

不同时期干旱对淀粉型甘薯产量形成及淀粉糊化特性的影响

陈碧伟¹ 鞠玺凯¹ 孙一鸣¹ 李清华² 刘庆¹ 曾路生¹

(¹青岛农业大学资源与环境学院, 266109, 山东青岛; ²青岛晟唐农业科技有限公司, 266109, 山东青岛)

摘要 以淀粉型甘薯品种商薯19号和烟薯29号为试验材料, 在控水条件下分别设置发根分枝期(前期)、薯蔓并长期(中期)、块根膨大期(后期)干旱和全生育期正常浇水(对照)4个水分处理, 研究不同时期干旱对淀粉型甘薯产量形成及淀粉糊化特性的影响。结果表明, 与对照相比, 不同时期干旱处理商薯19号地上部生物量分别降低35.7%、18.7%和11.4%, 地下部生物量分别降低55.4%、36.1%和20.8%; 烟薯29号地上部生物量分别降低47.4%、20.9%和13.8%, 地下部生物量分别降低60.2%、49.9%和15.1%。与对照相比, 不同时期干旱对甘薯块根造成不同程度的减产, 商薯19号薯干产量分别降低14.3%、1.8%和3.6%, 烟薯29号分别降低20.0%、6.9%和5.7%。不同时期干旱胁迫会降低薯块淀粉率和提升薯块的干物率, 块根膨大期干旱处理干物率最高, 与对照相比, 商薯19号和烟薯29号分别提升了10.6%和8.7%。发根期干旱处理淀粉率最低, 与对照相比, 商薯19号和烟薯29号分别降低了11.8%和16.4%。不同时期干旱胁迫影响淀粉糊化特性值, 中后期干旱能一定程度提升糊化参数, 改善淀粉品质, 但随着干旱持续会显著降低淀粉糊化参数。

关键词 淀粉型甘薯; 干旱时期; 产量; 淀粉; 糊化特性

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) LAM.] 原名番薯, 属于旋花科甘薯属一年生或多年生草本植物。我国是世界上最大的甘薯生产国, 种植面积占世界总种植面积的1/4以上, 总产量超世界甘薯总产量的50%^[1-2]。甘薯作为一种耐旱性较强的作物, 在北方地区的丘陵薄地广泛种植, 但由于我国降水时空分布不均, 如北方地区的季节性干旱会使甘薯面临不同程度的水分胁迫问题, 尤其在甘薯生长发育的关键时期出现水分胁迫会严重影响其产量和品质, 这是甘薯生产面临的一大问题^[3-6]。

甘薯的生长期根据其生长发育特征可分为发根分枝期、薯蔓并长期和块根膨大期3个时期。研究^[7-8]认为, 干旱胁迫抑制甘薯叶片、茎蔓和根系的生长, 导致甘薯块根产量下降, 其中以发根分枝期干旱胁迫下降幅度最大。甘薯发根分枝期是根系分化的关键时期, 此时期干旱胁迫会导致分化根体积减少, 不定根分化为块根数目大幅度降低, 导致产量下降, 此时分化为块根的数目基本决定了甘薯的最终结薯数, 且干旱胁迫发生的时间越早、持续时间越长影响程度越大^[9-10]。甘薯茎蔓并长期和块根膨大期干旱胁迫会使甘薯因缺水而导致光合速率降低, 根系无法正常吸收养分而生长停滞, 导致干

物质积累下降从而显著降低地上、地下部的生物量。此外, 干旱胁迫还会使土壤硬度增加, 增大了土壤机械阻力, 使甘薯块根在膨大时受到一定限制。前期研究^[11-13]表明, 甘薯水分临界期处于前中期。对淀粉型甘薯来说, 不同程度的干旱会影响淀粉的组成和性质, 如直链淀粉与支链淀粉的比例(直/支)、糊化特性等, 而直/支和糊化特性又影响淀粉后期的加工品质^[14]。研究^[15-17]发现, 受干旱胁迫的影响, 小麦直链淀粉和支链淀粉积累均呈下降趋势, 但灌浆期干旱对直链淀粉积累的影响要比支链淀粉更加明显, 干旱胁迫提高了支链淀粉的积累速率。另有研究^[18-19]表明, 干旱胁迫显著提高了小麦淀粉的谷值黏度和糊化温度, 延长了糊化时间, 但显著降低了小麦淀粉的峰值黏度。

目前, 关于甘薯不同时期干旱对生长发育和产量方面的研究较为丰富, 但针对淀粉型甘薯淀粉率、淀粉特性等方面的研究较少, 尤其缺少不同生育时期干旱效应的比较研究。因此, 本研究以商薯19号和烟薯29号2个淀粉型品种为试验材料, 设置不同生长时期干旱胁迫, 研究甘薯在不同时期干旱胁迫下生理响应及品质变化, 为淀粉型甘薯的水分管理优化与产量和品质提升提供依据。

作者简介: 陈碧伟, 研究方向为甘薯水分生理, E-mail: cbw925310570@163.com

刘庆为通信作者, 主要从事植物营养机理与品质调控研究, E-mail: 13455764802@163.com

基金项目: 国家甘薯产业技术体系专项资金(CARS-10); 青岛农业大学高层次人才资金(20210059)

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-05; 网络出版日期: 2023-03-27

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验选用 2 个淀粉型品种，分别为商薯 19 号和烟薯 29 号。试验设 4 个处理，分别为发根分枝

期干旱（T1）、薯蔓并长期干旱（T2）、块根膨大期干旱（T3）和全生育期正常灌水（对照，CK），不同处理土壤水分参数设定见表 1。试验于青岛农业大学胶州实验基地智能温棚内进行，土壤为砂浆黑土，含碱解氮 48.5 mg/kg、有效磷 15.5 mg/kg、

表 1 甘薯不同生长时期干旱胁迫试验土壤相对含水量设定
Table 1 Setting of soil relative water content under drought stress at different growth stages of sweet potato %

处理 Treatment	发根分枝期 Root branching stage (0~60 d)	薯蔓并长期 The potato and vine growth together stage (61~90 d)	块根膨大期 Tuber expansion stage (91~120 d)
CK	70±5	70±5	70±5
T1	35±5	70±5	70±5
T2	70±5	35±5	70±5
T3	70±5	70±5	35±5

速效钾 70.1 mg/kg、有机质 11.5 g/kg、pH 7.8。
试验采用抗旱池种植甘薯，池长 10 m，宽 2 m，深 0.6 m，底部使用塑料膜铺垫阻断地下水。每个抗旱池为 1 个试验小区，每个抗旱池内沿纵向起 2 垄，分别种植商薯 19 号和烟薯 29 号，株距 20 cm，每个处理重复 3 次。薯苗于 2021 年 5 月 10 日移栽，分别在移栽后第 30、60、90 天停止浇水后进行干旱胁迫处理，10 d 后进行采样，采样后恢复正常浇水，在 10 月 12 日收获。土壤水分控制设备为青岛农业大学和潍坊汇金海物联网技术有限公司联合研制的水分原位监测与智能精准管理系统。在每个处理垄下 15 cm 分别埋 3 个土壤水分传感器，在控制系统上设定好各处理的土壤含水量临界值，设备根据土壤水分传感器发回的监测结果进行自动浇水，以控制不同处理在设定的土壤含水量范围。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生物量 每次干旱处理结束后进行采样，每次仅采集对照与干旱胁迫处理过的小区样品。采样时，每个小区随机采集 5 株，称量植株地上部和地下部鲜重。按照此采样方法，发根分枝期干旱处理共采样 3 次，分别为移栽后的第 40、70 和 100 天；薯蔓并长期干旱处理共采样 2 次，分别为移栽后的第 70 和 100 天；块根膨大期干旱处理则仅在移栽后的第 100 天采样 1 次。
1.2.2 产量 在各处理小区每垄取 5 m 长度进行测产，并记录单个薯块重和单株结薯数指标，实验室 105℃ 杀青 30 min 后，65℃ 恒温烘干测定含水量，然后计算薯干产量及干物率。
1.2.3 淀粉制备及 RVA 特性 淀粉制备：薯块去皮切成细块状放入高速打浆机，加适量水粉碎 30 s，

倒入 100 目纱袋，加 0.5 L 水连续洗提 2 次，将洗提液合并倒入 100 目筛静置 12 h 后，将滤出物在冷冻干燥机中干燥，研磨成粉末再过 100 目筛，然后密封干燥避光保存。参考唐忠厚等^[14]方法，用 Tech-master RVA 仪（Perten 公司）测定淀粉糊化参数，包括峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解黏度、回生黏度和糊化温度等。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 8.01 对数据进行统计分析，利用 Duncan 法进行平均数间的多重比较（ $\alpha=0.05$ ），利用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

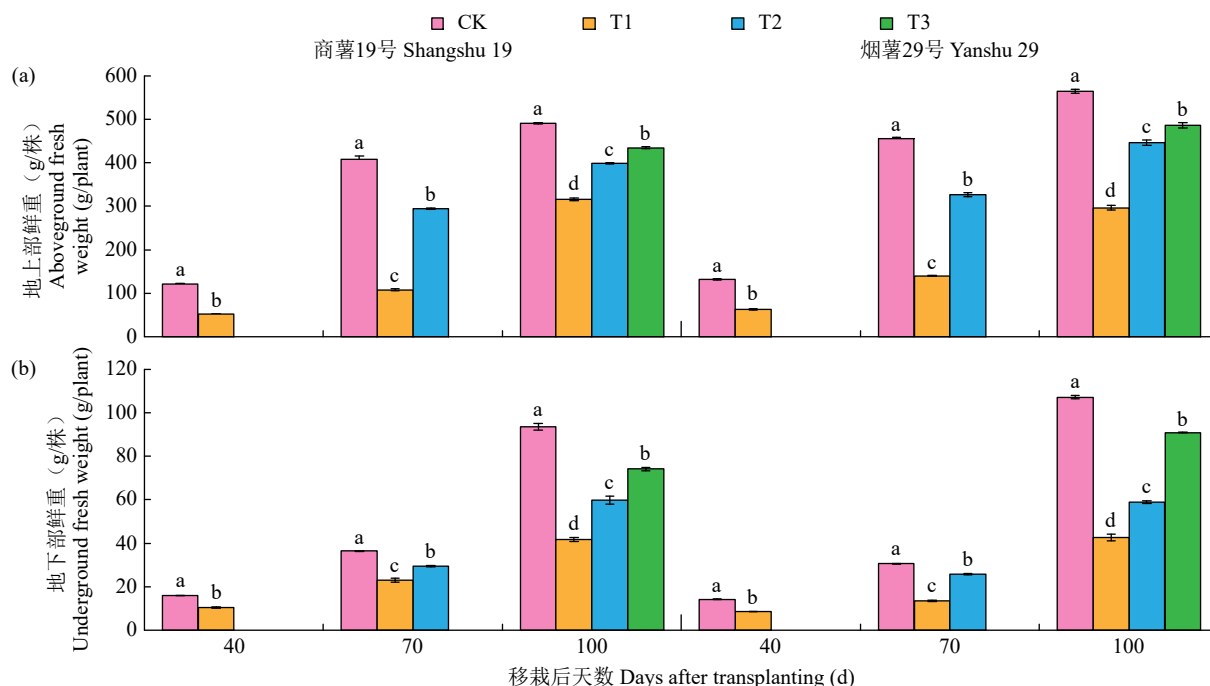
2.1 不同时期干旱对甘薯生物量的影响

2.1.1 对地上部生物量的影响 由图 1a 可以看出，不同时期干旱均造成甘薯地上部生物量下降，干旱发生越早对地上部生物量的影响越大。移栽后第 100 天的第 3 次采样结果显示，与 CK 相比，商薯 19 号 3 个处理地上部生物量分别较同时期 CK 降低 35.7%、18.7%和 11.4%；烟薯 29 号 3 个处理分别较同时期 CK 降低 47.4%、20.9%和 13.8%。2 个品种均以 T1 处理下降幅度最大，其次是 T2 处理，下降最小的是 T3 处理。这可能是早期的干旱处理，甘薯生理功能遭到了不可逆的破坏，即使后期恢复了正常浇水，但是生物量会一直处于较低水平。不同时期采样结果均显示，干旱处理甘薯地上部生物量均显著低于 CK 处理，同一时期干旱商薯 19 号地上部生物量下降的幅度小于烟薯 29 号，表明商薯 19 号的耐旱性能优于烟薯 29 号。

2.1.2 对地下部生物量的影响 由图 1b 可以看出，

不同时期干旱均造成甘薯地下部生物量下降，其表现与地上部一致。与 CK 相比，第 100 天采样时商薯 19 号 3 个处理地下部生物量分别较同时期 CK 降低 55.4%、36.1%和 20.8%；烟薯 29 号 3 个处理分别较同时期 CK 降低 60.2%、49.9%和 15.1%。2

个品种均以 T1 处理下降幅度最大，其次是 T2 处理，下降最小的是 T3 处理。不同时期采样结果均显示，干旱处理甘薯地下部生物量均显著低于 CK 处理，同一时期干旱烟薯 29 号地下部生物量下降的幅度小于商薯 19 号，表明干旱对甘薯地上部和地下部



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Different lowercase letters indicate significant difference at the $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 不同时期干旱胁迫对甘薯地上部和地下部生物量的影响

Fig.1 Effects of drought stress at different stages on biomass of aboveground and underground parts in sweet potato

生长的影响并不一致。

2.2 不同时期干旱对单株结薯数和单株结薯重的影响

由图 2 可以看出，不同时期干旱均造成甘薯单株结薯数下降。与 CK 相比，T1 处理商薯 19 号和

烟薯 29 号单株结薯数分别下降 24.1%、20.0%，T2 处理分别下降 13.8%、12.3%，T3 处理分别下降 6.9%、5.7%。不同时期干旱对 2 个甘薯品种单株结薯数均造成影响，表现为发根分枝期 > 薯蔓并长期 > 块根膨大期。烟薯 29 号的单株结薯数高于商薯

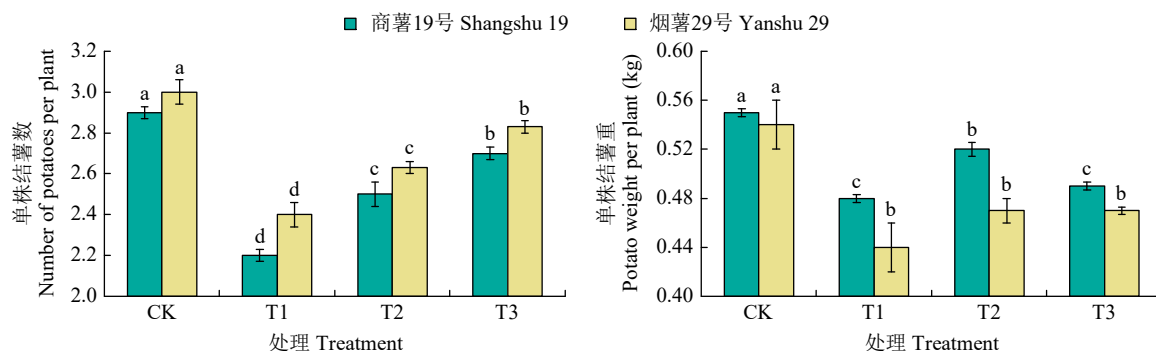


图 2 不同时期干旱对甘薯单株结薯数、单株结薯重的影响

Fig.2 Effects of drought stress at different stages on the number and weight of sweet potato per plant

19 号，说明单株结薯数与甘薯的品种特性有关。

由图 2 还可以看出，不同时期干旱造成单株结

薯重显著下降。与 CK 相比，T1 处理下商薯 19 号和烟薯 29 号单株结薯重分别下降 12.7%、18.5%，

T2 处理下分别下降 5.5%、11.6%，T3 处理下分别下降 10.9%、12.9%。不同时期干旱对 2 个甘薯品种单株结薯重的影响均表现为发根分枝期>块根膨大期>薯蔓并长期。2 个品种相比，不同时期干旱对烟薯 29 号单株薯块重的影响大于商薯 19 号。

2.3 不同时期干旱对薯干产量及淀粉率的影响

由表 2 可知，不同时期干旱胁迫均不同程度降低了鲜薯和薯干的产量，对 2 个甘薯品种鲜薯产量的影响均表现为 T2 处理最小，而 T1 处理最大。对薯干产量的影响与鲜薯产量表现并不完全一致，其中对薯干产量影响最大的均为 T1 处理，此时期干旱造成商薯 19 号和烟薯 29 号薯干产量较 CK 分别

降低 14.3%、16.3%。对商薯 19 号和烟薯 29 号薯干产量影响最小的分别为 T2 和 T3 处理，2 个甘薯品种薯干产量分别较 CK 下降 1.8%和 3.8%。不同处理下商薯 19 号的薯干产量均高于烟薯 29 号，其差异主要由于 2 个甘薯品种在不同时期的干物率不同所致。薯块的干物率代表鲜薯的含水量，干旱处理可在一定程度提升薯块的干物率，且不同时期的干旱胁迫对干物率影响不同。不同处理对 2 个甘薯品种干物率的影响均表现为 T3>T2>T1，说明干旱发生越晚薯块的干物率越高。T3 处理下商薯 19 号和烟薯 29 号干物率最高，分别达到 31.2%和 32.5%，与同时期 CK 相比，2 个甘薯品种薯块干物

表 2 不同时期干旱对薯干产量和甘薯淀粉率的影响
Table 2 Effects of drought stress in different periods on starch percentage of sweet potato

品种 Variety	处理 Treatment	鲜薯产量 Fresh potato yield (kg/hm ²)	薯干产量 Dried potato yield (kg/hm ²)	薯块干物率 Potato dry matter content (%)	薯干增产率 Yield increase (%)	淀粉率 Starch ratio (%)
商薯 19 号 Shangshu 19	CK	33 846.0±51.3a	9544.5±11.76a	28.2±0.48c	—	22.8±0.33a
	T1	28 573.5±52.6c	8172.0±11.71c	28.6±0.14c	-14.3±0.25c	20.1±0.17c
	T2	31 138.5±67.5b	9372.0±16.61ab	30.1±0.30b	-1.8±0.15a	20.2±0.27c
	T3	29 476.5±98.8bc	9196.5±5.99b	31.2±0.32a	-3.6±0.10b	21.4±0.24b
烟薯 29 号 Yanshu 29	CK	31 849.5±33.2a	9612.0±13.83a	29.9±0.31c	—	24.4±0.51a
	T1	26 547.0±54.7c	8043.0±2.80c	30.3±0.05b	-16.3±0.45c	20.4±0.17c
	T2	28 669.5±57.8b	8928.0±9.24b	30.5±0.19b	-7.1±0.32b	20.5±0.25c
	T3	28 458.0±23.2b	9249.0±5.50ab	32.5±0.32a	-3.8±0.12a	21.1±0.11b

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), the same below.

率分别提高了 10.6%和 8.7%。

由表 2 还可以看出，不同时期的干旱处理降低了 2 个甘薯品种淀粉率，其变化规律与薯块干物率表现相反。T1 处理对 2 个品种淀粉率影响最大，使商薯 19 号和烟薯 29 号淀粉率较 CK 分别减少了 11.8%、16.4%，干旱时间发生越晚影响越小。在相同处理下烟薯 29 号的干物率都高于商薯 19 号，但

淀粉率相差不大，烟薯 29 号更利于加工生产，但其薯干产量受干旱减产大于商薯 19 号。

2.4 不同时期干旱对淀粉糊化特性的影响

由表 3 可知，不同时期干旱显著影响淀粉糊化特性。除烟薯 29 号的崩解黏度外，T2 处理使商薯 19 号和烟薯 29 号的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解黏度和回生黏度均有所升高，其中商薯 19

表 3 不同时期干旱胁迫对甘薯淀粉的糊化特性的影响
Table 3 Effects of drought stress in different periods on starch pasting properties of sweet potato starch

品种 Variety	处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity (cP)	谷值黏度 Valley viscosity (cP)	崩解黏度 Breakdown (cP)	最终黏度 Final viscosity (cP)	回生黏度 Setback (cP)	糊化温度 Pasting temperature (°C)	峰值时间 Peak time (min)
商薯 19 号 Shangshu 19	CK	5550±18b	2432±25b	3118±43b	3637±21b	1175±26c	82.55±0.06a	4.67±0.04b
	T1	5541±17b	2402±17b	3139±21b	3641±11b	1239±28b	81.88±0.87b	4.56±0.06bc
	T2	5893±9a	2579±15a	3313±24a	3882±12a	1303±24a	80.27±0.64c	4.46±0.03c
	T3	5292±30c	2257±13c	3035±19c	3442±24c	1185±20c	80.33±0.60c	4.72±0.07a
烟薯 29 号 Yanshu 29	CK	5778±4b	2307±2c	3471±3b	3521±10b	1214±9c	80.25±0.43ab	4.49±0.02b
	T1	5705±26b	2416±16b	3289±13c	3656±28a	1240±43ab	80.02±0.12b	4.67±0.04a
	T2	5890±14a	2428±13a	3462±10b	3661±9a	1232±17b	80.65±0.14a	4.65±0.02a
	T3	5945±19a	2429±11a	3516±15a	3686±16a	1257±26a	79.07±0.17c	4.71±0.02a

号甘薯淀粉各黏度值达到了最大值,与 CK 相比分别增加了 6.2%、6.0%、6.3%、6.7%和 10.9%,差异显著;T3 处理则使烟薯 29 号淀粉各黏度值达到最大,与 CK 相比分别增加 2.9%、5.3%、1.3%、4.7%和 3.5%,差异显著。而商薯 19 号则造成除回生黏度外的各黏度值显著降低,与 CK 相比分别降低 4.6%、7.2%、2.7%、5.4%和 0.9%;T1 处理则对 2 个甘薯品种的淀粉各黏度值影响较小。由表 3 可知,不同时期干旱胁迫会使淀粉糊化温度降低,干旱越晚,降低越多,对峰值时间影响无明显规律。

3 讨论

3.1 不同时期干旱对甘薯生长发育的影响

干旱胁迫已成为限制甘薯产量提高的主要因素,在我国北方地区,季节性干旱造成的减产已成为我国甘薯生产面临的重要问题^[8,20]。已有研究^[8,10,13]表明,甘薯对不同生育时期干旱表现的敏感程度存在差异,以生育前期对干旱的表现最为敏感,此时期干旱可降低甘薯发根速度、减少发根数量使茎蔓生长减缓,造成地上部生物量减少和叶面积下降;中期干旱可导致根系活力下降,对养分的吸收减少,抑制地上部和地下部的生长量;后期干旱则主要影响光合产物在甘薯体内的运输,影响地下部块根的膨大。这主要是因为前期和中期干旱甘薯茎叶生长发育受抑制,光合能力减弱,同化产物合成与运输减缓,导致甘薯生物量下降^[21]。而后期干旱则使甘薯功能叶和纤维根均受到不同程度破坏,细胞膜透性增大了渗透调节物质的积累,破坏了生理代谢平衡,限制了营养物质的合成和向块根的转运,导致地下部生物量下降^[22]。本试验中不同时期干旱胁迫均导致地上部和地下部生物量显著降低,2 个品种均以发根分枝期干旱下降幅度最大,其次是薯蔓并长期和块根膨大期,这与前人^[8,10,13]研究结果一致。本试验还发现,在早期发根分枝期和中期薯蔓并长期干旱后再进行恢复浇水,后续的地上部和地下部的生长量并不能恢复到正常水平,复水仍不足以弥补干旱胁迫的伤害,干旱发生越早差别越显著。2 个品种相比,商薯 19 号的生产量下降幅度更小一些,抗旱能力强于烟薯 29 号,因此在干旱地区可考虑选种商薯 19 号。

3.2 不同时期干旱对甘薯产量形成及淀粉率的影响

甘薯块根的生长及最终产量形成主要依靠地上叶片的光合作用^[21]。如果前期和中期受旱,甘薯

茎叶生长发育受抑制,块根分化数量减少,从而导致甘薯结薯数下降,产量基础变得薄弱造成减产^[9,21]。薯蔓并长期是甘薯生理代谢最快的时期,此时期的干旱可影响甘薯根系对养分的吸收,抑制茎叶快速生长与干物质积累,营养物质合成及运输受阻,造成甘薯产量下降。后期干旱则易造成纤维根功能退化,甘薯功能叶早衰,光合能力下降和营养物质合成减少,此时期干旱还易造成土壤机械阻力增大,从而影响块根的膨大^[13,22]。本试验表明,不同时期的干旱均使甘薯产量不同程度下降,其中发根分枝期对单株结薯数和单株薯块重影响均为 3 个时期最大,中期干旱对单株结薯重影响最小。早期的干旱胁迫使根系分化为块根数量已经固定,即使后期复水,块根产量依旧无法达到正常水平,说明早期干旱胁迫造成的损伤是一直存在的。本研究中不同时期干旱均使淀粉率不同程度下降,其中 T1 处理降幅最大, T2 和 T3 降幅较小且差异不明显,推测可能是干旱持续时间较短及中后期的植株抗逆性和修复能力的增强使其影响较小,研究结果与张海燕等^[8]研究一致。李鑫^[23]研究也表明,干旱胁迫下粉葛的含水率和淀粉含量降低,干物率提升,可溶性糖含量增加,可应对干旱造成的渗透胁迫。干旱时间发生越早对甘薯淀粉率影响越大,且复水后依旧无法恢复,干旱使薯块自由水含量下降,淀粉分解为游离糖的速率增加,薯块内各类生化反应加快均不利于淀粉的积累。

3.3 不同时期干旱对淀粉糊化特性的影响

淀粉糊化特性主要包括峰值黏度、谷值黏度、崩解黏度、最终黏度、回生黏度、糊化温度和糊化时间等,是反映甘薯淀粉品质的重要指标。甘薯淀粉的峰值黏度、崩解黏度、回生黏度等与甘薯粉条品质呈正相关^[24-25]。已有研究^[26]表明,干旱胁迫可使小麦淀粉的峰值黏度、最终黏度及崩解黏度等参数增大,从而在一定程度上改善面条品质。关于干旱对小麦淀粉糊化特性的影响研究^[26-28]也表明,干旱使豫麦 34 黏度参数增大,而使豫麦 50 峰值黏度、回生黏度和崩解黏度下降;谷值黏度和最终黏度在灌浆前期和中期干旱胁迫下增大,后期干旱胁迫则明显下降。有研究^[29]表明,小麦花后 15 d 实施干旱胁迫会降低直链淀粉含量和糊化温度,但提高了峰值黏度、最终黏度和回生黏度。本试验显示,不同时期干旱在一定程度上增加了甘薯淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解黏度和回生黏度,

降低糊化温度,且中后期干旱对糊化特性的影响大于发根分枝期。主要因为前期为甘薯地下部纤维根发育和块根分化时期,光合作用形成的营养物质在根部积累少,因此受干旱胁迫的影响较小。而对于2个甘薯品种而言,商薯19号在前2个时期受到干旱均能增加其淀粉黏度参数,在薯蔓并长期干旱时达到最大,而块根膨大期干旱则表现出降低。烟薯29号淀粉黏度参数则在后期块根膨大时干旱达到最大值,可见干旱对甘薯淀粉糊化特性的影响还存在显著的基因型差异,这可能和品种应对干旱逆境做出的反应有关,不同甘薯品种对干旱胁迫的响应机理有待进一步研究。

4 结论

不同时期干旱胁迫均导致甘薯生物量和产量显著降低,发根分枝期干旱对甘薯地上和地下部生物量及块根产量的影响最大。不同时期干旱会降低薯块的含水率和淀粉率,提高干物率,干旱发生时间越晚影响越显著。块根膨大期干旱使甘薯块根干物率和淀粉率达到了最大,从生物量和薯干产量的表现看,商薯19号的耐旱性能优于烟薯29号。

不同时期干旱会显著影响甘薯淀粉的糊化特性。在甘薯生长中、后期干旱可使甘薯淀粉峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解黏度和回生黏度升高,降低淀粉的糊化温度,对峰值时间无明显影响。商薯19号和烟薯29号的各黏度值分别在薯蔓并长期和块根膨大期达到最大。

参考文献

- [1] 王欣,李强,曹清河,等.中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望.中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [2] Food and Agriculture Organization. FAOSTAT agriculture data. (2022-03-10) [2023-02-20]. <http://www.fao.org/faostat/en>.
- [3] 陈喜,陆建珍,汪翔,等.中国甘薯生产布局变迁及动因分析.中国农业资源与区划,2022,43(2):1-12.
- [4] 沈升法,项超,吴列洪,等.浙江省甘薯种质资源的品质鉴定与聚类分析.植物遗传资源学报,2021,22(1):247-259.
- [5] 张超,柳平增.我国甘薯市场与产业调查分析报告.农产品市场,2021(20):50-51.
- [6] 井水华.鲁南丘陵旱薄地甘薯高产高效栽培技术研究.泰安:山东农业大学,2016.
- [7] Babajide O O, Patrick O A, David M, et al. Greenhouse and field evaluation of selected sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) LAM] accessions for drought tolerance in South Africa. American Journal of Plant Sciences, 2014, 5(21): 3328-3339.
- [8] 张海燕,段文学,解备涛,等.不同时期干旱胁迫对甘薯内源激素的影响及其与块根产量的关系.作物学报,2018,44(1):126-136.
- [9] 王金强,李欢,刘庆,等.干旱胁迫对甘薯苗期根系分化和生理特性的影响.应用生态学报,2019,30(9):3155-3163.
- [10] 李长志,李欢,刘庆,等.不同生长时期干旱胁迫甘薯根系生长及荧光生理的特性比较.植物营养与肥料学报,2016,22(2):511-517.
- [11] 张海燕,解备涛,段文学,等.不同时期干旱胁迫对甘薯光合效率和耗水特性的影响.应用生态学报,2018,29(6):1943-1950.
- [12] Roy C, Remya M, Subha S, et al. Growth dry-matter partitioning and yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as influenced by soil mechanical impedance and mineral nutrition under different irrigation regimes. Advances in Horticultural Science, 2002, 16(1): 25-29.
- [13] 王金强,李欢,刘庆,等.干旱胁迫下喷施外源植物激素对甘薯生理特性和产量的影响.应用生态学报,2020,31(1):189-198.
- [14] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等.施钾对甘薯常规品质性状及其淀粉RVA特性的影响.浙江农业学报,2011,23(1):46-51.
- [15] 冯玉钊.土壤含水量对马铃薯淀粉形成及产量的影响.大庆:黑龙江八一农垦大学,2015.
- [16] 张瑞栋,高铭悦,岳忠孝,等.灌浆期不同阶段干旱对高粱籽粒淀粉积累的影响.作物杂志,2021(4):172-177.
- [17] 苗建利,王晨阳,郭天财,等.高温与干旱互作对两种筋力小麦品种籽粒淀粉及其组分含量的影响.麦类作物学报,2008,28(2):254-259.
- [18] 宋霄君,张敏,武雪萍,等.干旱胁迫对小麦不同品种胚乳淀粉结构和理化特性的影响.中国农业科学,2017,50(2):260-271.
- [19] Zhang T, Wang Z, Yin Y, et al. Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 196(1): 1-8.
- [20] 孙哲,史春余,刘桂玲,等.干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异.植物营养与肥料学报,2016,22(4):1071-1078.
- [21] 许育彬,陈越,付增光.甘薯的抗旱生理及栽培技术研究进展.干旱地区农业研究,2004(1):128-131.
- [22] 张海燕,汪宝卿,冯向阳,等.不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响.作物学报,2020,46(11):1760-1770.
- [23] 李鑫.干旱胁迫下粉葛根细胞淀粉粒积累及葛藤逆境生理响应.贵阳:贵州大学,2021.
- [24] 余树玺,邢丽君,木泰华,等.4种不同甘薯淀粉成分、物化特性及其粉条品质的相关性研究.核农学报,2015,29(4):734-742.
- [25] 王晨阳,何英,方保停,等.小麦籽粒淀粉合成、淀粉特性及其调控研究进展.麦类作物学报,2005,25(1):109-114.
- [26] 王晨阳,冀天会,郭天财,等.干旱胁迫对春小麦淀粉糊化特性的影响.河南农业科学,2008(8):32-37.
- [27] 苗建利.高温与干旱胁迫对小麦籽粒GBSS活性、淀粉品质及产量的影响.郑州:河南农业大学,2008.
- [28] 王晨阳,苗建利,张美微,等.高温、干旱及其互作对两个筋力小麦品种淀粉糊化特性的影响.生态学报,2014,34(17):4882-4890.
- [29] Sandeep S, Gurpreet S, Prabhjeet S, et al. Effect of water stress at different stages of grain development on the characteristics of starch and protein of different wheat varieties. Food Chemistry, 2008, 108(1): 130-139.

Effects of Drought in Different Periods on Yield Formation and Starch Gelatinization Characteristics of Starchy Sweet Potato

Chen Biwei¹, Ju Xikai¹, Sun Yiming¹, Li Qinghua², Liu Qing¹, Zeng Lusheng¹

(¹College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China;

²Qingdao Shengtang Agricultural Technology Limited Company, Qingdao 266109, Shandong, China)

Abstract In order to study the effects of drought treatment in different periods on the yield formation and starch gelatinization characteristics of starchy sweet potatoes, four different periods of drought were set up under controlled water conditions for the starchy sweet potato varieties Shangshu 19 and Yanshu 29, the root development and branching period (early stage), the vine development period (middle stage), the tuber expansion period (late stage) and normal watering during the whole reproductive period (CK). The results showed that the shoot biomass of Shangshu 19 were reduced by 35.7%, 18.7% and 11.4%, respectively, and the root biomass were reduced by 55.4%, 36.1% and 20.8%, respectively, compared with the CK in different periods of drought treatment. The shoot biomass of Yanshu 29 were reduced by 47.4%, 20.9% and 13.8%, respectively, and the root biomass were reduced by 60.2%, 49.9% and 15.1%, respectively. Compared with the control, drought in different periods made sweet potato yield reduction, the yield of dried sweet potatoes decreased with 14.3%, 1.8% and 3.6% for Shangshu 19, and 20.0%, 6.9% and 5.7% for Yanshu 29. Drought stress in different periods could reduce the starch yield and increase the dry matter yield, and the dry matter yield of potato was the highest during the root expansion period, which were increased by 10.6% and 8.7% compared with the CK for Shangshu 19 and Yanshu 29, respectively. The starch content of root initiation stage was the lowest, which were 11.8% and 16.4% lower than that of the CK in Shangshu 19 and Yanshu 29, respectively. Drought stress affected starch gelatinization characteristics in different periods, and drought at the middle and late stages could improve starch quality, but persistent drought significantly reduced starch gelatinization parameters.

Key words Starchy sweet potato; Dry period; Yield; Starch; Pasting properties