

提高营养液镁浓度可缓解黄瓜幼苗亚低温胁迫

黄红荣, 李建明*, 胡晓辉, 张 军, 张中典, 崔万军

(西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】我国北方地区冬春季栽培黄瓜经常遭受亚低温 (15℃/8℃) 胁迫, 用标准营养液育苗常会造成黄瓜植株矮小、叶片发黄等问题。研究调整营养液中镁和钾离子浓度, 以便达到缓解亚低温对黄瓜幼苗伤害作用的目的。【方法】选用 ‘博耐 3000’ 黄瓜幼苗为试材, 利用人工气候箱, 以常温 (25℃/18℃) 下黄瓜山崎标准营养液配方 (K^+ 6 mmol/L、 Mg^{2+} 2 mmol/L) 为对照, 在标准营养液其他元素保持不变的基础上, 设置两个钾离子水平 (K^+ 6、12 mmol/L), 4 个镁离子水平 (Mg^{2+} 2、4、6、8 mmol/L), 在亚低温 (15℃/8℃) 下栽培黄瓜幼苗, 于处理后幼苗生长的 0、7、14、21 d 调查了不同镁钾水平营养液栽培的黄瓜幼苗的根系形态、干物质积累和分配以及对钾和镁元素吸收。【结果】1) 亚低温下适当增加营养液中的 Mg^{2+} 浓度, 能显著提高黄瓜幼苗的壮苗指数, 当营养液中 Mg^{2+} 和 K^+ 均为 6 mmol/L 时, 壮苗指数达到最大值 0.17; 2) 镁和钾对根系形态影响不同, K^+ 浓度与根长和根系总表面积成正相关, 且主要影响直径范围为 0~0.5 mm 的根系, Mg^{2+} 与根系平均直径正相关且主要影响 > 1.0 mm 的根系; 较高的 K/Mg 比例有利于黄瓜 0~0.5 mm 根系的生长, 根系总长和总体积的增加, 但显著抑制了 0.5~1.0 mm 和 > 1.0 mm 根系的生长。3) 亚低温下, 茎叶中干物质质量降低而根中升高, 在 K^+ 12 mmol/L 水平时, 随 Mg^{2+} 浓度升高, 根和茎中干物质质量升高, 叶中干物质表现为先升高后下降, 且营养液中高浓度的 Mg^{2+} 有利于干物质向叶中分配。4) 营养液中镁离子浓度小于 6 mmol/L 时, 一定程度地提高 Mg^{2+} 浓度能促进对 K 的吸收, 营养液中的 Mg^{2+} 和 K^+ 在镁钾吸收上表现为协同作用, 当 Mg^{2+} 大于 6 mmol/L 时, 镁和钾表现为显著的拮抗作用; 亚低温下, 根茎叶的镁吸收量相比 CK 分别下降 25%、72% 和 58%, 而营养液中 K^+ 和 Mg^{2+} 均为 6 mmol/L 时, 有利于缓解这一阻碍效果。【结论】冬春季黄瓜育苗时, 山崎黄瓜配方营养液中的 Mg^{2+} 和 K^+ 均为 6 mmol/L 而其他元素浓度保持不变时, 黄瓜幼苗的壮苗指数、根系形态、干物质积累和钾镁元素综合效应表现较好, 能有效地抵御亚低温对黄瓜幼苗的伤害。

关键词: 黄瓜; 亚低温胁迫; 镁浓度; 根系生长; 钾吸收

Increasing magnesium level in hydroponic solution will relieve suboptimal temperature stress to cucumber seedlings

HUANG Hong-rong, LI Jian-ming*, HU Xiao-hui, ZHANG Jun, ZHANG Zhong-dian, CUI Wan-jun
(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】In northern China, cucumber seedlings are often subjected to suboptimal temperature (15℃/8℃) stress during spring or winter season. Under such environment, the hydroponic cucumber seedlings using standard nutrient solution are weak and their leaves become yellow in color. A study was conducted aiming to relieve the adverse effects of suboptimal temperature stress by adjusting magnesium (Mg) and potassium (K) concentrations in the nutrient solution. 【Methods】Hydroponic experiment was conducted inside a climatic chamber with cucumber ‘Bo Nai 3000’ as materials. The day/night culture temperature was 25℃/18℃ for control and 15℃/8℃ for treatment. On the base of a standard Yamazaki cucumber nutrient solution in the control, two levels of K^+ (6 and 12 mmol/L) and four Mg^{2+} (2, 4, 6 and 8 mmol/L) were set for the treatments under suboptimal temperature. The root morphology, dry matter accumulation and distribution as well as K and Mg absorption in cucumber seedlings were investigated every 7 days since the cultivation, and 4 investigations were

收稿日期: 2015-12-31 接受日期: 2016-06-14

基金项目: 国家科技支撑计划 (2014BAD14B06); 农业部 “948” 项目 (2015-Z36) 资助。

作者简介: 黄红荣 (1991—), 男, 陕西汉中, 硕士, 主要从事设施作物生理生态研究。E-mail: huanghr91@126.com

* 通信作者 E-mail: lijianming66@163.com

did in total. 【 **Results** 】 1) Appropriate increasing of the Mg^{2+} concentration in the culture solution significantly improved healthy seedling index under suboptimal temperature. When the Mg^{2+} and K^+ concentrations were all 6 mmol/L, the seedling index reached the maximum value of 0.17. 2) The effects of Mg^{2+} and K^+ on root morphology were different. K^+ concentration was positively correlated with the total root length and root surface area, the effect was mainly on roots of 0–0.5 mm in diameter; Mg^{2+} was positively correlated with the average diameter of the root system, the effect was mainly on roots of >1.0 mm in diameter; higher K/Mg ratio was beneficial to the increase of total length and volume of roots of 0–0.5 mm in diameter, but not for those of roots of 0.5–1.0 mm and >1.0 mm in diameter. 3) Compared to normal temperature, the dry biomass of stems and leaves were decreased while the root dry biomass increased under suboptimal temperature. Under K^+ concentration of 6 mmol/L, root and stem dry biomass were increased with enhanced Mg^{2+} concentration. The high Mg^{2+} concentration of nutrient solution contributed to the distribution of dry matter to leaf. 4) When Mg^{2+} was less than 6 mmol/L, interaction effect existed between Mg^{2+} and K^+ , while significant antagonism effect existed when Mg^{2+} was higher than 6 mmol/L. The absorptive amount of Mg under suboptimal temperature decreased by 25%, 72% and 58% in root, stem and leaf respectively, compared to CK. 【 **Conclusions** 】 Under suboptimal temperature, 6 mmol/L Mg^{2+} and K^+ in Yamasaki cucumber nutrient solution improved the seedling index of cucumber seedlings, root morphology and dry matter accumulation. It can effectively resist the adverse effects of suboptimal temperature on cucumber seedlings.

Key words: cucumber; suboptimal temperature stress; magnesium level; root development; potassium absorption

在北方冬春季黄瓜栽培时通常会遭受到亚低温的胁迫。在亚低温下采用标准营养液管理通常会导致植株矮小, 叶片失绿, 呈现叶脉间黄化的缺素症状^[1]。黄瓜是喜钾蔬菜, 钾能影响植物的根系生长, 从而影响对水分和养分的吸收^[2]。镁是叶绿素的组成成分, 也是多种酶的活化剂, 对光合作用有重要影响^[3]。

有研究表明, 在亚低温环境下, 黄瓜对多种营养元素的吸收下降, 其中以镁和钾下降居多^[4]。而近年来的研究发现, 适量增加镁和钾有利于提高植物的抗冷性。李俊等^[5]、游明鸿等^[6]分别在番茄和假俭草上的研究发现, 在亚低温条件下增施钾肥, 有效提高了番茄和假俭草抵御低温伤害的能力。朱帅^[7]、谢小玉等^[8]研究表明增施镁肥能缓解低温对黄瓜的伤害作用。目前, 对于同时增加营养液中的镁钾元素浓度, 以及镁钾之间的相互作用对黄瓜的根系形态和镁钾吸收影响的报道较少, 对镁钾共同作用对亚低温的抵御效果的研究还没有全面的报道。

本研究选用黄瓜幼苗作为研究对象, 通过增加营养液中钾、镁水平, 明确亚低温环境下不同镁钾水平对黄瓜幼苗生长、根系形态以及钾镁元素吸收的影响, 以期为春冬季节黄瓜幼苗的营养液管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为‘博耐 3000’黄瓜品种。基质为珍

珠岩和蛭石育苗基质以体积比 2 : 1 组成, 于 2014 年 9~12 月在西北农林科技大学园艺学院设施园艺实验室进行。育苗时选取籽粒饱满、整齐一致的黄瓜种子, 温汤浸种, 25℃/28℃ 催芽, 挑选发芽整齐的种子播于 72 孔的穴盘内, 并于正常温光条件下培养至 2 叶 1 心。挑选健壮、整齐一致的黄瓜幼苗移至小花盆内, 内装基质 200 g, 每盆 1 株, 每个处理 24 棵幼苗, 不设重复, 之后移至人工气候箱进行 3 天缓苗预处理。人工气候箱内设常温 (25℃/18℃) (昼/夜), 光照强度 (5000 lx), 光周期为 12 h/12 h (昼/夜), 相对湿度为 80%。预处理 3 天之后浇处理营养液, 据植株蒸腾量每 2 天浇灌一次营养液, 每次 60 mL。每隔 7 天用清水冲洗一次基质, 以免盐分在栽培基质中积累过多, 造成离子毒害。每隔 7 天采样测定各指标。

1.2 试验设计

以常温 (25℃/18℃) 下标准山崎黄瓜配方营养液为对照, 亚低温 (15℃/8℃) 环境下, 在保持原配方不变的基础上, 分别用 $MgSO_4$ 和 K_2SO_4 调整营养液中的镁和钾水平, 用 Na_2SO_4 调整营养液多余的 SO_4^{2-} 。试验采用完全随机设计, 镁为 4 水平, 钾为 2 水平, 加对照 (CK) 共 9 个处理, 各处理见表 1。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 形态指标的测定 分别于处理后生长的 0、7、14、21 d 对各小区随机选取黄瓜幼苗 5 株采样, 测

表 1 亚低温下营养液的调整试验设计

Table 1 Experiment design for the adjustment of nutrient solution under suboptimum temperature

处理 Treatment	Mg ²⁺ (mmol/L)	K ⁺ (mmol/L)	K/Mg	MgSO ₄ (mg/L)	K ₂ SO ₄ (mg/L)	Na ₂ SO ₄ (mg/L)
CK	2	6	3	0	0	0
M1K1	2	6	3	0	0	0
M2K1	4	6	1.5	240	0	284
M3K1	6	6	1	480	0	568
M4K1	8	6	0.75	720	0	852
M1K2	2	12	6	0	522	426
M2K2	4	12	3	240	522	710
M3K2	6	12	2	480	522	994
M4K2	8	12	1.5	720	522	1278

量株高、茎粗、干鲜质量，用直尺测量黄瓜幼苗株高，以基质表面到植株顶端生长点的高度为准；千分之一游标卡尺测量子叶和第一片真叶中间茎粗；万分之一天平测定黄瓜幼苗根茎叶的干鲜质量，进一步计算壮苗指数。壮苗指数用下式计算：

$$I = D/H \times A$$

式中： I 为壮苗指数， D 为茎粗， H 为株高， A 为黄瓜幼苗全株干质量。

1.3.2 根系形态测定 取根后，清水冲洗，小心地去除杂物，采用 EPSON Perfection V700 进行根系扫描，并利用 WinRHIZOPro 软件进行分析，得到根长、根表面积、根直径和根体积等各项特征参数。

1.3.3 干物质及钾、镁含量测定 取样时每个处理随机取 5 株用去离子水洗净后按叶、茎、根分别称量各器官鲜质量，之后置鼓风干燥箱内 105℃ 杀青 30 min，并于 80℃ 烘干至恒重，称量各器官干物质

量，并根据下式进行计算：

平均单株干物质质量 (g) = [根干质量 (g) + 茎干质量 (g) + 叶干质量 (g)]/5

干物质分配率 = 器官干物质质量 (g) / 单株干物质质量 (g) × 100%

干样磨碎后过 0.25 mm 筛，准确称取 0.2 g，用 HNO₃-HClO₄ 消煮至澄清，用原子吸收法测 K 和 Mg 含量。

元素吸收量 = 元素含量 × 干物质质量

试验数据用 DPS 9.0 软件进行统计分析，Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 亚低温下不同镁、钾水平对黄瓜幼苗形态的影响

2.1.1 亚低温下镁、钾水平对黄瓜壮苗指数的影响 由图 1 可以看出，亚低温下壮苗指数显著低于常温处理，且亚低温下适宜的镁、钾浓度能显著提高黄瓜幼苗的壮苗指数。CK 的壮苗指数比亚低温下标准营养液的处理 M1K1 在 7、14、21 d 时分别高出 50.1%、100.5%、171.0%。亚低温下环境下，当 K⁺ 浓度为 6 mmol/L 时，随着营养液中 Mg²⁺ 浓度的增高，壮苗指数呈现先增加后下降的趋势，营养液中的 Mg²⁺ 浓度为 6~8 mmol/L 时，壮苗指数有最大值 0.17 和 0.16，在处理 21 d 时比 M1K1 处理高出 89.8% 和 71.6%；当 K⁺ 水平为 12 mmol/L 时，壮苗指数随着 Mg²⁺ 的升高表现出一致的趋势，但是整体显著低于营养液中 K⁺ 浓度为 6 mmol/L 时。在 Mg²⁺ 浓度为 2 mmol/L 较低水平时，随着 K⁺ 的浓度升高，黄瓜的壮苗指数表现出升高的趋势，M1K2 比 M1K1 高出 10.9%，而当营养液中 Mg²⁺ 浓度为 8

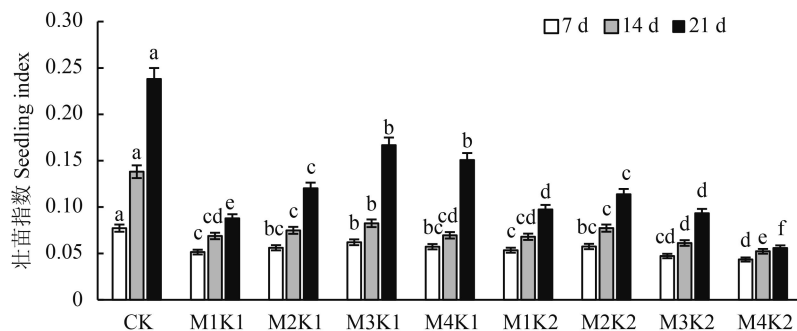


图 1 亚低温下不同镁、钾水平对黄瓜壮苗指数的影响

Fig. 1 Magnesium and potassium interaction effect of hypothermia in cucumber seedling index

[注 (Note)：柱上不同字母表示同一取样时间点下不同处理间差异达 5% 显著水平

Different letters above the bars mean significant difference between different treatments at the same sampling time point at the 5% level.]

mmol/L 时, M4K2 比 M4K1 低 36.4%。综合考虑亚低温下镁、钾对壮苗指数的影响, 可以得出在 21 d 时, 处理 M3K1 和 M4K1 分别取得最大值为 0.17 和 0.16, 仅比 CK 低 30.0% 和 36.7%。在 K^+ 浓度为 6mmol/L 的同时, 适当增高营养液中的 Mg^{2+} 浓度, 有利于缓解亚低温对黄瓜幼苗的伤害作用。

2.1.2 亚低温下镁、钾水平对黄瓜根系形态的影响
由表 2 可以看出, 与 CK 相比, 亚低温下 M1K1 处理的根系总长、根系总表面积和总体积分别减少了 7.4%、7.9% 和 25.4%, 而根系平均直径增加 22.2%。

表 2 亚低温下处理 21 d 时黄瓜幼苗根系形态指标
Table 2 Index values of root morphology of cucumber seedlings under suboptimum temperature

处理 Treatment	总长 (cm) Total length	总表面积 (cm ²) Total surface area	平均直径 (mm) Average diameter	总体积 (cm ³) Total volume
CK	1402.9 b	296.3 a	0.72 c	10.2 b
M1K1	1298.9 bc	190.1 bc	0.88 ab	7.6 bc
M2K1	1245.5 c	165.2 c	0.92 a	6.8 c
M3K1	1224.6 c	140.7 c	0.94 a	6.4 c
M4K1	986.4 d	116.5 d	0.86 b	5.7 d
M1K2	1545.6 a	248.6 b	0.91 a	11.9 a
M2K2	1311.4 bc	188.6 bc	0.93 a	8.5 b
M3K2	1205.5 c	147.3 c	0.90 ab	8.0 bc
M4K2	1008.3 d	118.6 d	0.87 ab	5.4 d

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

亚低温下, 不同镁、钾水平对黄瓜幼苗的根系形态影响不尽相同。当 K^+ 浓度一定时, 随着营养液中 Mg^{2+} 浓度的升高, 黄瓜幼苗的根长、根系总表面积和总体积均下降, 当营养中 K^+ 浓度不变, Mg^{2+} 浓度从 2 mmol/L 增加到 8 mmol/L 时, 黄瓜幼苗的根系总长、根系总表面积和总体积分别减少了 24.1%、38.7% 和 33.6%。而当 Mg^{2+} 浓度一定时, 提高营养液中的 K^+ 浓度, 能显著的增加总根长和总根表面积, 处理 M1K2 的总根长、根系总表面积和总体积比 M1K1 处理分别高出 19.0%、30.7% 和 56.5%。表明在根长和根表面积生长时, 镁和钾发挥着相反的作用。常温下黄瓜幼苗的根系平均直径显著低于亚低温下的根系平均直径, 且与 Mg^{2+} 浓度关系更大, 随着 Mg^{2+} 浓度升高而先升高后下降, M3K1 和 M2K2 处理的根系平均直径有最大值, 分别为 0.94 和 0.93

mm, 分别比 CK 处理的根平均直径高 30.5% 和 29.1%, 而 K^+ 浓度对根平均直径影响不显著。根系总体积与根系总表面积和根系平均直径相关, M1K2 处理的根系总体积显著高于 CK 处理, 达 11.9 cm³。

不同直径范围内的根系在吸收水和矿质元素的能力上存在区别, 一般认为细根的吸收能力强于粗根, 本试验根据粗细将根系分为 > 1.0 mm, 0.5~1.0 mm 和 0~0.5 mm 三个直径范围, 分别统计了各直径范围内的总根长 (表 3)。由表 3 可以看出, 亚低温处理 21 d 后, 各处理在 0~0.5 mm 范围内的根系的根长显著低于对照, 0~0.5 mm 的根长与 Mg^{2+} 浓度关系不显著, 而与 K^+ 浓度密切相关, K^+ 浓度为 12 mmol/L 的 4 个处理在 0~0.5 mm 范围内的根长总数分别比 K^+ 浓度为 6 mmol/L 的各处理高出 236.0、155.3、80.9、26.9 cm。M2K1、M3K1 和 M1K2 处理在 0.5~1.0 mm 范围内的根长总数显著高于 CK 但彼此间差异不显著, M1K1 处理在 > 1.0 mm 范围内的根长总数比 CK 高出 121.7 cm, 而 M2K1、M3K1 和 M2K2 处理均与 CK 无显著差异。

当营养液中 K^+ 浓度为 6 mmol/L 时, 4 个处理在 0~0.5 mm 范围内的根长总数占总根长的比例比 CK 降低了 16%~21%, 而当营养液中 K^+ 浓度为 12 mmol/L 时, 4 个处理的 0~0.5 mm 根长占总根长的比例比 CK 降低了 9%~13%, 表明在 0~0.5 mm 范

表 3 亚低温下不同镁、钾处理黄瓜幼苗不同直径范围内根长及所占比例
Table 3 Root length within certain diameter range and their ratio in total root length of cucumber seedlings in different Mg and K treatments

处理 Treatment	直径范围 (mm) Diameter range			占总根长比例 (%) Ratio in total		
	0~0.5	0.5~1.0	>1.0	0~0.5	0.5~1.0	>1.0
CK	865.7 a	369.3 c	167.9 cd	61.7	26.3	12.0
M1K1	525.5 d	483.7 b	289.6 a	40.5	37.2	22.3
M2K1	533.3 d	531.6 a	180.7 c	42.8	42.7	14.5
M3K1	543.6 cd	516.2 a	164.7 cd	44.4	42.2	13.5
M4K1	449.5 d	318.5 cd	218.5 b	45.6	32.3	22.2
M1K2	761.5 b	534.7 a	249.3 ab	49.3	34.6	16.1
M2K2	688.5 c	481.4 b	141.6 d	52.5	36.7	10.8
M3K2	624.6 c	358.3 c	122.6 d	51.8	29.7	18.5
M4K2	476.3 d	287.3 d	94.7 f	47.3	28.5	24.3

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

围内的根长占总根长的比例与 K^+ 浓度相关, 而与 Mg^{2+} 浓度关系不大。根系平均直径在 0.5~1.0 mm 范围内的根长总数占总根长的比例各处理均高于 CK。当营养液中 K^+ 浓度一定时, 随着 Mg^{2+} 浓度升高, 根系平均直径在 0.5~1.0 mm 范围内的根长总数占总根长的比例表现出先升高后下降的规律, M2K1 和 M3K1 处理有最高值 42.7% 和 42.2%, 分别比 CK 高出 16.4% 和 15.8%, 表明 Mg^{2+} 对 0.5~1.0 mm 影响更大。在 > 1.0 mm 范围内的根系比例除 M2K2 处理均高于 CK 处理。当 Mg^{2+} 浓度相同时, 随着 K^+ 浓度升高, 对应的处理根系在 > 1.0 mm 范围内的根长总数占总根长比例先下降后升高, 其中 M1K2 处理比 M1K1 处理低 6.1%, 而 M4K2 处理比 M4K1 处理高出 2.1%, 表明在低 Mg^{2+} 浓度时, 根系平均直径在 > 1.0 mm 范围内的根长总数占总根长比例与 K^+ 浓度负相关, 而当 Mg^{2+} 浓度较高时, K^+ 浓度能促进根系平均直径在 > 1.0 mm 范围内根长的生长。

2.2 亚低温下不同镁、钾水平对黄瓜干物质积累和分配的影响

从图 2 可以看出, 亚低温下的黄瓜幼苗茎叶干物质含量显著低于对照, 而根系干物质含量高于对照。亚低温下, 随镁水平的提高, 黄瓜茎和叶中的干物质含量均表现为先升高后下降的趋势, 而根中

干物质则随 Mg^{2+} 浓度的增加而升高, 在 M4K1 处理达最大值, 为 0.07 g, 比 CK 高出 97.2%, 表明在亚低温下浓度较高的镁能增加根系的生长从而抵御低温的伤害作用。随钾水平的升高, 黄瓜根系干物质含量无显著差异, 在茎中, 当 Mg^{2+} 浓度为 2 mmol/L 时, M1K2 处理比 M1K1 高出 37.1%, 而当 Mg^{2+} 浓度升高到 8 mmol/L 时, M4K2 比 M4K1 处理下降 65.3%, 在叶中, 也表现出类似的规律, M2K2 处理与 M2K1 处理差异不显著, 而 M4K2 比 M4K1 下降 39.6%, 表明 Mg^{2+} 浓度和 K^+ 浓度共同影响黄瓜幼苗的茎叶干物质生产。

黄瓜干物质在根和茎中的分配率随镁水平升高逐渐降低, 而在叶中的分配率则逐渐升高。表明镁素显著调控了黄瓜各器官的生长, 尤其显著促进了叶片的生长; 钾对干物质在黄瓜各器官分配率的影响无明显规律, 表明钾素对黄瓜各器官生长的调控作用较小。图 2 还显示, 镁钾交互仅对黄瓜根系干物质分配率有极显著影响, 而对叶片及茎相关指标则无显著影响。

2.3 亚低温下不同镁、钾水平对黄瓜钾镁元素吸收和分配的影响

由表 4 看出, 亚低温下不同镁钾处理黄瓜幼苗不同器官的钾元素含量和吸收量不相同, 根系的各

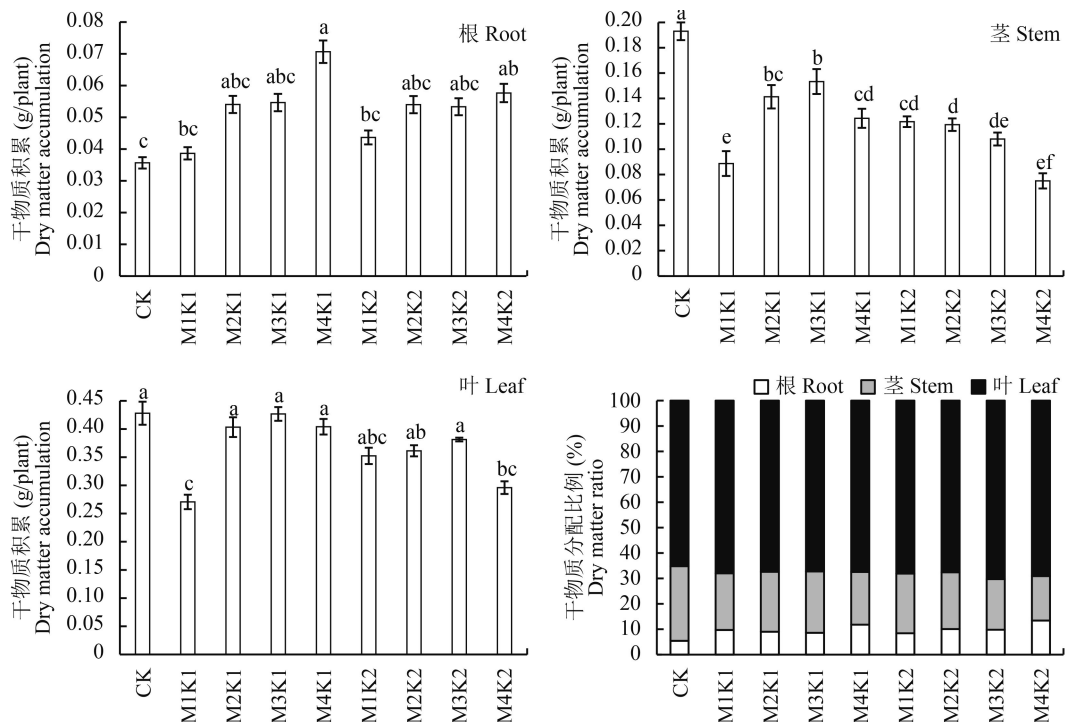


图 2 亚低温下不同镁、钾水平对黄瓜幼苗根、茎、叶干物质含量和分配比例的影响

Fig. 2 Effect of magnesium and potassium levels on the content of dry matter and the distribution ratio of cucumber seedlings root, stem and leaf under suboptimum temperature

表 4 亚低温下不同镁、钾处理黄瓜幼苗各器官钾吸收量
Table 4 K uptake in different organs of cucumber seedlings under different K and Mg treatments at suboptimum temperature

处理 Treatment	钾含量 (mg/kg) K content			钾吸收量 (mg/plant) K absorption		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	20.2 c	38.1 a	21.0 a	0.7 d	7.4 a	9.0 a
M1K1	32.9 a	31.8 b	14.8 b	1.3 b	2.8 c	4.0 cd
M2K1	20.0 c	22.6 c	14.0 b	1.1 c	3.2 bc	5.6 b
M3K1	24.3 bc	20.6 c	14.0 b	1.3 b	3.2 bc	6.0 b
M4K1	23.9 bc	12.6 d	13.2 bc	1.7 a	1.6 d	5.3 b
M1K2	27.4 b	30.5 b	10.2 c	1.2 bc	3.7 b	3.6 d
M2K2	22.9 bc	21.2 c	11.2 c	1.2 bc	2.5 cd	4.1 c
M3K2	28.2 b	29.7 b	15.2 b	1.5 ab	3.2 bc	5.8 b
M4K2	26.4 b	23.6 c	14.2 b	1.5 ab	1.8 d	4.2 c

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

处理钾含量显著高于对照, 而茎叶中钾含量显著低于对照。亚低温下, M1K1 处理的根系钾含量最高为 32.9 mg/kg, 而随着营养液中的 Mg^{2+} 浓度升高, 茎和叶中钾含量一直下降, 茎中 M4K1 比 M1K1 处理 K^{+} 含量下降了 19.3 mg/kg, 表明 Mg^{2+} 和 K^{+} 为拮抗效应, 且随着营养液中 K^{+} 浓度升高, 黄瓜幼苗茎和叶的 K^{+} 含量也升高。

亚低温下的各处理根系钾吸收量均显著高于对照, 当营养液中 K^{+} 为 12 mmol/L 时, 各处理的根系钾吸收量差异不显著, 茎中钾吸收量表现为亚低温下的处理显著低于对照, 在营养液中 K^{+} 浓度较低时, 茎中钾吸收量随着 Mg^{2+} 浓度升高先升高后下降, M2K1 处理钾吸收量较 M1K1 处理高出 0.4 mg/plant, 当营养液中 K^{+} 为 12 mmol/L 的较高浓度时, Mg^{2+} 浓度较低的 M1K2 处理比 Mg^{2+} 较高的处理的钾吸收量高出 2.0 mg/plant, 表明在营养液中 K^{+} 较高时, 低浓度的 Mg^{2+} 与 K^{+} 表现出协同作用, 而 Mg^{2+} 也较高浓度时, 表现出拮抗作用。叶中钾吸收量也有和茎相似的规律, 都表现为随着营养液中 Mg^{2+} 浓度升高钾吸收量先升高后下降。

由表 5 可知, 亚低温下的各处理的根、茎、叶的镁含量均显著低于对照, 不同镁浓度处理, 随着营养液中 Mg^{2+} 的提高, 黄瓜幼苗根和叶中镁含量相应增加, 在茎中表现为先增加后减少, M2K2 处理达

表 5 亚低温下不同镁、钾处理黄瓜幼苗各器官的镁吸收量
Table 5 Mg uptake in different organs of cucumber seedlings under different Mg and K treatments at suboptimum temperature

处理 Treatment	镁含量 (mg/kg) Mg content			镁吸收量 (mg/plant) Mg absorption		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	9.0 a	18.3 a	12.0 a	0.3 b	3.5 a	5.2 a
M1K1	6.4 c	11.1 c	7.9 bc	0.3 b	1.0 d	2.1 d
M2K1	7.9 ab	13.5 bc	7.1 c	0.4 b	1.9 b	2.9 c
M3K1	8.4 ab	14.1 b	8.4 b	0.5 ab	2.2 b	3.6 b
M4K1	8.1 ab	13.8 bc	8.5 b	0.6 a	1.7 bc	3.4 b
M1K2	6.2 c	13.6 bc	6.0 d	0.3 b	1.7 bc	2.1 d
M2K2	7.7 b	14.5 b	5.8 d	0.4 b	1.7 bc	2.1 d
M3K2	8.0 ab	14.1 b	7.8 bc	0.4 b	1.5 c	3.0 bc
M4K2	8.6 ab	13.8 bc	7.7 bc	0.5 ab	1.0 d	2.3 d

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments at the 0.05 level.

到最高为 14.5 mg/kg。随着营养液中的 K^{+} 浓度升高, 根和茎镁含量无显著变化, 而叶中的镁含量显著下降。

亚低温根茎叶的钾吸收量均较 CK 显著下降, M1K1 处理的根茎叶镁吸收量较 CK 降幅分别为 25.0%、72.2% 和 58.8%, 表明亚低温显著影响了镁元素的向上传输。根中镁吸收量随着营养液中 Mg^{2+} 升高显著增加, M3K1 和 M4K2 处理均比 CK 高出 0.2 mg/plant, 茎和叶中镁吸收量均表现为随着营养液中 Mg^{2+} 浓度升高而先升高后下降的趋势, M3K1 茎和叶中镁吸收量比 M1K1 处理分别高出 1.2 mg/plant 和 1.4 mg/plant。

3 讨论

壮苗指数是幼苗质量的综合数量化指标, 是评价幼苗质量优劣的参考。本试验结果表明, 亚低温下壮苗指数显著低于常温处理, 且亚低温下适宜的镁、钾浓度能显著提高黄瓜幼苗的壮苗指数。在 K^{+} 浓度低时, 镁、钾元素表现一定的协同作用, 在 K^{+} 浓度较低的同时, 适当增高营养液中的 Mg^{2+} 浓度, 有利于缓解亚低温对黄瓜幼苗的伤害作用。

植物根系在植物整个生命活动中具有极其重要的作用, 它不仅具有吸收水分和养分、输导和保存养分的作用, 还有合成氨基酸、蛋白质和激素的功

能,同时对植物体具有机械支撑作用^[9-10]。植物根系的生长发育不仅受到遗传基因的控制,而且强烈地受到生长环境如温度、养分、水分状况等诸多因素的影响^[11]。

本试验结果表明,镁和钾在根系生长中的作用表现相反,当 Mg^{2+} 浓度一定时,提高营养液中 K^+ 的浓度,能显著地增加总根长和总根表面积,表明钾主要影响根系的总根长和总表面积,这与高福钊等^[12]的研究不尽相同。另外,根系分级普遍运用于植物根系研究中,一般认为细根对植物水分和营养的吸收发挥更直接的作用^[13],本研究表明镁和钾对根系形态影响不同, K^+ 浓度与根长和根系总表面积成正相关,且主要影响 0~0.5 mm 的根系; Mg^{2+} 与根系平均直径正相关且主要影响 > 1.0 mm 的根系,这与丁玉川等^[9]在水稻根系上的研究一致。除了两者单独作用外,钾、镁比例也影响了黄瓜根系的生长,较高的钾、镁比例有利于黄瓜的 0~0.5 mm 根系生长及根系总长和总体积的增加,而显著地抑制了 0.5~1.0 mm 根系和 > 1.0 mm 的生长(表 2、表 3),这与 Hermans 等^[14]的研究结果不同,可能与本试验所选取的温度条件和离子浓度范围不同有关。

矿质元素积累与植株干物质积累密切相关,随着干物质的积累,矿质元素在植株体内不断增加,植株对矿质元素的积累又是干物质积累的基础^[15]。钾、镁均为带正电的阳离子,二者的浓度和比例直接影响植物对镁钾的吸收和利用。已有研究表明^[16],钾、镁肥配施对植物的矿质元素吸收、运转与分配有显著影响,关于钾、镁营养及其相互作用普遍认为施钾越多则植物对镁的吸收越少;但也有研究表明^[17],钾水平较低时,适当的提高 Mg^{2+} 浓度二者表现为一定的协同作用。本试验结果表明,营养液中镁离子浓度低时,一定程度的提高 Mg^{2+} 浓度能促进对钾的吸收,营养液中的 Mg^{2+} 和 K^+ 在黄瓜幼苗的镁钾元素吸收上表现为协同作用,而当 Mg^{2+} 大于 6 mmol/L 时,镁和钾吸收表现为显著的拮抗作用,这与 Swift 等^[17]的研究结果相似。另外,营养液中高浓度的 K^+ 也对钾的吸收影响不显著,这与王千等^[18]的研究结果相反。镁的吸收数据表明亚低温下根、茎、叶中的 Mg^{2+} 分别比 CK 处理下降 25%, 72% 和 58%,表明亚低温下 Mg^{2+} 的向上传输受到了严重影响,而 M3K1 处理即适量增加营养液中的 Mg^{2+} 浓度,有利于缓解这一阻碍效果。

根系是影响植物营养元素吸收的一个重要因素,本研究主要从根系形态、不同直径范围的根系

比例以及镁钾吸收方面考虑,结果发现,亚低温处理 21 d 后,各处理根系在 0~0.5 mm 范围内的根长总数占总根长的比例显著低于 CK,而根系在 0.5~1.0 mm 和 > 1.0 mm 范围内的根长总数所占比例显著高于 CK,表明了亚低温主要抑制了黄瓜幼苗 0~0.5 mm 范围内根系的生长,而亚低温下,镁和钾在根系中的含量并无明显下降,这可能是因为低温胁迫下,直径为 0.5~1.0 mm 和 > 1.0 mm 的根系中镁和钾吸收量增加,但是镁和钾的向上传输却受到显著抑制。

本试验中, Na^+ 添加浓度最高为 9 mmol/L,此浓度的 Na^+ 对黄瓜幼苗镁钾吸收的影响微小^[1],故可不考虑营养液中添加的 Na^+ 的影响。有研究表明, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 三者之间彼此有拮抗作用,本试验中,增加了营养液中的 K^+ 和 Mg^{2+} ,也必然会影响到其他营养元素的吸收,而钾和镁的吸收也会受到营养液中 Ca^{2+} 的影响;本试验中, NO_3^- 和 Ca^{2+} 分别为 14 mmol/L 和 3.5 mmol/L,李娟等^[16]的研究表明,此时的营养液中的 Ca^{2+} 会抑制黄瓜幼苗对镁和钾的吸收,关于 Ca^{2+} 的影响,需要进一步的深入研究。

本研究发现,黄瓜在亚低温胁迫下,根系干物质增加,导致根冠比升高,这与明村豪等^[19]的研究一致。周羊梅等^[20]的研究表明,在遭受低温胁迫后,小麦的干物质在茎和叶中的分配比例下降,主要向根和新分蘖的叶片中分配。本研究结果表明,在亚低温下 M1K1 处理的根和叶中的干物质分配比例分别较 CK 增加 4.3% 和 2.7%,这可能是因为亚低温下“源”中的干物质转运的酶活性下降,导致干物质的运转速率下降^[21],而增加营养液中的 Mg^{2+} 浓度可以有利于干物质向茎的分配增多,与谢小玉等^[8]在黄瓜上的研究结果类似。在营养液中 K^+ 浓度较低时,随 Mg^{2+} 浓度升高,根和茎中干物质含量升高,叶中干物质表现为先升高后下降,且营养液中高浓度的 Mg^{2+} 有利于干物质向叶中分配,可能是叶绿素的合成需要镁参与的原因,需要进一步研究。

4 结论

1) 亚低温下适当增高营养液中的 Mg^{2+} 浓度至 6 mmol/L,能显著提高黄瓜幼苗的壮苗指数。

2) Mg^{2+} 与根系平均直径正相关且主要影响 > 1.0 mm 的根系;较高的 K/Mg 比有利于黄瓜 0~0.5 mm 根系生长,显著抑制 0.5~1.0 mm 和 > 1.0 mm 的根系生长。

3) 亚低温下,当营养液中 K^+ 浓度为 6 mmol/L

时, 随 Mg^{2+} 浓度升高, 根和茎中干物质含量升高, 叶中干物质表现为先升高后下降的趋势, 且营养液中高浓度的 Mg^{2+} 有利于干物质向叶中分配。当营养液中 Mg^{2+} 低于 6 mmol/L 时, 提高 Mg^{2+} 浓度能促进对钾的吸收; 而当 Mg^{2+} 大于 6 mmol/L 时, 显著影响钾的吸收。

综上, 将营养液中的 Mg^{2+} 浓度提高至 6 mmol/L, 黄瓜幼苗的壮苗指数、根系形态、干物质积累和钾镁元素综合效应表现较好, 能有效地抵御亚低温对黄瓜幼苗的伤害。

参 考 文 献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003. 56–58.
Lu J L. Plant nutrition science[M]. Beijing: China Agricultural University Press. 2003. 56–58.
- [2] 曹秀, 夏仁学, 杨环宇, 等. 沙培条件下磷, 钾, 钙亏缺对枳(*Poncirus trifoliata*)幼苗根系形态及营养吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 981–988.
Cao X, Xia R X, Yang H Y, *et al.* Effects of P, K and Ca deficiency on the root morphology and nutrient absorption of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 981–988.
- [3] Shaul O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg[J]. Biometals, 2002, 15(3): 307–321.
- [4] 王伟玲. 钾、钙、水杨酸等物质对水曲柳苗木抗寒性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2010.
Wang W L. Effects of K, Ca and substance as SA on cold resistance of *fraxinus mandshurica*[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Forestry University, 2010.
- [5] 李俊, 李建明, 胡晓辉, 等. 亚低温及钾肥对温室番茄光合作用和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(12): 2471–2478.
Li J, Li J M, Hu X H, *et al.* Effects of sub-low temperature and potassium fertilizer on photosynthesis and fruit quality of greenhouse tomato[J]. Acta Botanica. Boreal-Occident Sinica, 2012, 32(12): 2471–2478.
- [6] 游明鸿, 刘金平, 毛凯, 等. 钾肥对提高假俭草抗寒性作用的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(2): 67–70.
You M H, Liu J P, Mao K, *et al.* Study on the influence of potassium on cold hardness of centipedegrass[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(2): 67–70.
- [7] 朱帅. 镁对低温弱光下黄瓜光合作用的调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2014.
Zhu S. Study on regulatory of magnesium on photosynthesis of cucumber under low temperature and low light intensity[D]. Tai'an: MS Thesis, Shandong Agricultural University, 2014.
- [8] 谢小玉, 邹志荣, 邓小勇, 吴霞. 低温和镁胁迫对黄瓜生长及光合特性的影响[J]. 重庆大学学报, 2009, (2): 227–232.
Xie X Y, Zou Z R, Deng X Y, Wu X. Effects of magnesium stress and temperature on the growth and photosynthetic character of cucumber seedlings[J]. Journal of Chongqing University, 2009, (2): 227–232.
- [9] 丁玉川, 罗伟, 任小利, 等. 不同镁浓度对水稻根系生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 537–543.
Ding Y C, Luo W, Ren X L, *et al.* Effects of different Magnesium nutrition on root growth and physiological characteristics of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2009, 15(3): 537–543.
- [10] 曹卫星, 何杰升, 丁艳锋. 作物学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 221–222.
Cao W X, He J S, Ding Y F. General crop science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 221–222.
- [11] 向小亮, 宁书菊, 魏道智. 根系的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 105–112.
Xiang X L, Ning S J, Wei D Z. Advances of Research on Roots[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(17): 105–112.
- [12] 高福利, 霍建勇. 低温逆境对黄瓜生长发育的影响[J]. 吉林蔬菜, 2004, (1): 27–28.
Gao F Z, Huo J Y. Effects of low temperature stress on the growth and development of Cucumber[J]. Jilin Vegetables, 2004, (1): 27–28.
- [13] 王鹏, 牟溥, 李云斌. 植物根系养分捕获塑性与根竞争[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1184–1196.
Wang P, Mu B, Li Y B. Review of root nutrient foraging plasticity and root competition of plants[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(11): 1184–1196.
- [14] Hermans C, Verbruggen N. Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(418): 2153–2161.
- [15] 喻方圆, 徐锡增. 植物逆境生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 6–11.
Yu F Y, Xu X Z. A review on plant stress physiology[J]. World Forestry Research, 2003, 16(5): 6–11.
- [16] 李娟, 章明清, 林琼, 等. 钾、钙、镁交互作用对烤烟生长和养分吸收的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(4): 529–533.
Li J, Zhang M Q, Lin Q, *et al.* Effects of Interaction of potassium, calcium and magnesium on flue-cured tobacco growth and nutrient absorption[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2005, 32(4): 529–533.
- [17] Swift M L, Bittman S, Hunt D E, *et al.* The effect of formula-tion and amount of potassium fertilizer on macromineral concentration and cation-anion difference in tall fescue[J]. American air Science Association, 2007, 90: 1063–1072.
- [18] 王千, 张淑香, 依艳丽. 钾镁水平对番茄苗期生长、根系形态及钾素吸收和生理利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 51–55.
Wang Q, Zhang S X, Yi Y L. Effect of rational ratio of potassium and magnesium on growth, root morphological traits, potassium uptake and utilization efficiency tomato seedling[J]. Soil and Fertilizer in China, 2012, (2): 51–55.
- [19] 明村豪, 蒋芳玲, 王广龙, 等. 黄瓜壮苗指标与辐射热积关系的模拟模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 109–113.
Ming C H, Jiang F L, Wang G L, *et al.* Simulation model of cucumber healthy indexes based on radiation and thermal effectiveness[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 109–113.
- [20] 周羊梅, 顾正中, 王安邦, 等. 小麦主茎光合产物的运转与分配[J]. 核农学报, 2008, (1): 80–83.
Zhou Y M, Gu Z Z, Wang A B, *et al.* The translocation and distribution of photosynthate in wheat stem[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008, (1): 80–83.
- [21] Pieters A J, Paul M J, Lawlor D W. Low sink demand limits photosynthesis under Pi deficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52: 1083–1091.