充足的水分促使植株快速生长,提高了干物质积累的  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$ 。这一结果与王振华等<sup>[35]</sup>在谷子(*Setaria italica*)上和刘溢健等<sup>[36]</sup>在马铃薯上的研究结果相似,他们认为幼苗期受到干旱胁迫后恢复灌水,可促进谷子和马铃薯干物质快速积累,植株在幼苗期受到干旱胁迫造成的损失可在后期得到补偿。本试验结果还表明,相较于对照,马铃薯块茎形成期干旱胁迫处理显著抑制了单株干物质积累,即使后期恢复灌水其干物质积累速率也无法恢复。通过 Logistic 方程拟合分析发现,  $T_2$  处理的干物质快速积累起始时间与块茎形成

期开始干旱胁迫处理时间基本一致,植株干物质积累的  $V_{\max}$  和  $V_{\text{mean}}$  明显降低,整株干物质积累受到严重抑制,这可能也是  $T_2$  处理的块茎产量严重减少的主要原因。

众多研究结果表明,作物的产量受干旱胁迫时期和胁迫程度的影响<sup>[37-38]</sup>。本研究结果表明,各生育期干旱胁迫均会不同程度影响马铃薯植株产量及产量构成,相较于对照,幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水不但会显著提高大薯率、降低小薯率,对块茎产量也具有显著的补偿效应。姚君平等<sup>[39]</sup>在花生(*Arachis hypogaea* Linn.)上和 田树云等<sup>[40]</sup>在玉米上也得到了类似的结果。同时张朝巍等<sup>[41]</sup>发现,马铃薯块茎形成期和膨大期的水分供应与块茎产量构成性状密切相关。在本研究中,相较于对照,块茎形成期干旱胁迫处理不但减少了单株结薯数,还显著降低了大薯率,增加了小薯率,这也与刘素军<sup>[15]</sup>的研究结果一致。本研究结果表明,相较于对照,块茎膨大期干旱胁迫处理显著减少了单株结薯数,但大薯率、中薯率、小薯率与 CK 相比均无显著差异,单株结薯数的减少可能是减产的主要原因。

提高水分利用效率,是干旱、半干旱地区水资源受限情况下提高作物产量的主要措施<sup>[42]</sup>,提高水资源利用效率的最佳途径之一是在特定生育时期通过干旱胁迫改变作物生长发育轨迹,再利用恢复灌水后的生长补偿效应以实现作物高产<sup>[43-44]</sup>。刘吉利等<sup>[45]</sup>发现在花生幼苗期进行适当干旱胁迫处理后恢复灌水,有利于提高花生水分利用效率和产量,与本研究结果相似,相较于对照,马铃薯幼苗期干旱胁迫处理后恢复灌水可显著提高马铃薯水分利用效率及灌溉水利用效率。块茎膨大期干旱胁迫处理虽提高了水分利用效率、灌溉水利用效率,但其块茎产量较对照显著降低。本试验结果表明,在马铃薯块茎淀粉积累期进行干旱胁迫处理,可以在不影响产量形成的情况下有效提高水分利用效率和灌溉水利用效率,这与张万恒等<sup>[46]</sup>的研究结果一致。本试验结果还表明,相较于对照,在马铃薯块茎形成期进行干旱胁迫处理会显著降低水分利用效率和灌溉水利用效率,即使后期恢复灌水也无法补偿,其单株干物质积累量和块茎产量均显著低于其他各处理,说明块茎形成期是华颂 7 号的水分临界期,该时期水分供应不足会严重影响植株的正常生长和块茎产量的形成。块茎膨大期干旱胁迫处理( $T_3$ )的水分利用效率和灌溉水利用效率与



对照相比均无显著差异,但其整株干物质积累量和块茎产量均显著低于对照,这可能是由于该时期(7月底至8月初)外界温度较高,空气干燥,有限的水分主要用于维持植株地上部分的正常生理活动,从而阻碍了匍匐茎和块茎的发育,最终导致单株结薯数相较于对照显著减少和块茎产量严重降低。因此,在块茎形成期应保持良好的水分供应,以提高马铃薯水分利用效率、灌溉水利用效率和块茎产量。

## 4 结 论

苗期干旱胁迫处理后恢复灌水对马铃薯植株生长具有显著的补偿效应,不但可以促进马铃薯干物质快速积累,还较对照显著提高大薯率、块茎产量和水分利用效率。块茎形成期干旱胁迫处理会显著抑制植株生长,即使后期恢复灌水抑制作用也无法消除,相较于对照,株高、整株干物质积累量、单株结薯数和大薯率均显著下降,最终造成严重减产。块茎膨大期干旱胁迫处理虽然对马铃薯植株地上部分生长影响较小,但较对照整株干物质积累量和单株结薯数显著减少,块茎产量显著下降。淀粉积累期干旱胁迫对马铃薯单株干物质积累、块茎产量和产量构成影响较小,和对照无显著差异。

## 参考文献:

- [1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2015, 34(3): 1-7.
- [2] 张泽生, 刘素稳, 郭宝芹, 等. 马铃薯蛋白质的营养评价[J]. 食品科技, 2007, 90(11): 219-221.
- [3] 王 琼, 唐 然, 周 平, 等. 浅析实施国家马铃薯主粮化战略的高层次人才支撑与强化策略[J]. 教育教学论坛, 2020(45): 115-117.
- [4] 李 超, 刘道德, 谢 云. 主粮化背景下马铃薯产业链延伸问题研究——以恩施州为例[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(7): 177-180.
- [5] LONG S P, ORT D R. More than taking the heat: crops and global change[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13(3): 241-248.
- [6] 樊胜岳, 周 宁, 刘文文. 走出马尔萨斯陷阱: 人口压力与沙漠化的关系[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 218-226.
- [7] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增, 等. 作物水分亏缺诊断研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 205-210.
- [8] 肖厚军, 孙锐锋, 何佳芳, 等. 不同水分条件对马铃薯耗水特性及产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 73-75.
- [9] 曲 涛, 南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 126-135.
- [10] 宋志荣. 马铃薯对干旱胁迫的反应[J]. 中国马铃薯, 2004, 18(6): 330-332.
- [11] 闫文渊, 秦军红, 段绍光, 等. 水分胁迫对不同熟性马铃薯生理特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(5): 44-52.
- [12] 赵海超, 抗艳红, 龚学臣, 等. 干旱胁迫对不同品种马铃薯生长指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(28): 12102-12104.
- [13] 贾 慧, 贺学勤, 蒙美莲, 等. 硝普钠对不同缺水状态下盆栽马铃薯产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 63-67, 107.
- [14] 抗艳红, 赵海超, 龚学臣, 等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16820-16822.
- [15] 刘素军. 马铃薯对不同生育时期水分胁迫及复水的生理和分子响应机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [16] 闫士朋, 焦润安, 张俊莲, 等. 灌溉量对马铃薯生理特性及块茎产量品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 41-51.
- [17] 潘小番, 张恒嘉, 邓浩亮, 等. 河西绿洲不同生育期调亏灌溉对马铃薯生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程, 2021, 11(2): 130-136.
- [18] 秦军红, 陈有君, 周长艳, 等. 膜下滴灌灌溉频率对马铃薯生长、产量及水分利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 824-830.
- [19] 金建新, 何进勤, 黄建成, 等. 宁夏中部干旱带不同灌水量对马铃薯生长、产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(5): 935-940.
- [20] 沈皎皎, 王 靖, 潘学标, 等. 播种期对农牧交错带马铃薯生长发育和产量形成及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 137-144.
- [21] 张万恒. 不同生育期水分调亏对绿洲膜下滴灌马铃薯生长特性、产量及品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [22] 薛道信, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 调亏灌溉对荒漠绿洲膜下滴灌马铃薯生长、产量及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 109-116, 132.
- [23] 李昊俊. 氮磷钾配施对全膜马铃薯干物质积累分配、产量形成及品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [24] 姚春馨, 丁玉梅, 周晓翌, 等. 水分胁迫下马铃薯抗旱相关表型性状的分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1416-1419.
- [25] 赵 鸿, 任丽雯, 赵福年, 等. 马铃薯对土壤水分胁迫响应的研究进展[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 537-543.
- [26] 王晓雪, 李 越, 张 斌, 等. 干旱胁迫及复水对燕麦根系生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1588-1596.
- [27] DEBLONDE P M K, LEDENT J F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 14(1): 31-41.
- [28] 张凤军, 叶景秀, 阮建平, 等. 干旱胁迫下马铃薯块茎形成期部分农艺性状的遗传分析[J]. 种子, 2022, 41(5): 23-29.
- [29] 胡萌萌. 水分胁迫对马铃薯生长、生理特性、产量和品质的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- [30] 张 旭, 李 莎, 蔡 煜, 等. 干旱区不同水氮梯度滴灌冬小麦

- 干物质积累动态特征及产量效应[J]. 西南农业学报, 2020, 33(9): 2018-2026.
- [31] 吴秀宁, 张 军, 王凤娟, 等. 肥密互作对旱地冬小麦商麦 1619 旗叶光合特性、干物质积累和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 924-930.
- [32] 杨 睿, 范军亮, 赖珍林, 等. 河西地区滴灌春玉米对不同灌溉决策方法的响应[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(9): 966-972.
- [33] 陈绕生, 薛林宝. 纳米硒、铜对干旱胁迫下番茄生长、光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 127-134.
- [34] 潘小番, 张恒嘉, 邓浩亮, 等. 河西绿洲不同生育期调亏灌溉对马铃薯生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程, 2021, 11(2): 130-136.
- [35] 王振华, 刘 鑫, 余爱丽, 等. 谷子苗期干旱胁迫对各器官干物质积累及产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(2): 8-12.
- [36] 刘溢健, 任建宏, 殷俐娜, 等. 马铃薯块茎膨大期不同程度干旱后复水的源库补偿效应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3777-3786.
- [37] 赵世伟, 管秀娟, 吴金水. 不同生育期干旱对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 56-59.
- [38] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [39] 姚君平, 罗瑶年, 杨新道. 干旱对花生早熟种籽仁发育及其品质影响研究初报[J]. 中国油料, 1982(3): 52-54, 26.
- [40] 田树云, 文仁来, 何静丹, 等. 广西主栽玉米品种苗期干旱胁迫及复水补偿效应研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 479-485.
- [41] 张朝巍, 董 博, 郭天文, 等. 补充灌溉对半干旱区马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 49-53.
- [42] 张正斌, 徐 萍, 董宝娣, 等. 水分利用效率——未来农业研究的关键问题[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(1): 52-61.
- [43] 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.
- [44] 胡田田, 康绍忠. 植物抗旱性中的补偿效应及其在农业节水中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 885-891.
- [45] 刘吉利, 赵长星, 吴 娜, 等. 苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 469-476.
- [46] 张万恒, 张恒嘉, 李福强, 等. 不同生育期调亏滴灌对绿洲马铃薯产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 145-152.

(责任编辑: 成纾寒)