

干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗内源激素含量的影响

苏亚拉其其格¹, 樊明寿², 贾沙沙², 孔 硕², 贾立国²

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:为深入了解马铃薯抗旱机制, 选用马铃薯品种夏坡蒂和根优 2 号, 研究了干旱胁迫对移栽马铃薯组培苗(移栽苗)块茎形成及其内源激素含量的影响。结果表明: 基质相对含水量为 50% 对移栽苗的生长及块茎形成产生抑制作用, 其单株薯数、薯重、结薯植株率和整株干物质质量均显著低于 65% 处理, 但其地下部干物质分配比例较 65% 处理高 31.75%~36.42% (移栽后 55 d); 块茎形成过程中, 匍匐茎 GA 含量、GA/IAA、ZR/IAA、GA/(IAA+ZR) 值均为 50% 处理下明显低于 65% 处理, 分别降低 7.45%、26.67%、26.67% 和 23.08%; 而茎与匍匐茎 IAA 含量则在 50% 处理下较高。各器官 IAA 含量随着块茎形成表现为先降后升, 但 GA/IAA、ZR/IAA 和 GA/(IAA+ZR) 值则先增加后降低。块茎形成进程中, 干旱胁迫在植株内部建立新的激素平衡, 这可能是激素介导干旱信号影响马铃薯块茎形成的内因之一。

关键词: 干旱胁迫; 马铃薯; 移栽组培苗; 激素含量

中图分类号: S532 **文献标志码:** A

Effects of drought stress on endogenous hormone content in transplanted tissue culture potato seedlings

Suyala Qiqige¹, Fan Ming-shou², Jia Sha-sha², Kong Shuo², Jia Li-guo²

(1. College of Grassland, Resource, and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of potato responses to drought stress, we used cultivars Shepody and Genyou No. 2 as experimental materials to investigate tuber formation and its endogenous hormone contents under drought stress in this study. The results showed that 50% mediumrelative water content exhibited negative effects on potato plant growth and tuberization, its tubers number and weight of per plant, the rate of potato-bearing plants and dry matter of whole plant were significantly lower than 65% mediumrelative water content, but with higherdistribution of dry matter in underground parts, increased by 31.75~36.42% (after transplanted 55 d) than 65%. In the process of tuberization, the GA content and GA/IAA, ZR/IAA, GA/(IAA+ZR) ratio in stolon under 50% treatment were significantly lower than that under 65% treatment, lowered by 7.45%, 26.67%, 26.67% and 23.08% respectively; but the IAA contentsin stem and stolon were higher in 50% mediumrelative water content, increased by 1.67% and 22.25% respectively. The IAA content in all organs decreased firstly and then increased, but the ratios of GA/IAA, ZR/IAA, and GA/(IAA+ZR) increased first and then decreased during tuberization. It is revealed that drought stress may induce new hormone balance in transplanted potato seedlings during tuber formation process, which might be an important mechanism of endogenous hormones as a signal in potato's response to drought stress.

Keywords: drought stress; potato; transplanted tissue culture seedling; endogenous hormones content

马铃薯的经济器官是块茎, 块茎的形成数量和重量是构成马铃薯产量的重要因素, 显著影响其产

收稿日期: 2017-12-27

修回日期: 2018-01-25

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2018BS03002; 2018MS03018); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划(NJYT-17-B20)

作者简介: 苏亚拉其其格(1988-), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 讲师, 主要从事植物营养生理的研究。E-mail: qiqige608@163.com

通信作者: 贾立国(1982-), 男, 内蒙古武川人, 副教授, 主要从事马铃薯水分及营养生理的研究。E-mail: njndjialiguo@163.com

量高低^[1-2]。内蒙古作为中国马铃薯主产区,降水少、蒸发大,加之气候干燥,易造成干旱胁迫,使得块茎数量和重量下降,产量较低。因此,研究干旱胁迫影响马铃薯块茎形成的生理机制,采取合理措施缓解干旱胁迫对块茎形成的抑制作用,对马铃薯高产稳产具有重要意义。

研究表明,植物内源激素与抗旱性相关^[3]。在土壤水分亏缺时,植物内源激素含量及其平衡会发生一系列变化,多种内源激素以相当复杂的方式协调作用,共同响应环境胁迫^[4-5]。不同激素对马铃薯块茎形成和发育产生的效果不同。业已证明,赤霉素(GA)在块茎形成过程中起抑制或延迟的作用^[6]。有报道提出细胞分裂素类(CTK)可促进马铃薯块茎和匍匐茎形成^[7],但也有研究提出CTK对块茎形成不具有促进作用,ZT(玉米素)在低浓度时对块茎形成没有影响,较高浓度的ZT和ZR(玉米素核苷)还会抑制离体块茎形成^[8-9]。生长素在块茎形成过程中的作用,现有的研究结果也不尽一致。胡云海认为块茎形成过程中生长素具有显著的促进作用,有利于增加试管薯的数量和重量^[10],而Kumar报道大于 $5 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的生长素对块茎形成有抑制作用^[11],还有报道认为生长素对试管薯的形成没有诱导作用^[12]。综上所述,三种激素对马铃薯块茎形成中的作用结论不一,这可能是由于块茎的形成并不是由某种单一激素所调控,而是多种激素相互协调的结果。目前较为一致的看法是马铃薯块茎形成受多种激素综合调节,而外界因素通过刺激植株体内激素成分和比例发挥作用^[12]。

本课题组前期试验结果表明,苗期最适土壤相对含水量下限为55%,适度水分亏缺利于马铃薯合理的物质分配,并通过控制结薯数和块茎重量产生增产效应,但是具体的机制尚不清楚^[13-14]。基于此,本文选用抗旱性不同的马铃薯品种,出苗后至收获期设置不同水分处理,测定其块茎形成过程中GA、ZR和IAA含量变化,分析其变化规律和补偿效应,旨在为了解干旱条件下激素调控块茎形成的机理和节水灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

2016年7-9月在内蒙古农业大学教学农场的塑料大棚内进行桶栽试验。栽培基质为蛭石,塑料盆体积为3 L,每盆装蛭石1.5 kg,供试品种为夏坡蒂和根优2号,均以脱毒培养25 d且生长状况相近的健壮组培苗进行移栽。

组培苗移栽时间为7月1日,移栽深度约6 cm(将根部完全掩埋),成活前统一浇水2次(移栽后7 d内),浇灌量为每盆每次300 mL;在移栽组培苗新长出2个叶片后开始进行不同干旱程度处理,根据相对土壤含水量每3~4 d浇灌1次,浇灌方式为2次营养液、1次水交替进行(表1)。

蛭石的最大持水量为192%,水分处理以最大基质持水量的50%(浮动范围:48%~52%)及65%(浮动范围:63%~67%)为干旱胁迫和充分灌溉处理。每隔2 d取基质,通过烘干法测定其实际含水量,当基质相对含水量达到设定的浮动下限时进行灌水,到达浮动上限时停止灌水。计算出灌水量后次日浇灌,尽量将基质含水量保持在设定的持水量范围内。

试验中,各处理的营养液总氮浓度均为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每处理10次重复(即10盆),每盆3株,随机排列。以 NH_4NO_3 (分析纯)作为N源,其他营养元素按照马铃薯常规营养液配方^[15]配制,即 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$ 、 $0.65 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgSO}_4$ 、 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ 、 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 。微量元素主要含 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ FeSO}_4$ -EDTA、 $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Mn}^{2+}$ 、 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ B}^{3+}$ 、 $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Zn}^{2+}$ 、 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$ 。各处理间种植措施与养分供给完全相同。

1.2 测定项目与方法

土壤含水量采用烘干称重法测定。分别在8月4日、8月14日和8月24日(即移栽后35、45 d和55 d)共取样3次。取样时,快速、准确称取0.5 g左右的活体马铃薯叶片、茎、根、匍匐茎与块茎,放到液氮中速冻,保存在 -70°C 的冰箱中,用于激素测定。叶片选用倒四叶片;根选取根尖部位、根中间部位以及根底部;块茎形成前的匍匐茎取其顶端1~2 cm处,块茎形成后则选取已结薯的匍匐茎顶端。取样后,将植株分成根、茎、叶、块茎几部分,洗净测定鲜重,统计单株结薯数量,并测定单个薯重,然后将各部分放入烘箱, 105°C 杀青30 min, 80°C 继续烘24 h,称干重。

表 1 试验处理

Table 1 Experiment treatments

水分处理 Water treatment	浇灌总量/(mL·盆 ⁻¹) Total irrigation amount /(mL·pot ⁻¹)	浇灌次数 Irrigation times	
		营养液 Nutrient Solution	水 Water
50%	3244	9	5
65%	4160	9	5

马铃薯整株干物质积累量(g)为根、茎、叶、块茎的干物质积累量总和。激素含量测定:采用酶联免疫吸附测定法^[16](ELISA)测定了马铃薯各器官中的 ABA、GA、IAA、ZR 含量。logit 曲线用于 ELISA 结果计算。激素标样各浓度($\text{ng} \cdot \text{ml}^{-1}$)的自然对数表示的是曲线的横坐标,而各浓度显色值的 logit 值表示曲线纵坐标。Logit 值的计算方法为如下:

$$\text{Logit}(B/B_0)=\ln \frac{B/B_0}{1-B/B_0}=\ln \frac{B}{B_0-B}$$

其中, B_0 表示 $0 \text{ ng} \cdot \text{ml}^{-1}$ 孔的吸光值,B 则表示测定样品的吸光值。可根据待测样品吸光值的 logit 值从图上查出其所含激素浓度的自然对数,其反对数即为其激素的浓度。求得植株样品中激素浓度后,再进一步计算出样品中激素的含量($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \text{Fw}$)。

1.3 数据分析

用 SPSS 统计分析软件处理试验数据,采用最小显著极差法比较处理间差异。

2 结果与分析

不同水分处理下,组培苗移栽后 35 d 均无块茎形成;移栽后 45 d 时,65%处理下的马铃薯植株形成块茎,而 50%处理下仍未出现块茎;移栽后第 55 天,两个品种均已开始结薯,说明进入了马铃薯块茎形成期。

2.1 干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗块茎数量及重量的影响

移栽后 45 d 的马铃薯夏坡蒂、根优 2 号品种单株块茎数及块茎重在处理间均无差异,而结薯率在 50%处理下低于 65%处理;移栽后 55 d,各指标均在相对含水量 50%处理下显著低于 65%处理,持续干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗的块茎发育产生了抑制作用(表 2)。

2.2 干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗生物量的影响

马铃薯生长前期干旱处理间叶片、茎、根和整株的干物质积累量变化规律相同,均表现为土壤含水量 50%处理低于 65%处理,而其块茎干物质质量无差异。从物质分配规律分析,常规品种(夏坡蒂)的地下部干物质分配比例在 50%水分供应下显著高于 65%,其地上部干物质分配比则在 50%处理下明显较小;而抗旱性品种(根优 2 号)的物质分配结果与其不相一致,移栽后 55 d(即块茎开始形成时)50%水分处理下的地下部干物质分配比显著低于 65%,而地上部物质分配比例在 50%水分处理下较高,说明干旱条件下干物质在地上与地下部的分配量大小因马铃薯品种抗旱性能不同而异(表 3)。

表 2 不同水分胁迫对马铃薯块茎数、块茎重及结薯率的影响

Table 2 Effects of different treatments on potato tuber number, weight and percentage of plants with tubers

品种 Cultivar	测定指标 Measured parameter	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted	
			45	55
夏坡蒂 Shepody	块茎数/(个·株 ⁻¹) Tubers number/(per palnt)	50	0.00a	0.10b
		65	0.07a	0.47a
	块茎重/(g·株 ⁻¹) Tuber weight	50	0.00a	0.04b
	/(g·plant ⁻¹)	65	0.01a	0.60a
	植株结薯率/% Tuberization ratio	50	0.00b	10.00b
		65	6.67a	46.67a
根优 2 号 Genyou 2	块茎数 Tuber numbers	50	0.00a	0.07b
		65	0.03a	0.57a
	块茎重/(g·株 ⁻¹) Tuber weight	50	0.00a	0.01b
	/(g·plant ⁻¹)	65	0.04a	0.56a
	植株结薯率/% Tuberization ratio	50	0.00b	16.67b
		65	3.33a	56.67a

注:不同处理间不同字母在 0.05 水平上差异显著。下同。
Note: different letters following the values mean significantly different at $P<0.05$. The same below.

表 3 不同水分胁迫下马铃薯植株干物质积累量及其分配比例的变化

Table 3 Changes on dry matter accumulation and its distribution ratio of potato plant

品种 Cultivar	测定指标 Measuredparameter	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	整株干物质量 /(g·株 ⁻¹) Dry matter of whole plant	50	0.20a	0.28b	0.31b
	/(g·plant ⁻¹)	65	0.42a	0.80a	0.94a
	地上部分分配比 Ratio for the above ground part/%	50	85.00a	71.43b	70.97b
		65	88.10a	86.25a	78.72a
	地下部分分配比 Ratio for the under ground parts/%	50	15.00a	28.57a	29.03a
		65	11.90b	13.75b	21.28b
根优 2 号 Genyou 2	整株干物质量 /(g·株 ⁻¹) Dry matter of whole plant	50	0.11a	0.23b	0.28b
	/(g·plant ⁻¹)	65	0.38a	0.71a	1.19a
	地上部分分配比 Ratio for the above ground part/%	50	81.82b	82.61a	82.14a
		65	88.84a	83.10a	76.47b
	地下部分分配比 Ratio for the under ground part/%	50	18.18a	17.39a	17.86b
		65	11.16b	16.90a	23.53a

2.3 干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗内源激素含量的影响

2.3.1 GA 含量的变化 不同水分处理对马铃薯植株叶片、茎与块茎中的 GA 含量无显著影响;而夏坡

蒂块茎移栽后 35 d 和 45 d 时,匍匐茎 GA 含量在 50%水分供应条件下显著低于 65%处理,块茎形成时(移栽后 55 d)两种水分处理下无显著差异;根优 2 号品种匍匐茎 GA 含量只在移栽后 35 d 时 50%水分处理下低于 65%处理,后期(移栽后 45 d 和 55 d)均无显著差异(表 4)。

2.3.2 IAA 含量的变化 两个马铃薯品种在不同水分处理下,其叶片 IAA 含量变化相反;移栽后 35 d 和 45 d 时,夏坡蒂品种的叶片 IAA 含量在 50%处理下明显高于 65%处理,而根优 2 号品种反之。马铃薯块茎形成(移栽后 35~55 d)过程中,土壤含水量 50%处理下的马铃薯茎、匍匐茎 IAA 含量显著高于 65%处理;两种水分处理对马铃薯块茎中 IAA 含量无显著影响(表 5)。

2.3.3 ZR 含量的变化 组培苗移栽后 35~55 d,2 种水分处理下马铃薯 2 个品种的各器官 ZR 含量变化不尽一致。移栽后 35 天,夏坡蒂叶、茎、匍匐茎 ZR 含量无显著差异,而根优 2 号的匍匐茎 ZR 含量在 50%处理下显著低于 65%;移栽后 45 d,叶片 ZR 含量在 50%处理下明显高于 65%,茎中 ZR 含量则无显著差异,而两个品种匍匐茎 ZR 含量结果不一致,夏坡蒂在不同水分处理下无显著差异,根优 2 号 50%水分处理下高于 65%;移栽后 55 d,夏坡蒂茎、块茎 ZR 含量均为 50%处理的显著高于 65%,而根优 2 号不存在显著差异(表 6)。

表 4 不同水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 GA 含量的影响/(ng·g⁻¹)

Table 4 The effects of water stress on the content of GA before and after tuberization in potato

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数 Days after transplanted/d		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	8.89a	7.06a	6.91a
		65	8.09a	6.13a	7.17a
	茎 Stem	50	6.77a	8.67a	8.76a
		65	6.78a	7.32a	8.17a
	匍匐茎 Stolon	50	5.44b	5.46b	6.93a
		65	6.86a	7.31a	6.04a
	块茎 Tuber	50	—	—	5.66a
		65	—	—	4.96a
根优 2 号 Genyou 2	叶 Leaf	50	6.26a	5.96a	7.75a
		65	6.88a	6.52a	7.18a
	茎 Stem	50	6.46a	5.58a	7.73a
		65	5.51a	7.18a	6.13a
	匍匐茎 Stolon	50	6.54b	6.77a	5.89a
		65	7.20a	5.93a	6.45a
	块茎 Tuber	50	—	—	7.07a
		65	—	—	7.25a

表 5 水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 IAA 含量的影响/(ng·g⁻¹)

Table 5. The effects of water stress on the content of IAA in the process of potato tuberization

品种 Cultivars	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数 Days after transplanted/d		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	118.03a	91.38a	113.51a
		65	89.36b	40.77b	112.56a
	茎 Stem	50	73.90b	96.39a	150.45a
		65	107.54a	93.44b	112.00b
	匍匐茎 Stolon	50	49.66a	39.80a	54.09a
		65	46.99b	30.05a	31.69b
	块茎 Tuber	50	—	—	30.13a
		65	—	—	28.60a
根优 2 号 Genyou 2	叶 Leaf	50	61.24b	34.70b	55.17a
		65	66.30a	43.68a	49.91b
	茎 Stem	50	45.70b	53.09a	45.51a
		65	68.59a	39.63b	51.57a
	匍匐茎 Stolon	50	64.61a	26.81b	33.98a
		65	44.61b	34.70a	31.99b
	块茎 Tuber	50	—	—	33.41a
		65	—	—	32.00a

表 6 水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 ZR 含量的影响/(ng·g⁻¹)

Table 6 The effects of water stress on the content of ZR during potato tuberization

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water Treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	10.76a	9.62a	9.25b
		65	12.66a	7.73b	12.00a
	茎 Stem	50	6.75a	9.05a	9.74a
		65	8.52a	10.12a	6.88b
	匍匐茎 Stolon	50	4.81a	6.05a	6.24a
		65	6.42a	6.80a	6.86a
	块茎 Tuber	50	—	—	6.10a
		65	—	—	5.29b
根优 2 号 Genyou 2	叶 Leaf	50	8.15a	7.87a	8.21a
		65	8.04a	6.51b	9.75a
	茎 Stem	50	7.80a	6.58a	6.43a
		65	5.82a	6.98a	6.83a
	匍匐茎 Stolon	50	5.26b	7.82a	6.08a
		65	7.14a	5.86b	6.38a
	块茎 Tuber	50	—	—	6.96a
		65	—	—	6.69a

2.4 干旱胁迫对马铃薯内源激素比例的影响

2.4.1 GA/IAA 值 块茎形成过程中,不同处理下,各器官中的 GA/IAA 值变化范围在 0.06~0.24;50%水分处理下马铃薯匍匐茎 GA/IAA 比值明显低于 65%处理;叶和块茎中 GA/IAA 值无显著差异。而茎中变化因品种而异,不同水分处理下,夏坡蒂茎 GA/IAA 值无显著差异,而根优 2 号在移栽 35 d 时 50%处理显著高于 65%,移栽 45 d 时 50%处理下较低,移栽 55 d 时两个处理间不存在显著差异(表 7)。

表 7 不同水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 GA/IAA 值的影响

Table 7 The effects of different water stress on the ratio of GA/IAA during potato tuberization

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	0.08a	0.08b	0.06a
		65	0.09a	0.15a	0.06a
	茎 Stem	50	0.09a	0.09a	0.06a
		65	0.06a	0.08a	0.07a
	匍匐茎 Stolon	50	0.11b	0.14b	0.13b
		65	0.15a	0.24a	0.19a
根优 2 号 Genyou 2	块茎 Tuber	50	—	—	0.19a
		65	—	—	0.17a
	叶 Leaf	50	0.10a	0.17a	0.14a
		65	0.10a	0.15a	0.14a
	茎 Stem	50	0.14a	0.11b	0.17a
		65	0.08b	0.18a	0.12a
	匍匐茎 Stolon	50	0.10b	0.25a	0.17b
		65	0.16a	0.17b	0.20a
	块茎 Tuber	50	—	—	0.21a
		65	—	—	0.23a

2.4.2 GA/ZR 值 块茎形成过程中,2 种水分处理下不同马铃薯品种的叶、茎、匍匐茎 GA/IAA 值变化规律不同。移栽后 35 d,夏坡蒂品种三个器官中 GA/IAA 值为 50%处理下显著高于 65%,而根优 2 号品种叶、茎 GA/IAA 值无显著差异;块茎开始形成(移栽后 55 d)时,夏坡蒂品种茎 GA/IAA 值在 50%水分处理下明显低于 65%处理,匍匐茎中比值则在 50%处理下较高;而根优 2 号茎 GA/IAA 值为 50%处理显著高于 65%处理,匍匐茎中的比值在不同水分处理间无显著差异。干旱胁迫对两个马铃薯品种块茎 GA/IAA 值均无显著影响(表 8)。

2.4.3 ZR/IAA 值 两个马铃薯品种茎、块茎 ZR/IAA 值在不同水分处理下无显著差异;而叶与匍匐茎中比值存在品种间差异。夏坡蒂品种叶、匍匐茎 ZR/IAA 值为 50%处理下显著低于 65%处理,随着块茎的形成各器官基本表现出先升后降趋势;根优 2 号叶、匍匐茎 ZR/IAA 值在块茎形成前(移栽后 45 d)为 50%水分处理下明显高于 65%处理,但块茎开始形成后(移栽后 55 d)叶片中变化与夏坡蒂一致,匍匐茎中无显著差异,表明不同水分处理对两个品种 ZR/IAA 值调控作用的表现不同(表 9)。

2.4.4 GA/(IAA+ZR)值 不同水分处理对马铃薯块茎形成过程中的叶、块茎 GA/(IAA+ZR)值无显著影响,随着块茎的形成叶中比值先增加后降低。夏坡蒂茎 GA/(IAA+ZR)值在两个水分处理下无显著差异,匍匐茎中比值为 50%处理下明显低于 65%处

表 8 不同水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 GA/ZR 值的影响

Table 8 The effects of water stress on the ratio of GA/ZR during potato tuberization

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	0.83a	0.73a	0.75a
		65	0.64b	0.79a	0.60b
	茎 Stem	50	1.00a	0.96a	0.90b
		65	0.80b	0.72b	1.19a
	匍匐茎 Stolon	50	1.13a	0.90b	1.11a
		65	1.07b	1.08a	0.88b
根优 2 号 Genyou 2	块茎 Tuber	50	/	/	0.93a
		65	/	/	0.94a
	叶 Leaf	50	0.77a	0.76b	0.94a
		65	0.86a	1.00a	0.74b
	茎 Stem	50	0.83a	0.85b	1.20a
		65	0.95a	1.03a	0.90b
	匍匐茎 Stolon	50	1.24a	0.87b	0.97a
		65	1.01b	1.01a	1.01a
	块茎 Tuber	50	/	/	1.02a
		65	/	/	1.08a

表 9 不同水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 ZR/IAA 值的影响

Table 9 The effects of different water stress on the ratio of ZR/IAA during potato tuberization

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	0.09b	0.11b	0.08b
		65	0.14a	0.19a	0.11a
	茎 Stem	50	0.09a	0.09a	0.06a
		65	0.08a	0.11a	0.06a
	匍匐茎 Stolon	50	0.10b	0.15b	0.12b
		65	0.14a	0.23a	0.22a
根优 2 号 Genyou 2	块茎 Tuber	50	—	—	0.20a
		65	—	—	0.18a
	叶 Leaf	50	0.13a	0.23a	0.15b
		65	0.12a	0.15b	0.20a
	茎 Stem	50	0.17a	0.12a	0.14a
		65	0.08b	0.18a	0.13a
	匍匐茎 Stolon	50	0.08b	0.29a	0.18a
		65	0.16a	0.17b	0.20a
	块茎 Tuber	50	—	—	0.21a
		65	—	—	0.21a

理;而根优 2 号,块茎开始形成时(移栽后 55 d)茎 GA/(IAA+ZR)值在 50%水分处理下显著高于 65%处理,匍匐茎中的比值则无显著差异(表 10)。

3 结论与讨论

蛭石条件下培养的马铃薯移栽组培苗(移栽苗),在基质相对含水量为 50%时已受到严重胁迫,

表 10 不同水分胁迫对马铃薯块茎形成过程中 GA/(IAA+ZR) 值的影响

Table 10 The effects of different water stress on the ratio of GA/(IAA+ZR) during potato tuberization

品种 Cultivar	器官 Organ	水分处理/% Water treatment	移栽后天数/d Days after transplanted		
			35	45	55
夏坡蒂 Shepody	叶 Leaf	50	0.07a	0.07b	0.06a
		65	0.08a	0.13a	0.06a
	茎 Stem	50	0.08a	0.08a	0.05a
		65	0.06a	0.07a	0.07a
	匍匐茎 Stolon	50	0.10b	0.12b	0.11b
		65	0.13a	0.20a	0.16a
根优 2 号 Genyou 2	块茎 Tuber	50	—	—	0.16a
		65	—	—	0.15a
	叶 Leaf	50	0.09a	0.14a	0.12a
		65	0.09a	0.13a	0.12a
	茎 Stem	50	0.12a	0.09b	0.15a
		65	0.07b	0.15a	0.10b
	匍匐茎 Stolon	50	0.09b	0.20a	0.15a
		65	0.14a	0.15b	0.17a
	块茎 Tuber	50	—	—	0.18a
		65	—	—	0.19a

从而对其生长发育及块茎形成造成了一定的负效应,块茎的形成及生物量的积累均低于 65% 的处理。在整个干旱胁迫处理过程中,移栽苗的各内源激素含量的变化有差异,GA 与 ZR 含量的变化幅度极小,分别是 $4.96 \sim 8.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.81 \sim 12.60 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;而 IAA 含量的变化幅度较大,为 $26.81 \sim 150.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,明显大于 GA 和 ZR 含量的变化范围。植物激素在植物体内扮演多重功能,IAA 可能促进块茎形成^[10],GA 则会抑制块茎形成^[6]。本研究处理条件下,匍匐茎 GA 含量在 50% 处理下显著低于 65% 处理,但茎与匍匐茎 IAA 含量在 50% 处理下较高。对于马铃薯来说,块茎是由匍匐茎顶端膨大而成^[17],匍匐茎的发育状况及其激素变化会直接影响块茎的生长发育,因此其激素含量的变化可能与块茎形成直接相关。从 GA 和 IAA 在不同水分处理的结果来看,适度干旱胁迫(最大田间持水量的 50% 处理)可能更具促进马铃薯块茎形成的潜在优势。

许多激素在植物发育和响应外界胁迫时存在互作效应^[12]。本研究条件下,马铃薯移栽组培苗匍匐茎 GA/IAA、ZR/IAA、GA/(IAA+ZR) 值均在 50% 处理下显著低于 65% 处理;且各器官 GA/IAA、ZR/IAA 和 GA/(IAA+ZR) 值均有先增加后降低趋势。这说明在块茎形成进程中,干旱胁迫可能在移栽苗

内部建立新的激素间平衡,适应干旱胁迫并继续使其生长发育。

参考文献:

- [1] 苏亚拉其其格,樊明寿,贾立国,等. 氮素形态对马铃薯块茎形成的影响及机理[J]. 土壤通报, 2015(2):509-512.
- [2] 苏亚拉其其格,秦永林,贾立国,等. 氮素形态及供应时期对马铃薯生长发育与产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(4): 619-623.
- [3] Reynolds M P, Mujeeb-Kazi A, Sawkins M. Prospects for utilizing plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought and salinity-prone environments. Ann Appl Biol [J]. Annals of Applied Biology, 2005, 146(2):239-259.
- [4] 李岩,潘海春. 土壤干旱条件下玉米叶片内源激素含量及光合作用的变化[J]. 植物生理学报, 2000, 26(4):301-305.
- [5] Lenoble M E, Spollen W G, Sharp R E. Maintenance of shoot growth by endogenous ABA: genetic assessment of the involvement of ethylene suppression [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(395):237-245.
- [6] Dick V, Struik P C. An integrated view of the hormonal regulation of the tuber formation in potato (*Solanum tuberosum* L.). [J]. Physiologia Plantarum, 2010, 75(4):525-531.
- [7] 田长恩. 植物生长调节剂在马铃薯生产中的应用[J]. 中国马铃薯, 1993,(4):223-226.
- [8] Koda Y, Okazawa Y. Detection of Potato Tuber-Inducing Activity in Potato Leaves and Old Tubers[J]. Plant & Cell Physiology, 1988, 29(6):969-974.
- [9] 宋占午. 细胞分裂素对马铃薯块茎形成的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 1992,(1):55-61.
- [10] 胡云海,蒋先明. 植物激素对微型薯形成的影响[J]. 中国马铃薯, 1992,(1):14-22.
- [11] Kumar D, Wareing P F. Studies on Tuberization of *Solanum andigena*. II. Growth Hormones and Tuberization [J]. New Phytologist, 1974, 73(5):833-840.
- [12] 刘梦芸,蒙美莲. GA3、IAA、CTK 和 ABA 对马铃薯块茎形成调控作用的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 1997,(2):16-20.
- [13] 乌兰,石晓华,杨海鹰,等. 苗期水分亏缺对马铃薯产量形成的影响[J]. 中国马铃薯, 2015,(2):80-84.
- [14] 石晓华. 非充分灌溉对滴灌马铃薯生长发育规律及养分利用效率的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.
- [15] 苏亚拉其其格. 氮素形态及其供应时期对马铃薯块茎发育的影响及机理[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
- [16] Zhao J, Li G, Yi G X, et al. Comparison between conventional indirect competitive enzyme-linked immunosorbent assay (icELISA) and simplified icELISA for small molecules[J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 571: 79-85.
- [17] 门福义,刘梦芸. 马铃薯栽培生理[M]. 北京:中国农业出版社, 1995.