

引用格式: 李佳欣, 张天赐, 任晓月, 等. 不同生育期马铃薯根系构型及生理指标对干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1848-1855. [LI J X, ZHANG T C, REN X Y, et al. Responses of potato root architecture and physiological indexes to drought stress at different growth stages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(12): 1848-1855.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240415

不同生育期马铃薯根系构型及 生理指标对干旱胁迫的响应

李佳欣, 张天赐, 任晓月, 李思璇, 陈彦云*

(宁夏大学 生命科学学院, 银川 750021)

摘要 【目的】明确马铃薯各生育期根系对干旱胁迫的响应特征, 初步解析根系的抗旱机制, 为干旱胁迫下马铃薯的科学管理提供理论依据。【方法】以‘冀张薯 12 号’马铃薯为材料, 采用室内盆栽对比试验, 设置重度干旱(土壤相对含水量 45%)和正常浇水(土壤相对含水量 75%)处理, 在 4 个生育期观测马铃薯生长、根系构型和根系生理指标。【结果】干旱胁迫组马铃薯的株高、茎粗、总根长、根总表面积和根总体积在整个生育期都显著低于对照组; 干旱胁迫组单株产量、单株结薯数和淀粉含量显著低于对照组, 还原糖含量显著高于对照组; 干旱胁迫组根系活力、MDA 含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量显著高于对照组, 并随着干旱时间的延长呈上升趋势; 干旱胁迫组根系 SOD、POD 活性在后期也显著高于对照组, 且 SOD 活性在前期响应较慢, POD 活性则响应较快。【结论】马铃薯生长、根系发育和产量受到干旱胁迫显著抑制, 其根系的抗氧化酶活性、渗透调节物质含量均能迅速做出响应, 缓解干旱胁迫带来的伤害, 表现出一定的抗旱性。

关键词 马铃薯; 干旱胁迫; 根系构型; 渗透调节物质; 抗氧化酶

中图分类号 Q945.78; S532

文献标志码 A

Responses of potato root architecture and physiological indexes to drought stress at different growth stages

LI Jiixin, ZHANG Tianci, REN Xiaoyue, LI Sixuan, CHEN Yanyun*

(School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract [Objective] The present study aimed to elucidate the response of the potato root system to drought stress at different developmental stages. Additionally, the study sought to identify the underlying mechanisms that confer drought resistance in potato root system. This study will provide a theoretical foundation for potato production under drought stress. [Methods] Using ‘Jizhang Potato No. 12’ as the material, an indoor potting experimental design was adopted to study potato growth indexes, root conformation, and root physiological indexes at different reproductive periods under two treatments of severe drought [relative soil moisture content (45±5)%] and normal watering [relative soil moisture content (75±5)%]. [Results] The plant height, stem diameter, total root length, total root surface area, and total root volume of the potato were found to be significantly lower than those of the control throughout the re-

收稿日期: 2024-07-18; 修改稿收到日期: 2024-09-15

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02002)

作者简介: 李佳欣(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事马铃薯抗旱生理研究。E-mail: ljx7862461@foxmail.com

* 通信作者: 陈彦云, 研究员, 博士生导师, 主要从事马铃薯旱作栽培研究。E-mail: nxchenyy@163.com

productive period under drought stress. Single plant yield, number of potatoes per plant and starch content were significantly lower in the drought stressed group than the control, and reducing sugar was significantly higher in the drought stressed group than the control. The roots of potatoes subjected to drought stress exhibited heightened vigor, MDA, proline, and soluble sugar levels compared to the control, with these values increasing as the duration of drought prolonged. Additionally, the SOD and POD activity levels in these roots were higher than the control, with SOD displaying a delayed response during the early stages and POD activity demonstrating a rapid surge during the tuber formation phase. [Conclusion] The growth, development and yield of potatoes were found to be impeded by drought stress. The antioxidant enzyme system and osmoregulatory substances within the potato root system exhibited a rapid response to drought stress, enabling the plant to cope with the damage caused by drought stress and demonstrating a certain degree of drought resistance.

Key words *Solanum tuberosum* L.; drought stress; root architecture; osmoregulatory substances; antioxidant enzyme

马铃薯为茄科茄属的 1 年生草本植物,又名土豆、山药等,在当前全球农业体系中占据了非谷物类可食用作物之首的地位,是仅次于小麦、玉米与稻米的世界第四重要粮食作物来源^[1-2]。2015 年中国推出了马铃薯主食化发展战略,旨在推动马铃薯的多元化、绿色化及特色化产业发展^[3]。目前,马铃薯已成为中国保障粮食安全、引领民众饮食结构向更均衡方向转变的关键粮食作物之一。中国西北部为马铃薯的主要生产区域之一,该区域广泛推行雨养旱作农业模式,高度依赖自然降水^[4],水资源匮乏以及降水时空不均衡分布对该区域农业生产构成显著制约^[5]。马铃薯是典型喜湿作物,其根系较浅,对水分亏缺敏感^[6],若生产中遭遇降水异常导致的干旱胁迫,将严重影响作物的产量与品质。根系作为植物体感知环境逆境变化的关键部位,其在面对干旱胁迫时的响应机制对于作物的整体适应性与生存能力至关重要^[7-8],植物根系应对干旱胁迫的生理生化响应已成为研究的热点课题之一。

干旱胁迫可激发植物自身一系列复杂的反应,包括植株形态、抗氧化酶活性和代谢物质含量等^[9]。已有的研究显示,干旱胁迫能够直接引发植株出现萎蔫现象,进而抑制其整体生长态势,包括株高、茎叶的伸展以及根系的发育均受到显著制约;同时还导致马铃薯单株结薯数量显著减少,单株产量及生物量累积均呈现大幅度下滑趋势,对马铃薯的产量产生显著影响^[10]。在干旱胁迫逆境中,植物不仅在形态结构上有所改变,并且从生理生化特性上也会做出响应。干旱胁迫使蚕豆内超氧化物歧化酶(SOD)的活性显著升高,对提高蚕豆的干旱适应性具有重要作用^[11],也使抗旱性强的马铃薯品种 SOD 和 POD 活性升高^[12],还会增加百合体内丙二醛

(MDA)含量,降低根系活力,促使植物体内合成脯氨酸(Pro)抵御干旱^[13]。

目前,关于马铃薯耐旱性的相关研究主要集中在地上部分,而关于干旱胁迫条件下马铃薯根系构型差异、抗氧化酶活性、渗透调节物质等相关生理指标如何变化及其响应在生育期之间的差异等均鲜见报道。本研究在严格把控土壤水分含量的条件下,比较了正常浇水和严重干旱条件下马铃薯生长指标、根系构型指标、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量在整个生育期的差异变化,明确了不同生育期马铃薯根系对于旱胁迫的响应特征,初步解析马铃薯根系的抗旱机制,为干旱胁迫下马铃薯栽培措施的科学制定提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料及培养

参试马铃薯品种为‘冀张薯 12 号’,由宁夏马铃薯工程技术研究中心提供。选择大小一致、表面光滑无病菌的脱毒种薯,播种在直径 50 cm、高 50 cm 的花盆中,盆栽土壤为基质和沙土的混合物(体积比 1:1)。在室内温度 25℃、湿度 40%环境中进行常规管理,在出苗后 20 d 时进行干旱胁迫处理。试验开始之前,供试土壤的田间持水量为 52%。

1.2 试验处理

试验于 2023 年 4—8 月进行,采用室内盆栽对比试验设计,设置对照[CK,正常浇水,土壤相对含水量(75±5)%]和重度干旱[XP,土壤相对含水量(45±5)%]2 个处理。采用烘干法和水分测定仪对盆栽土壤含水量进行监测,大约每 2 d 补水 1 次。分别于马铃薯块茎形成期(T₁)、块茎增长期(T₂)、淀粉积累期(T₃)、块茎休眠期(T₄)对根系进行取样,在块茎休眠

期对薯块进行取样,各处理均 3 次重复。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标

2 组处理中各随机选取 3 株马铃薯植株,洗净后快速擦拭除掉多余水分并分为地上部和地下部分,用直尺测量株高,用数显游标卡尺测量茎粗。

1.3.2 根系构型指标

用台式扫描仪(Epson Expression 1200XL,中国上海)对 2 组处理中各随机选取 3 株马铃薯根系进行扫描并将图像存入电脑,用 Win RHIZO 根系分析系统软件分析根系总根长、平均直径、总根表面积、总根体积等根系构型参数。

1.3.3 根系生理指标

2 组处理中各随机选取 3 株马铃薯,采集根系后放入液氮中速冻,之后移入 -80 ℃ 冰箱保存,用于测定根系生理指标。其中,根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法;脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法;可溶性糖含量测定采用蒽酮法;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)还原法;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法^[14]。

1.3.4 产量及品质指标

在块茎休眠期,两组处理中各随机选取 3 株马铃薯植株测定单株结薯数和单株结薯重。采集块茎放入 4 ℃ 冰箱中保存,用于测定块茎品质,还原糖含量测定采用 3,5-二硝基水杨酸法,淀粉含量测定采用碘量法^[14]。

1.4 数据统计

用 Excel 整理数据,通过 SPASS 26.0 软件进行独立样本 *t* 检验分析,用 GraphPad Prism 9.5 绘图。 $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著, $P>0.05$ 为无显著差异。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对马铃薯生长指标的影响

2.1.1 生长表型

图 1 显示,在整个马铃薯生育期中,干旱胁迫处理组植高比同期对照组生长缓慢,叶片数量、分茎数和结薯数也少于同期对照组。同时,干旱胁迫处理组从淀粉积累期(T_3)开始底部有部分叶片萎蔫,其根系生长相比对照组稀疏,根系的伸长长度低于对照组。可见,干旱胁迫同时影响马铃薯植株地上部分和地下部分的生长发育。



CK. 对照处理;XP. 重度干旱胁迫处理; T_1 . 块茎形成期; T_2 . 块茎增长期; T_3 . 淀粉积累期; T_4 . 块茎休眠期。下同。

图 1 对照与干旱胁迫处理下马铃薯植株表型变化

CK, control. XP, drought stress. T_1 , tuber initiation period. T_2 , tuber growth period.

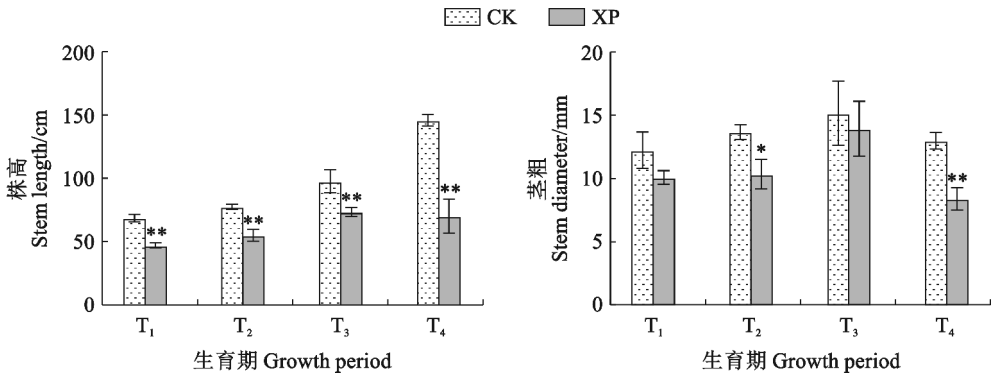
T_3 , starch accumulation period. T_4 , tuber dormancy period. The same as below.

Fig. 1 Phenotypic changes in potato plants under drought stress

2.1.2 株高和茎粗

由图 2 可知,干旱处理组马铃薯株高在各生育期均极显著低于同期对照组,降幅在块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期和块茎休眠期分别为 31.07%、29.18%、24.57%和 51.83%。随着马铃薯生育期的推移,马铃薯株高在对照组呈逐渐上升趋势,在干旱处理组则先升后降,并在淀粉积累期达到最大值,

在块茎休眠期开始降低。同时,干旱处理组马铃薯茎粗在不同生育期下均低于对照组,且在块茎增长期和块茎休眠期降幅达到显著水平,较对照组分别显著降低了 23.39%和 35.43%;在整个生育期,干旱处理组和对照组马铃薯植株茎粗均随着生长时间推移先增大后减小,并均在淀粉积累期达到最大值,随后在块茎休眠期减小(图 2)。



* 和 ** 分别表示同期处理与对照之间在 0.05 和 0.01 水平有显著差异。下同。

图 2 干旱胁迫下不同生育期马铃薯株高和茎粗

The * and ** within same period indicate significant difference between control (CK) and treatment (XP) at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below.

Fig. 2 The height and stem diameter of potato plants at different growth stages under drought stress

2.2 干旱胁迫对马铃薯根系构型指标的影响

图 3 表明,在整个马铃薯生育期,干旱处理组马铃薯植株的总根长、根总表面积、根总体积和根系平均直径都显著低于对照组;在块茎休眠期,干旱处理组总根长、根总表面积和根总体积较对照组减幅最大,分别为 78.81%、77.76%和 76.46%,而平均直径在块茎形成期较对照组降幅最大(23.01%)。

随生育期推移,干旱处理组总根长、根总表面积和总体积都呈现先上升后降低趋势,并均在淀粉积累期达到最大值,在块茎休眠期降低,而平均直径则逐渐增加;整个生育期对照组根总体积和根系平均直径均呈逐渐增加趋势,而其总根长、根总表面积则都呈现先上升后降低趋势,并均在淀粉积累期达到最大值。

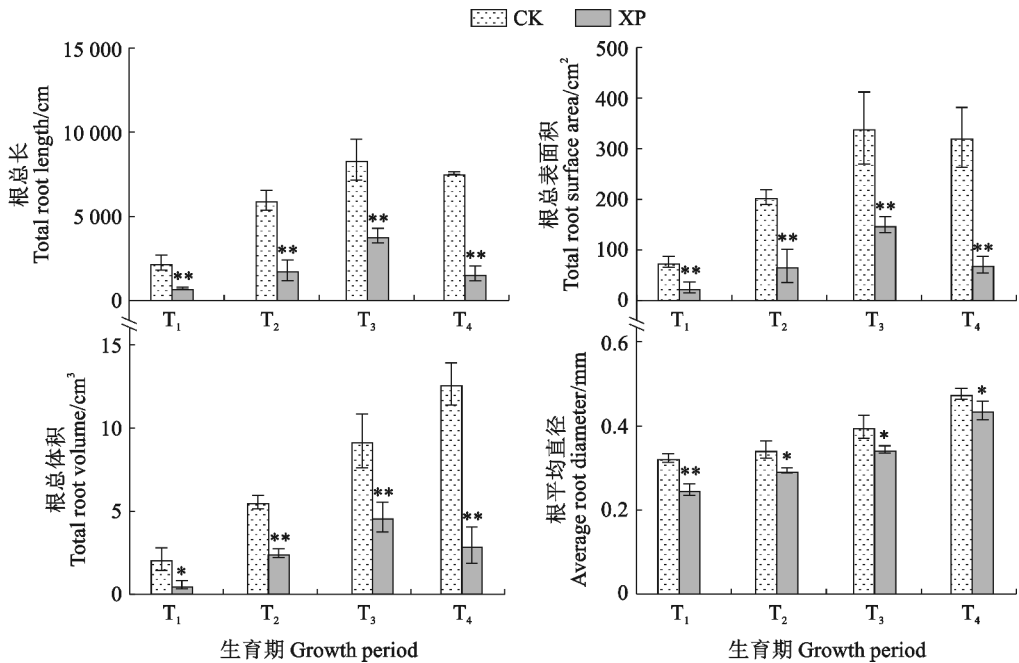


图 3 干旱胁迫下不同生育期马铃薯根系构型指标

Fig. 3 The root architecture indexes of potato root systems at different growth stages under drought stress

2.3 干旱胁迫对马铃薯根系生理指标的影响

2.3.1 根系活力和丙二醛含量

根系活力是反映根系整体代谢强弱的重要指标。如图 4 所示,干旱处理组马铃薯根系活力均不

同程度高于对照组,且随着生育期推进干旱处理组和对照组均呈现先降后升趋势,并均在块茎休眠期达到最大值;干旱处理组根系活力在淀粉积累期时显著高于对照组 98.32%。说明干旱胁迫使马铃薯

根系活力提升,增强其根系吸收水分和养分的能力。同时,马铃薯根系 MDA 含量随着干旱胁迫时间推移基本呈现上升趋势,且干旱处理组在全生育期均显著高于对照组,在块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期、块茎休眠期分别比同期对照组显著提高了 55.89%、64.58%、15.64%和 17.05%。这说明长时间干旱已经使马铃薯根系细胞膜系统受到严重损伤。

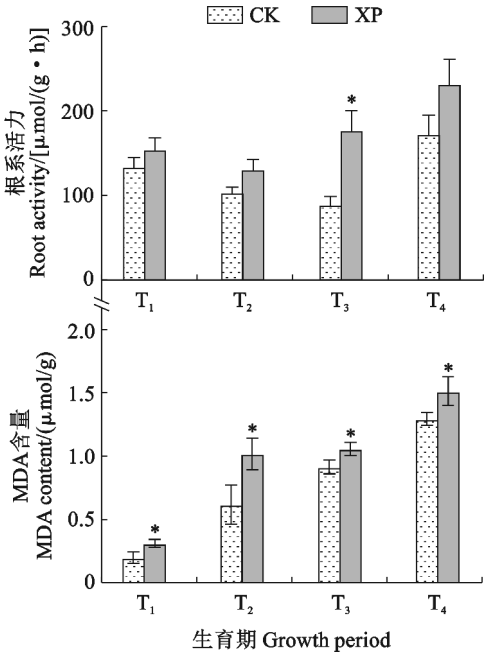


图 4 干旱胁迫下不同生育期马铃薯根系活力和丙二醛含量
Fig. 4 The root vigor and malondialdehyde content in potato roots at different growth stages under drought stress

2.3.2 渗透调节物质含量

图 5 表明,马铃薯根系脯氨酸含量随着干旱胁迫时间推移均呈上升趋势,且干旱处理组的脯氨酸含量显著高于同时期对照组,在块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期、块茎休眠期分别比对照组极显著提高了 40.94%、149.66%、82.04%和 89.07%。同时,干旱处理组根系的可溶性糖含量均不同程度大于对照组,但仅在块茎休眠期达到显著水平,此时干旱处理组可溶性糖含量相比对照组显著提高了 41.70%;干旱处理组和对照组根系的可溶性糖含量随干旱胁迫时间推移均呈现先上升后下降的趋势,并均在淀粉积累期达到最高值,而在块茎休眠期下降。以上结果说明在长时间干旱胁迫下马铃薯根系能通过主动积累脯氨酸和可溶性糖来调节细胞渗透势,有效抵御干旱胁迫带来的伤害。

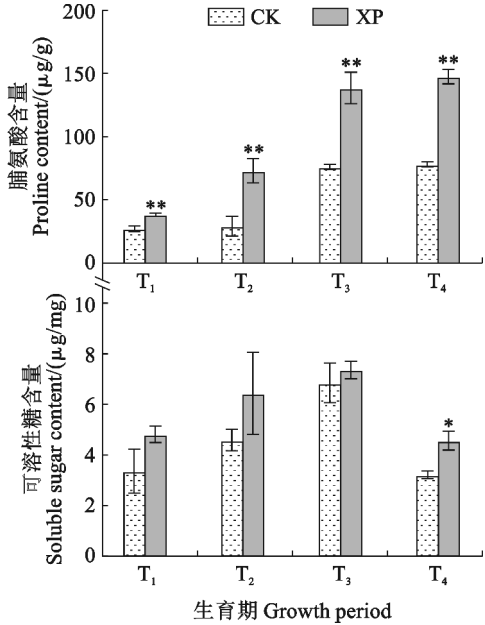


图 5 干旱胁迫下不同生育期马铃薯根系脯氨酸和可溶性糖含量
Fig. 5 The proline and soluble sugar contents in potato roots at different growth stages under drought stress

2.3.3 抗氧化酶活性

如图 6 所示,干旱处理组马铃薯根系 SOD 活性在块茎形成期和块茎增长期均显著低于相应的对照组,降幅分别为 39.30%和 21.25%,而在淀粉积累期和块茎休眠期则显著高于对照组,增幅分别为 61.33%和 36.46%;随着生育期推进,根系 SOD 活性在干旱处理组先升后降,并在淀粉积累期达到最高值,在对照组则逐渐降低。

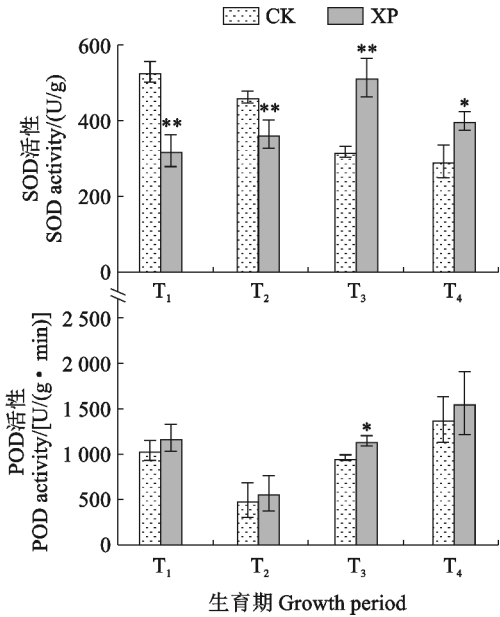


图 6 干旱胁迫下不同生育期马铃薯根系 SOD 和 POD 活性
Fig. 6 The activities of SOD and POD in potato roots at different growth stages under drought stress

同时,马铃薯根系 POD 活性在整个生育期始终表现为干旱处理组高于对照组,但仅在淀粉积累期达到显著水平,此时干旱处理组相比对照组显著提高了 19.26%;2 组根系 POD 活性随着生育期均呈先降后升的趋势,从块茎增长期开始明显上升。以上结果说明马铃薯根系能通过提高 SOD、POD 活性来有效抵御干旱胁迫。

2.4 干旱胁迫对马铃薯产量及品质指标的影响

表 1 显示,干旱胁迫处理导致马铃薯单株产量和单株结薯数下降,干旱胁迫处理组显著低于对照组,与 CK 相比降幅分别为 78.70%和 54.54%。干旱胁迫处理导致马铃薯淀粉含量下降,干旱胁迫处理组显著低于对照组,与 CK 相比降幅为 17.98%;干旱胁迫处理导致马铃薯还原糖含量上升,显著高于对照组,与 CK 相比增长了 54.54%。以上结果说明,干旱胁迫影响马铃薯块茎的生长,导致马铃薯产量和品质下降。

表 1 干旱胁迫下马铃薯产量及品质指标

Table 1 Indicators of potato yield and quality under drought stress

测定指标 Measurement indicator	对照组 Control	干旱处理组 Drought stress
单株产量 Yield per plant/g	142.13±36.39	30.27±7.52 *
单株结薯数 Tubers per plant	3.66±0.58	1.67±0.58 *
淀粉含量 Starch content/%	9.84±0.95	8.89±0.11 *
还原糖含量 Reducing sugar content/%	1.37±0.28	2.28±0.07 *

注: * 表示处理与对照间在 0.05 水平差异显著 ($P<0.05$)。
Note: * indicates significant difference between treatment and control at 0.05 level ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 马铃薯生长指标对干旱胁迫的响应

在面临干旱胁迫时,植物为了应对不良环境条件,会展现出形态和结构上的显著变化,进而抑制其正常生长,可以通过观测植物生长指标变化有效反映这种胁迫程度。相关研究显示,干旱胁迫不仅会导致植物细胞结构受损,还会显著阻碍细胞的正常扩张过程,从而限制株高的生长。这种生长抑制是植物在干旱胁迫下的一种自我保护与调节机制^[15]。本研究结果表明,发生干旱胁迫后,马铃薯的株高和茎粗生长都受到显著限制,并且随着干旱时间延长,株高受到干旱的抑制逐渐加剧。同时,马铃薯干旱处理组块茎收获期株高较淀粉积累期降低,说明干旱胁迫影响马铃薯收获期的继续生长,致使植株提前开始枯萎,株

高萎缩。另外,本研究发现,马铃薯茎粗对干旱胁迫的响应程度低,表现为处理组与对照组的茎粗差异较小。但在块茎收获期,处理组的茎粗显著低于对照组,说明干旱胁迫在块茎收获期影响较大,会使马铃薯提前进入块茎休眠期,茎段发生枯萎,茎粗减小。

3.2 马铃薯根系构型指标对干旱胁迫的响应

根系是植物运输养分和吸收水分的最主要器官,其在土壤中的空间分布决定了植物吸收养分和水分的能力,因此,根系构型是一个重要的农艺性状,直接与植物的生长密切相关。已有研究表明,在干旱胁迫条件下,植物通过改变根系构型形态以适应逆境,这与植物本身的避逆性有关^[16],其机制可能与干旱胁迫导致根系可塑性变化不断去适应环境的改变有关^[17]。其机制可能在于干旱胁迫引起的根系可塑性变化,这种变化是根系为了适应不断改变的环境而做出适应性调整^[18-19]。本研究结果表明,干旱处理组马铃薯的根总长、根总面积、根总体积和根平均直径在不同生育期都低于相应对照组,且随着干旱胁迫时间延长,处理组的根总长、根总面积和根总体积的生长处于缓慢增长状态,并在收获期降低,说明干旱胁迫迫使部分根系提前木栓化或干枯,很大程度限制了根系生长。

3.3 马铃薯根系生理指标对干旱胁迫的响应

植物的根系活力是评估其生命力强弱的关键指标,它影响植株对矿质营养和水分的摄取与利用效率,对整个植株生长发育具有决定性作用^[20]。根系活性越强,其吸收养分的能力便越显著,从而有助于植株的茁壮成长^[21]。本研究表明,干旱处理组马铃薯的根系活力显著高于对照组,说明根系在受到水分胁迫时做出反应并提高其活力,以适应干旱环境,加强对养分和水分的吸收。同时,干旱处理组根系活力随着干旱时间延长呈现上升趋势,说明马铃薯根系能逐渐适应干旱并做出反应。

MDA 作为植物膜脂过氧化的最终产物,是衡量细胞过氧化程度的重要指标,其含量变化能反映细胞过氧化程度,当 MDA 积累量增加时,意味着胞膜系统遭受的伤害程度加剧;反之,若积累量减少,则表明胞膜系统受损程度减轻。因此,通过测定 MDA 的积累量可有效评估植物细胞在膜脂过氧化过程中的受损状况^[22]。本研究结果表明,随干旱时间延长,干旱处理组和对照组根系的 MDA 含量都呈现上升趋势,并在 4 个生育期都表现为干旱处理组显著高于对照组。

在逆境胁迫条件下,植物往往会积极调整自身的生理机制以应对环境压力。其中,一种常见的策略是通过主动积累渗透调节物质来提高细胞液的浓

度,进而维持细胞的膨压,防止原生质过度脱水,确保体内水分平衡^[23]。脯氨酸和可溶性糖是植物体内至关重要的渗透调节物质。本研究表明,在 4 个生育期内,处理组马铃薯根系的脯氨酸含量都显著高于对照组,并随干旱时间延长处于上升趋势。同时,干旱处理组根系的可溶性糖含量均不同程度高于对照组,并在块茎休眠期相比对照组显著提高了 41.70%。说明马铃薯根系可通过脯氨酸和可溶性糖的积累提高了植物体细胞的渗透调节能力,从而降低了干旱胁迫对根系的伤害,从而增强马铃薯的抗旱能力。

另外,干旱胁迫会引发植物体内 ROS 的积累,这种过量的 ROS 会对蛋白质、脂质、细胞膜、DNA 以及叶绿素等造成难以修复的损害^[24]。研究表明,SOD 和 POD 等是防御活性氧对细胞损伤的重要保护酶系统成员,这些酶在清除自由基等方面发挥着重要的作用^[25],能显著增强植物应对干旱胁迫的能力。本研究结果表明,干旱处理组马铃薯根系 SOD 活性在块茎形成期和块茎增长期显著低于对照组,在淀粉积累期和块茎休眠期显著高于对照组,并且在生育期内表现出上升趋势,同时整个生育期干旱处理组 POD 活性都始终高于对照组,说明随干旱胁迫时间增长,马铃薯根系的抗氧化酶系统活性开始激活增强,以应对干旱胁迫带来的过量 ROS 积累,维持体内 ROS 代谢平衡,从而增强马铃薯植株耐旱能力。

3.4 马铃薯产量及品质指标对干旱胁迫的响应

干旱严重限制了作物产量的形成,干旱胁迫会使产量显著降低^[26],严重的干旱胁迫会明显减少马铃薯结薯数量^[27]。本研究表明,马铃薯的单株结薯

数量和单株产量随着干旱处理而减少,说明干旱胁迫通过减少结薯数量、薯块大小,造成产量下降。淀粉作为马铃薯主要成分,其含量决定着马铃薯品质状况^[28]。在马铃薯食品加工中,薯块还原糖含量太高会影响其加工品质^[29]。本研究表明,干旱胁迫处理导致马铃薯块茎淀粉积累减少,还原糖含量积累增加,显著影响马铃薯的加工品质。

4 结 论

(1)干旱胁迫组和对照组马铃薯的株高和茎粗均随处理时间不断增加,干旱胁迫处理的增加量显著低于对照,干旱胁迫对马铃薯的植株形态有明显的抑制作用,从而对其正常生长和发育产生严重影响。

(2)马铃薯根系也同样受到干旱胁迫的影响,干旱胁迫组马铃薯的根总长、根总面积、根总体积和根平均直径在块茎收获期显著低于对照组,干旱胁迫严重影响了马铃薯根系的生长发育。

(3)在干旱胁迫下,马铃薯根系活力和 MDA 含量显著高于对照组,随处理时间不断增加,干旱胁迫使马铃薯根系活力增加,加强了根系对水分和养分的吸收能力,以应对干旱带来的伤害。

(4)马铃薯根系的抗氧化酶系、渗透调节物质均迅速响应干旱胁迫,干旱胁迫处理下的脯氨酸、可溶性糖含量及 SOD 和 POD 活性显著高于对照组,根系通过渗透调节系统和抗氧化系统的调节共同抵御干旱带来的伤害。

(5)干旱胁迫影响马铃薯块茎的生长,导致马铃薯产量和品质下降。

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(3): 1-7.
LU X P. Strategy of potato as staple food: Significance, bottlenecks and policy suggestions[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2015(3): 1-7.

[2] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 29-36.
YANG Y L, GUO Y Z, SUN J M. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 29-36.

[3] 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.
LI C, LIU D D, XIE Y. Research on the extension of the potato industry chain under the background of staple foods: Taking Enshi prefecture as an example[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(7): 177-180.

[4] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 增温对半干旱区春小麦田间水分特征的影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 52-58.
ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, *et al.* Effect of warming on field water characteristics of spring wheat in semi-arid area[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(1): 52-58.

[5] ZHAO F N, LEI J, WANG R Y, *et al.* Determining agricultural drought for spring wheat with statistical models in a semi-arid climate[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2018, 74(4): 162-172.

[6] 乔焕焕, 李红兵, 郑太波, 等. 干旱与复水对马铃薯块茎膨大期碳氮转运的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 154-162.
QIAO H H, LI H B, ZHENG T B, *et al.* Effects of drought stress and rehydration on carbon and nitrogen translocation in potato tuber swelling stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(4): 154-162.

[7] YILDIRIM K, YAĞCI A, SUCU S, *et al.* Responses of grapevine rootstocks to drought through altered root system ar-

- chitecture and root transcriptomic regulations [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 127: 256-268.
- [8] 朱广龙, 陈许兵, 郭小倩, 等. 酸枣根系结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应机制[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5810-5818. ZHU G L, CHEN X B, GUO X Q, *et al.* Plasticity of root morphology of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to natural drought gradient ecotopes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5810-5818.
- [9] RAZI K, MUNEEER S. Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, 41(5): 669-691.
- [10] 赵冀, 赵喜娟, 方爱国, 等. 水分胁迫对不同基因型马铃薯产量形成、光合生理特性及根系发育的影响[J]. 中国马铃薯, 2022, 36(6): 508-516. ZHAO J, ZHAO X J, FANG A G, *et al.* Effects of water stress on yield formation, photosynthetic physiological characteristics and root development of different genotypes of potato[J]. *Chinese Potato Journal*, 2022, 36(6): 508-516.
- [11] ABID G, M'HAMDI M, MINGEOT D, *et al.* Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence, antioxidant enzyme activities and gene expression patterns in faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(4): 536-552.
- [12] 张瑞玖, 马恢, 籍立杰, 等. 干旱胁迫对马铃薯品种生长及生理生化指标的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(15): 34-39. ZHANG R J, MA H, JI L J, *et al.* Effects of drought stress on growth and physiological and biochemical indexes of potato varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(15): 34-39.
- [13] 黄尧瑶, 邓明华, 彭春秀, 等. 百合花瓣抗氧化酶系统对干旱胁迫响应的研究[J]. 园艺学报, 2020, 47(4): 788-796. HUANG Y Y, DENG M H, PENG C X, *et al.* Studies on the response of lily petal antioxidant enzyme system to drought stress [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(4): 788-796.
- [14] 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.
- [15] 韦冬萍, 韦剑锋, 吴炫柯, 等. 马铃薯水分需求特性研究进展[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(4): 66-70. WEI D P, WEI J F, WU X K, *et al.* Research progress on water requirements of potato[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, 40(4): 66-70.
- [16] 张鋈鋈, 刘冰洋, 王一凡, 等. 植物根系研究进展[J]. 天津农业科学, 2016, 22(11): 11-18. ZHANG Y Y, LIU B Y, WANG Y F, *et al.* Research progress of plant roots [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2016, 22(11): 11-18.
- [17] 李秉钧, 颜耀, 吴文景, 等. 环境因子对植物根系及其构型的影响研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2019, 31(3): 41-45. LI B J, YAN Y, WU W J, *et al.* Study progress on the impact of environment factor to the plant root system and configuration[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2019, 31(3): 41-45.
- [18] KONG X P, ZHANG M L, DE SMET I, *et al.* Designer crops: Optimal root system architecture for nutrient acquisition[J]. *Trends in Biotechnology*, 2014, 32(12): 597-598.
- [19] WANG Z Y, YANG Y C, YADAV V, *et al.* Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2022, 8(5): 615-626.
- [20] 张金菊, 田青, 郭有燕, 等. 黑果枸杞根系对干旱胁迫响应的生理机制[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(4): 183-191. ZHANG J J, TIAN Q, GUO Y Y, *et al.* Physiological mechanism of root response to drought stress in *Lycium ruthenicum* [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(4): 183-191.
- [21] 王豪杰, 侯月爽, 陈静, 等. 干旱胁迫对白花泡桐幼苗根、叶形态特征和生理变化的影响[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(5): 784-793. WANG H J, HOU Y S, CHEN J, *et al.* Effects of drought stress on root and leaf morphological characteristics and physiological changes in *Paulownia fortunei* seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, 57(5): 784-793.
- [22] 王利界, 周智彬, 常青, 等. 盐旱交叉胁迫对灰胡杨(*Populus pruinosa*)幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 7026-7033. WANG L J, ZHOU Z B, CHANG Q, *et al.* Growth, physiological and biochemical characteristics of *Populus pruinosa* seedlings under salt-drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 7026-7033.
- [23] 王文娟, 师尚礼, 何龙, 等. 干旱胁迫下多胺在植物体内的积累及其作用[J]. 草业学报, 2023, 32(6): 186-202. WANG W J, SHI S L, HE L, *et al.* Accumulation and functions of polyamines in plants under drought stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 186-202.
- [24] MAHMOOD T, KHALID S, ABDULLAH M, *et al.* Insights into drought stress signaling in plants and the molecular genetic basis of cotton drought tolerance[J]. *Cells*, 2019, 9(1): 105.
- [25] TIWARI M K, JENA N R, MISHRA P C. Mechanisms of scavenging superoxide, hydroxyl, nitrogen dioxide and methoxy radicals by allicin: Catalytic role of superoxide dismutase in scavenging superoxide radical [J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2018, 130(8): 105.
- [26] 李啸云, 吕春娜, 王舰, 等. 干旱胁迫下马铃薯的生理响应及相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(24): 50-59. LI X Y, LU C N, WANG J, *et al.* Physiological response and correlation analysis of potato under drought stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(24): 50-59.
- [27] 崔勇, 李培贵, 李珍, 等. 马铃薯干旱胁迫响应及抗旱综合技术研究进展[J]. 中国蔬菜, 2023(4): 20-28. CUI Y, LI P G, LI Z, *et al.* Research progress on potato drought stress response and drought resistance integrated technology[J]. *China Vegetables*, 2023(4): 20-28.
- [28] 曹正鹏, 刘玉汇, 张小静, 等. 亏缺灌溉对马铃薯生长产量及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 114-123. CAO Z P, LIU Y P, ZHANG X J, *et al.* Effect of deficit irrigation on growth yield and water utilization of potato[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(4): 114-123.
- [29] 张风军, 张永成, 田丰. 不同生态环境下马铃薯还原糖含量分析[J]. 中国马铃薯, 2007(1): 15-18. ZHANG F J, ZHANG Y C, TIAN F. Analysis on reducing sugar content of potatoes in different ecological environments [J]. *Chinese Potato Journal*, 2007(1): 15-18.