

低镁胁迫对马铃薯试管苗碳水化合物 积累和分配的影响

袁剑龙¹,杨丽丽¹,王玉萍^{1,2},王瑞新¹,张绍梅¹,周晓洁¹,余斌¹,张峰¹

(1.甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室,甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:以马铃薯品种“大西洋”的试管苗为材料,在5个不同镁浓度(0、188、375、750、1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)的MS培养基上培养,20 d后测定生理和形态指标,研究了低镁胁迫对马铃薯试管苗叶绿素含量和碳水化合物积累与分配以及根系形态建成的影响。结果表明:试管苗的总叶绿素、叶绿素a(Chla)和叶绿素b(Chlb)含量以及根冠比、总根长、根表面积、根体积和侧根数均为缺镁(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理最低,分别比对照(1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)降低42.3%、40.8%和46.2%以及96.4%、63.9%、54.1%、82.4%和89.9%;平均根直径和Chla/Chlb值为缺镁处理最高,分别较对照增加16.7%和9%;茎叶中淀粉、蔗糖、果糖和可溶性糖含量以及根中蔗糖、果糖和可溶性糖含量均为缺镁处理最高,分别比对照增加了58.5%、54.8%、59.7%和25.9%以及22%、46.7%和54.7%,而根中淀粉含量为缺镁处理最低,较对照降低32.8%。相关性分析表明,马铃薯试管苗茎叶中淀粉、果糖和可溶性糖含量与镁浓度均呈显著负相关。说明缺镁影响马铃薯试管苗的光合作用和碳水化合物代谢,大量碳水化合物在茎叶中积累,向根部的运输量减少,侧根形成减少,根冠比降低,抑制根系的形态建成。低镁水平下(750 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)试管苗的叶绿素含量增加,更多的碳水化合物向根部运输,根冠比增大,促进根系的形态建成,与正常镁水平(1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)下马铃薯试管苗指标变化相同,差异不显著,表明含750 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Mg}^{2+}$ 的MS培养基适宜于马铃薯试管苗的生长和发育。

关键词:马铃薯;试管苗;低镁胁迫;根形态;碳水化合物

中图分类号:S532.01 **文献标志码:**A

Effect of the accumulation and distribution of carbohydrates of potato seedling under low magnesium stress

YUAN Jian-long¹, YANG Li-li¹, WANG Yu-ping^{1,2}, WANG Rui-xin¹, ZHANG Shao-mei¹,
ZHOU Xiao-jie¹, YU Bin¹, ZHANG Feng¹

(1. Gansu Key Laboratory of Crop Improvement and Germplasm Enhancement, Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract: Potato cultivars “Atlantic” plantlets *in vitro* were cultured on liquid MS medium with low- Mg^{2+} concentration (0, 188, 375, 750, 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). Physiological and morphological indexes were determined after 20 d culture and showed that under non- Mg^{2+} treated condition, the total chlorophyll content, chlorophyll a content and chlorophyll b content, root/shoot ratio, total root length, root surface area, root volume, lateral root number of plantlet *in vitro* were the lowest. Compared with the control, the above indexes were decreased by 42.3%, 40.8%, 46.2%, 96.4%, 63.9%, 54.1%, 82.4% and 89.9%, respectively. The average root diameter and Chla/Chlb reached the maximum level under non- Mg^{2+} treated condition and compared with the control were increased by 16.7% and 9%, respectively. The starch content in shoots and the sucrose content, fructose content and soluble sugar content in shoots and roots were highest under non- Mg^{2+} treated condition, and compared with the control these indexes were increased by 58.5%, 54.8%, 59.7%, 25.9%, 22%, 46.7% and 54.7%, respectively. The

收稿日期:2017-03-29

修回日期:2017-05-02

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0101905);甘肃省高等学校科学研究创新团队项目(20BC-17)

作者简介:袁剑龙(1990-),男,甘肃渭源人,硕士,主要从事作物遗传育种研究。E-mail: Yuanjianlonggs@163.com

通信作者:王玉萍(1974-),女,副教授,博士,主要从事植物遗传育种及逆境生理研究。E-mail: wangyp@gsau.edu.cn

starch content in roots was lowest under non-Mg²⁺ treated condition and compared with the control were decreased by 32.8%. The correlation analysis indicated that there existed a strong negative linear relationship between Mg²⁺ concentration and starch content, fructose content, soluble sugar content in shoots, respectively. These results indicated that under the treatment of Mg²⁺ deficiency, a large amount of carbohydrate was accumulated in shoots whereas less exported to roots. The lateral root number and root/shoot ratio were reduced, and the root system formation was totally inhibited. Under low Mg²⁺ concentration of 750 μmol · L⁻¹ treatment, the chlorophyll content of plantlet *in vitro* increased and more carbohydrate was translocated to roots. The root/shoot ratio increased and the root system formation was promoted. These physiological and morphological indexes under 750 μmol · L⁻¹ treatment of Mg²⁺ had no difference from that of normal Mg²⁺ treatment condition (control). The MS medium containing 750 μmol · L⁻¹ Mg²⁺ was also beneficial to growth and development of potato plantlet *in vitro*.

Key words: potato; plantlet *in vitro*; lowmagnesium stress; root morphology; carbohydrates

镁作为维持植物正常生长发育所必需的营养元素,不仅影响植物体内光合产物从源器官到库器官的运输,而且还调节碳水化合物在不同器官间的分配^[1-2]。镁是叶绿素分子结构的中心原子,参与植物体内叶绿素的生物合成^[3-4]。缺镁时,植物体内的叶绿素含量降低,影响植株的光合作用,导致光合产物减少,同时引起大量碳水化合物在叶中积累,尤其是蔗糖和淀粉,引发光合作用反馈调节,使得植物光合速率下降,碳固定减少^[5-7];缺镁还导致植物源器官(叶)光合产物的韧皮部输出受抑制,这种抑制作用不仅减少碳水化合物从叶向库器官(根和种子、块茎等)的转运,还会影响库器官的大小和数量^[8]。由于镁是可移动元素,植物苗期吸收的镁含量基本决定了植株中镁的最终含量,苗期光合作用形成的碳水化合物向根系的运输决定了根系的发育和形态建成,所以苗期的镁浓度水平对植株的生长发育非常关键^[9]。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)源、库器官界定明显,源器官主要是叶片,库器官主要为块茎(微型薯),试管苗在整个生长发育过程中,源、库器官间碳水化合物的分配和调节直接决定微型薯的产量和品质。马铃薯是须根系植物,根系在苗期形成后几乎没有变化。根系是植物从外界摄取镁的主要器官^[10],根系的形态建成是由植株地上部分输送的碳水化合物和根系吸收的水分与养分共同调节的。植物苗期通过光合作用合成的碳水化合物很大程度上都分配给了根系,碳水化合物在地上部分与根系间协调分配是植株正常生长发育的基础^[11]。镁对马铃薯试管苗碳水化合物积累和分配特性以及根系的形态建成的影响与微型薯的形成紧密相关。通过阐明马铃薯试管苗苗期镁稳态水平下植株碳水化合物积累、分配特点和规律以及对根系形态建成的影响,可以为马铃薯试管苗微繁提供施肥依据。

马铃薯试管苗繁殖作为微型薯繁育的主要生产过程,其生长状况直接影响微型薯种薯的品质,较早生根且健壮的试管苗能够吸收更多的养分诱导出高质量的微型薯。马铃薯试管苗苗期的根系形成后,光合作用将继续影响微型薯的碳水化合物积累,微型薯的生物量可以作为衡量其品质的主要指标,而苗期地上部分碳水化合物的积累量可直接影响微型薯生物量的形成。本研究以马铃薯栽培品种的试管苗为试验材料,研究不同低镁浓度胁迫下叶绿素含量、碳水化合物积累与分配机制,探讨碳水化合物分配的改变对根系形态建成的影响,为马铃薯试管苗的健壮生长提供微肥的施用依据,为优质微型薯的生产奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料选用马铃薯栽培品种“大西洋”试管苗,由甘肃省干旱生境作物学重点实验室提供。

1.2 试验方法

1.2.1 培养基的配制 采用MS培养基为基础培养基,进行液体培养,共设置4个镁浓度处理,分别为T1(0 μmol · L⁻¹)、T2(188 μmol · L⁻¹)、T3(375 μmol · L⁻¹)、T4(750 μmol · L⁻¹),以普通MS培养基的正常镁浓度(1 500 μmol · L⁻¹)为对照(CK)。培养基配方见表1。实验所用药品均为分析纯。

1.2.2 材料培养 将长势良好、整齐一致的“大西洋”试管苗接种于5个镁浓度处理培养基,每个浓度5瓶,每瓶5株,3次重复。培养温度20±2℃,光照强度2 000 lx,光照时间16 h · d⁻¹,培养20 d后进行各项指标的测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生理指标测定

(1)叶绿素含量测定:取第2、3、4片完全展开

叶用丙酮提取法测定^[11]。

(2)糖类含量测定:可溶性糖和淀粉的测定采用蒽酮比色法。蔗糖测定参照薛应龙的方法^[12]。果糖测定采用钼酸铵法。

(3)鲜重、干重测定和根冠比的计算:将马铃薯试管苗用清水冲洗干净,根系和地上部分分开,分别测定根系和地上部分的鲜重;然后 80℃ 杀青 90

min,65℃ 恒温烘干,分别测定其干重。根冠比=根系干重/地上部分干重。

1.3.2 根系形态指标测定 将马铃薯试管苗根系剪下,清水冲洗干净,根系扫描分析仪对根系进行扫描,利用 WinRHIZO 软件定量分析总根长、根表面积、平均根直径、根体积和侧根数。

表 1 各处理培养基的成分

Table 1 Components of different culture media

处理 Treatment	镁浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Mg^{2+} concentration	培养基成分 Medium component	pH
T1	0	MS-MgSO ₄ · 7H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O(0g)+K ₂ SO ₄ (5.22g)+蔗糖 3%	5.8
T2	188	MS-MgSO ₄ · 7H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O(0.76g)+K ₂ SO ₄ (5.22g)+蔗糖 3%	5.8
T3	375	MS-MgSO ₄ · 7H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O(1.52g)+K ₂ SO ₄ (5.22g)+蔗糖 3%	5.8
T4	750	MS-MgSO ₄ · 7H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O(3.05g)+K ₂ SO ₄ (5.22g)+蔗糖 3%	5.8
CK	1500	MS-MgSO ₄ · 7H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O(6.09g)+K ₂ SO ₄ (5.22g)+蔗糖 3%	5.8

1.4 数据处理

试验设 3 次重复,所有数据以平均值±标准误表示。数据采用 SPSS19.0 数据分析软件进行统计分析。数据间的比较采用方差分析(ANOVA),以 Duncan 法检测差异显著性,显著水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 低镁胁迫对马铃薯试管苗叶绿素含量的影响
为明确低镁水平对试管苗叶绿素的影响,对不

同低镁浓度胁迫下马铃薯试管苗叶绿素含量进行测定。结果显示(表 2),马铃薯试管苗的叶绿素、Chla 和 Chlb 含量随镁浓度升高而增加。缺镁处理(T1)马铃薯试管苗的叶绿素、Chla 和 Chlb 含量均最低,分别为 0.634、0.471 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.163 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,叶绿素、Chla 和 Chlb 含量均在高镁水平处理(对照)达到最大值,是 T1 处理的 1.73、1.69、1.86 倍,差异均达显著水平。T1 处理时 Chla/ Chlb 值最高,为 2.89,对照最低,为 2.63。

表 2 低镁胁迫对马铃薯试管苗叶绿素含量的影响

Table 2 The effects of low-Mg²⁺ concentration on chlorophyll content of potato plantlet in vitro

处理 Treatment	叶绿素 a 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chla	叶绿素 b 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlb	叶绿素含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chlorophyll	叶绿素 a/叶绿素 b Chla/Chlb
T1	0.471±0.030d	0.163±0.034d	0.634±0.004d	2.89±0.017a
T2	0.542±0.017c	0.201±0.032c	0.743±0.016c	2.70±0.025a
T3	0.545±0.053c	0.202±0.023c	0.747±0.064c	2.69±0.028a
T4	0.682±0.009b	0.258±0.042b	0.940±0.038b	2.64±0.012a
CK	0.796±0.014a	0.303±0.048a	1.099±0.061a	2.63±0.023a

注:数值后不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 下存在显著差异,下同。
Note: Values followed by different letters mean significant difference at $P<0.05$ between treatments, the same as below

2.2 低镁胁迫对马铃薯试管苗碳水化合物含量的影响

为探究低镁胁迫对马铃薯试管苗碳水化合物积累的影响,测定了不同低镁水平下试管苗的淀粉、蔗糖、果糖和可溶性糖含量。结果表明(表 3),马铃薯试管苗茎叶中,淀粉、蔗糖、果糖和可溶性糖含量均在 T1 处理下最大,分别为 22.257、0.042、5.03 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 17.26 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,并且均显著高于对照;淀粉含量随镁浓度升高而降低,T1 处理的淀粉含量与 T2 处理无显著差异,显著高于 T3、T4 处理和对照,分别是 T3、T4 处理和对照的 1.6、1.7、2.4

倍,对照淀粉含量最低,为 9.243 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;蔗糖含量在 T4 处理最低,为 0.016 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,是 T1 处理的 38.1%,与 T2、T3 处理和对照差异不显著;果糖含量随镁浓度升高而降低,对照达到最低值,为 2.029 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,分别是 T1、T2、T3 和 T4 处理的 40.3%、54.1%、58.5%和 64%,与 T4 处理差异不显著;可溶性糖含量在 T1、T2、T3 和 T4 处理间无显著差异,均显著高于对照,对照含量最低,为12.782 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,分别是 T1、T2、T3 和 T4 处理的 74.1%、77.5%、77.4%和75.8%。在马铃薯试管苗根系中,淀粉含量在 T1 处理最低,为 5.852 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,分别是 T2、T3、T4 处理

和对照的 70.1%、80.3%、87%和67.2%,对照淀粉含量最高,为 8.713 mg · g⁻¹,淀粉含量在 T2、T3 和 T4 处理随镁浓度升高而降低;蔗糖、果糖和可溶性糖含量均在 T1 处理最大,分别为 0.025、5.509 mg · g⁻¹和 23.232 mg · g⁻¹;蔗糖含量变化与茎叶中完全一致,T1 处理的蔗糖含量分别是 T2、T3、T4 处理和对照处理的 1.19、1.22、1.23 倍和 1.13 倍;果糖含量变

化与茎叶中基本相同,随镁浓度升高呈现降低的趋势,其含量在 T3 处理时最小,为 2.667 mg · g⁻¹,是 T1 处理的 48.4%,与 T4 处理和对照差异不显著;可溶性糖含量最低的是对照,为 10.533 mg · g⁻¹,分别是 T1、T2、T3 和 T4 处理的 45.3%、64.2%、85.2%、67.6%,与 T3 处理无显著差异。

表 3 低镁胁迫对马铃薯试管苗淀粉、蔗糖、果糖和可溶性糖含量的影响/(mg · g⁻¹)

Table 3 The effects of low-Mg²⁺ concentration on starch, sucrose, fructose and soluble sugar content of potato plantlet in vitro

处理 Treatment	淀粉含量 Starch content	蔗糖含量 Sucrose content	果糖含量 Fructose content	可溶性糖含量 Soluble sugar content
茎叶 Shoot	T1	22.257±0.602a	0.042±0.002a	5.030±0.096a
	T2	22.117±1.180a	0.019±0.002b	3.748±0.198b
	T3	13.877±0.174b	0.018±0.002b	3.470±0.535bc
	T4	13.162±0.623b	0.016±0.002b	3.171±0.329c
	CK	9.243±0.909c	0.019±0.004b	2.029±0.024c
根 Root	T1	5.852±0.305d	0.025±0.002a	5.509±0.222a
	T2	8.352±0.685ab	0.021±0.001b	3.401±0.070b
	T3	7.289±0.940bc	0.021±0.001b	2.667±0.179c
	T4	6.728±0.508cd	0.021±0.002b	2.869±0.108c
	CK	8.713±0.550a	0.022±0.001b	2.934±0.032c

2.3 低镁胁迫对马铃薯试管苗根冠比的影响

为阐明镁与马铃薯试管苗根冠比的关系,测定了不同低镁浓度下马铃薯试管苗根冠比。结果显示(表 4),马铃薯试管苗地上部分的鲜重和干重在 T1 处理时均降低为最低值,分别为 112.33、12.85 g · 株⁻¹,为对照的 47.2%和 64.5%,与 T2 处理差异不显著。随着镁浓度升高,马铃薯试管苗地上部分的鲜重和干重呈增加趋势,T4 处理的鲜重和干重均达

最大值,分别为 255.57、21.81 g · 株⁻¹,与对照无显著差异。马铃薯试管苗根系的鲜重和干重均在 T1 处理时为最小值,分别是 2.25、0.11 g · 株⁻¹,为对照的 13.4%和 2.2%,与 T2、T3、T4 处理和对照差异显著。马铃薯试管苗的根冠比在 T1 处理时为 0.91,随着镁浓度升高,根冠比显著增大,T2、T3、T4 处理和对照的根冠比分别是 T1 处理的 25、28、27 倍和 28 倍。

表 4 低镁胁迫对马铃薯试管苗鲜重、干重和根冠比的影响

Table 4 The effects of low-Mg²⁺ concentration on fresh weight, dry weight and root/shoot ratio of potato plantlet in vitro

处理 Treatment	鲜重/(g · 株 ⁻¹) Fresh weight/g/(g · plant ⁻¹)		干重/(g · 株 ⁻¹) Dry weight/g/(g · plant ⁻¹)		根冠比 Root/shoot ratio
	茎叶 Shoot	根 Root	茎叶 Shoot	根 Root	
T1	112.33±11.03c	2.25±2.05c	12.85±1.63c	0.11±0.10b	0.91±0.37b
T2	134.67±13.26bc	27.18±7.14b	13.81±2.92c	3.21±0.61a	23.26±3.15a
T3	163.01±21.59b	39.57±11.39ab	15.93±2.14bc	4.04±2.03a	25.38±3.21a
T4	255.57±28.71a	59.28±15.48a	21.81±3.56a	5.35±2.17a	24.53±3.68a
CK	238.02±27.02a	59.01±15.31a	19.92±3.37ab	5.06±2.04a	25.43±3.39a

2.4 低镁胁迫对马铃薯试管苗根系形态的影响

对不同低镁浓度下马铃薯试管苗根系形态进行观察,并对形态指标进行定量分析。结果(图 1,表 5)表明,马铃薯试管苗的总根长、根表面积、根体积和侧根数均在 T1 处理时为最小值,分别为对照的 36.1%、45.9%、17.6%和 10.1%,显著低于 T2、T3、

T4 处理和对照;而平均根直径在 T1 处理最大,为 0.54 mm,与 T2、T3、T4 处理和对照差异显著。T2、T3 和 T4 处理的马铃薯试管苗的总根长、根表面积、平均根直径以及根体积与对照差异不显著,侧根数却显著增加,T2、T3 和 T4 处理的侧根数分别是对照的 1.7、1.8 倍和 2.4 倍。

表 5 低镁胁迫对马铃薯试管苗根系形态的影响

Table 5 The effects of low-Mg²⁺ concentration on root morphology of potato plantlet in vitro

处理 Treatment	总根长/cm Total root length	根表面积/cm ² Root surface area	平均根直径/mm Average root diameter	根体积/cm ³ Root volume	侧根数 Lateral root number
T1	28.02±28.36b	4.63±3.18b	0.54±0.026a	0.0075±0.008b	1.25±1.05c
T2	81.74±18.73a	10.75±1.65a	0.41±0.018b	0.0380±0.018a	21.00±10.46ab
T3	82.69±17.28a	10.78±1.53a	0.44±0.043b	0.0506±0.033a	22.40±16.68ab
T4	85.69±20.99a	10.94±1.86a	0.41±0.036b	0.0476±0.010a	29.80±11.84a
CK	77.63±19.19a	10.09±1.90a	0.45±0.033b	0.0426±0.014a	12.40±8.87bc

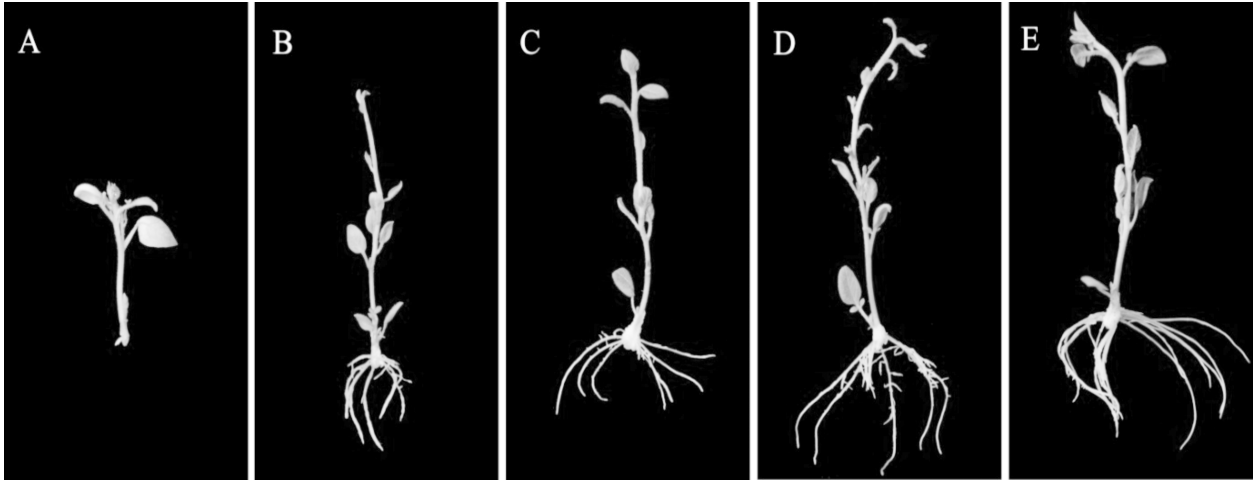


图 1 低镁胁迫下马铃薯试管苗形态(A,T1 处理; B,T2 处理; C,T3 处理; D,T4 处理; E,CK)

Fig.1 The effects of low-Mg²⁺ concentration on morphology of potato plantlet in vitro (A, T1; B, T2; C, T3; D, T4; E, CK)

2.5 马铃薯试管苗碳水化合物含量与镁浓度相关性分析

对马铃薯试管苗的淀粉、果糖和可溶性糖含量与镁浓度的相关性进行分析,结果显示(图 2),马铃薯试管苗茎叶中的淀粉、果糖和可溶性糖含量与镁浓度均呈显著负相关。

3 讨论与结论

马铃薯试管苗是进行微型薯生产的基础,其生长发育状况直接关系到微型薯的产量和品质。较早生根、长势良好的试管苗能诱导出高产优质的微型薯。镁不仅参与植物光合产物的合成、运输和分

配,还影响根系的形态建成,与植物长势紧密相关。在植物体内,镁是叶绿素的组成成分,还参与镁螯合酶的激活^[13],而叶绿素的合成需要该酶催化,在完全缺镁状态下,马铃薯试管苗的叶绿素、Chla 和 Chlb 含量均为最低,Chla/ Chlb 值最高,表明缺镁不利于合成 Chlb,而 Chlb 合成影响植株的捕光能力,同时缺镁还会导致植物体内依赖 Mg²⁺的核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶(RuBPcase) 活性受到抑制^[14],引起植株 CO₂固定反应下降,光合速率降低,最终造成植株光合产物合成减少。镁还参与激活植物体内磷酸化酶、磷酸激酶和焦磷酸酶等光合产物合成与运输过程中的关键酶,在完全缺镁时,这些酶不能被

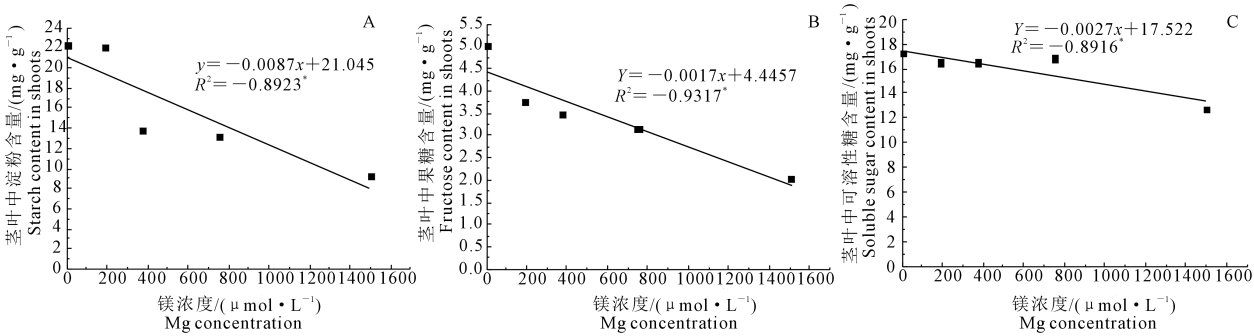


图 2 马铃薯试管苗碳水化合物含量与镁浓度的相关性

Fig.2 The correlation analysis between carbohydrates and Mg²⁺ level of potato plantlet in vitro

激活,碳水化合物无法正常运输,仅有的淀粉和蔗糖在茎叶中大量积累,向根部输送的碳水化合物减少,马铃薯试管苗的总根长、根表面积、根体积和侧根数减少,根系不能形成足够的有效吸收面积,植株根冠比降低,根系系统不能建成有效的形态,无法从外界摄取充足营养满足植株正常生长和发育的需要。植株叶中糖类高浓度积累还会抑制编码叶绿素 a(Chla)和叶绿素 b(Chlb)蛋白的 *Cab2* 基因的表达,引起植株体内叶绿素含量下降^[15]。缺镁时,老叶中蔗糖输出不受抑制,是植株运输碳水化合物的最主要途径。¹⁴C 蔗糖标记也表明,蔗糖在植株顶叶大量积累是由于蔗糖从顶叶运出被抑制而引起的^[16],分子水平的分析显示缺镁会诱导编码伴胞中蔗糖/H⁺转运体的 *BvSUT1* 基因在顶叶上调表达,但韧皮部的蔗糖装载量并未增加,表明它的蔗糖装载可能存在缺陷^[17-18]。马铃薯试管苗淀粉和蔗糖在顶叶积累的原因可能就是缺镁导致的韧皮部蔗糖装载缺陷。镁还与 ATP 相互作用,产生质子流为蔗糖转运提供能量^[19]。这说明缺镁时,除试管苗光合效率下降导致碳水化合物合成减少外,运输途径受阻也是试管苗根系无法获取足够营养并建成正常根系形态的原因。低镁水平和高镁水平下马铃薯试管苗植株的叶绿素、Chla 和 Chlb 含量升高,Chla/Chlb 值降低,光合产物合成增多,根系的生长显著增加,尤其是侧根,植株的根冠比升高;其次,低镁胁迫(约 1/2 对照水平)和高镁水平(对照)时马铃薯试管苗的碳水化合物运输恢复正常,最终植株能够运输较多碳水化合物用于根系的形态建成,低镁胁迫(约 1/2 对照水平)下马铃薯试管苗根系侧根数高于正常镁水平,可能是马铃薯试管苗对低镁胁迫的一种适应性反应,通过增加根系侧根来吸收更多的镁和其他营养,低营养条件下侧根发生发育高于高营养条件的现象在其它植物响应低养分胁迫时也普遍存在^[20]。植物在低镁水平时,合成尿苷二磷酸葡萄糖(UDPG)所需酶无法被激活^[21-22],影响蔗糖合成,造成果糖含量较高,说明多糖的合成过程还没有完全恢复,同时植物体内与碳水化合物代谢有关的磷酸化酶、磷酸激酶和焦磷酸酶活性受到抑制^[23],碳水化合物的转化和再利用较少,造成可溶性糖积累。高镁水平(正常)下马铃薯试管苗合成蔗糖的途径得到恢复,果糖含量降低,同时可溶性糖的代谢也恢复正常,含量减少。

因此,缺镁会使马铃薯试管苗的叶绿素含量降低,严重影响光合产物合成和碳水化合物的积累与分配,使植株的根冠比降低,抑制植株生长;低镁胁

迫(约 1/2 对照水平)下马铃薯试管苗叶绿素含量增加,光合效率提高,同时促使碳水化合物向根系运输,根冠比增大,促进根系的形态建成,与正常镁水平(对照)下马铃薯试管苗指标的变化差异不大,适宜于马铃薯试管苗的生长,为微型薯的生产提供良好条件。

参考文献:

- [1] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 692-704.
- [2] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photo assimilates and cycling of mineral nutrients [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47 (special): 1255-1263.
- [3] Walker C J, Weinstein J D. Further characterization of the magnesium chelatase in isolated developing cucumber chloroplasts [J]. *Plant Physiology*, 1991, 95(4): 1189-1196.
- [4] Scott B J, Robson A D. Changes in the content and form of magnesium in the first trifoliate leaf of subterranean clover under altered or constant root supply [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1990, 41(3): 511-519.
- [5] Fisher E S, Bremer E. Influence of magnesium deficiency on rates of leaf expansion, starch and sucrose accumulation and net assimilation in *phaseolus vulgaris* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1993, 89 (2): 271-276.
- [6] Fisher E S, Lohaus G, Heineke D, et al. Magnesium deficiency results in accumulation of carbohydrates and amino acids in source and sink leaves of spinach [J]. *Physiologia Plantarum*, 1998, 102 (1): 16-20.
- [7] Hermans C, Verbruggen N. Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(418): 2153-2161.
- [8] Fischer E S, Bussler W. Effects of magnesium deficiency on carbohydrates in *phaseolus vulgaris* [J]. *Z. Pflanzenernahr Bodenkd*, 1988, 151(5): 295-298.
- [9] Lu Wang, Chuan Yue, Hongli Cao, et al. Biochemical and transcriptome analyses of a novel chlorophyll-deficient chlorina tea plant cultivar [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14(1): 352.
- [10] Benjamin D G, Ricardo F G, Svetlana F, et al. Plasticity of the *Arabidopsis* Root System under Nutrient Deficiencies [J]. *Plant Physiology*, 2013, 163(1): 161-179.
- [11] Shanguan Z P, Shao M A, Ren S J. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat [J]. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 2004, 45(1): 49-54.
- [12] 薛应龙. 上海植物生理学会. 植物生理学实验手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 110-112.
- [13] Kobayashi K, Mochizuki N, Yoshimura N, et al. Functional analysis of *Arabidopsis thaliana* isoforms of Mg-chelatase CHLI subunit [J]. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2008, 7(10): 1188-1195.
- [14] Parry M A, Keys A J, Madgwick P J. Rubisco regulation: a role

for inhibitors [J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59 (7): 1569-1580.

[15] Hermans C, Johnson G N, Strasser R J, et al. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet; acclimation to low magnesium differentially affects photosystemsI and II [J]. Planta, 2004, 220(2): 344-355.

[16] Fisher E S, Lohaus G, Heineke D. Magnesium deficiency results accumulation of carbohydrates and amino acids in source and sink leaves of spinach [J]. Physiologia Plantarum, 1998, 102(1): 16-20.

[17] Hermans C, Bourgis F, Faucher M. Magnesium deficiency in sugar beet alters sugar partitioning and phloem loading in young mature leaves [J]. Planta, 2005, 220(4): 541-549.

[18] Petra Marschner. Marschner’s mineral nutrition of higher plants (Third Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2013: 165-171.

[19] Cakmak I, Hengeler C, Marschner H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(9): 1245-1250.

[20] Müller M, Schmidt W. Environmentally induced plasticity of root hair development in Arabidopsis [J]. Plant Physiology, 2004, 134(1): 409-419.

[21] Julia W, Sjef S, Johannes H. Sucrose: Metabolite and signaling molecule [J]. Phytochemistry, 2010, 71(4): 1610-1614.

[22] Gerhardt R, Stütt M, Heldt H W. Subcellular metabolite levels in spinach leaves. Regulation of sucrose synthesis during diurnal alterations in photosynthetic partitioning [J]. Plant Physiology, 1987, 83(2): 399-407.

[23] Gaxiola R A, Palmgren M G, Schumacher K. Plant proton pumps [J]. FEBS Letters, 2007, 581(12): 2204-2214.

(上接第 199 页)

[18] GUOYa , TAN Jinglu. Recent Advances in the Application of Chlorophyll a Fluorescence from Photosystem II[J].Photochem Photobiol, 2015, 91(1): 23-27.

[19] 蒋达波, 宗秀虹, 李帮秀, 等. 氮素胁迫对玉米光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 135-139.

[20] Wang L F, Chen J, Shang Guan Z P. Photosynthetic characteristics and nitrogen distribution of large-spike wheat in Northwest China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(3): 33-41.

[21] 赵青松, 李萍萍, 王纪章, 等. 工厂化黄瓜穴盘育苗昼温适应性[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2343-2347.

[22] 孙璐, 周宇飞, 李丰先, 等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3265-3272.

[23] White PJ, Broadley M R. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review [J]. Annals of Botany, 2001, 88(6): 967-988.

[24] Everad J D, Gucci R, Kann S C, et al. Gas exchange and carbon partitioning in the leaves of celery (Apium graveolens L.) at various leaves of root zone salinity[J]. Plant physiology, 1994, 106(1): 281-292.

[25] 裘丽珍, 黄有军, 黄坚钦, 等. 不同耐盐性植物在盐胁迫下的生长与生理特性比较研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(4): 420-427.

[26] 吕芳德, 徐德聪, 侯红波, 等. 5 种红山茶叶绿素荧光特性的比较研究[J]. 经济林研究, 2003, 21(4): 4-7.

[27] Zhu J K. Genetic analysis of plant salt tolerance using Arabidopsis [J]. Plant Physiology, 2000, 124(3): 941-948.

[28] 杨淑萍, 危常州, 梁永超. 盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1585-1593.

[29] 柯世省. 水分胁迫对夏蜡梅气孔行为的影响[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 797-801.

[30] Arbona V, Marco A J, Iglesias DJ, et al. Carbohydrate depletion in roots and leaves of salt-stressed potted Citrus clementine L[J]. Plant Growth Regulation, 2005, 46(2): 153-160.

[31] 张运涛. 钙在植物盐毒害中的作用 [J]. 河北农业技术师范学院学报, 1996, 10(3): 61-66.

[32] 史跃林, 罗庆熙, 刘佩瑛. Ca²⁺ 对盐胁迫下黄瓜幼苗中 CaM、MDA 含量和质膜透性的影响(简报) [J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(5): 347-349.

[33] MorantM A, Pradier E, Tremblin G. Osmotic adjustment, gas exchanges and chlorophyll fluorescence of a hexaploid triticale and its parental species under salt stress.[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(1): 25-33.

[34] 王松. 外源 NO 对盐胁迫下番茄光合碳同化的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2016.

[35] 刘晓龙, 徐晨, 徐克章, 等. 盐胁迫对水稻叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 作物杂志, 2014, (2): 88-92.