应用生态学报 2015年5月 第26卷 第5期
Chinese Journal of Applied Ecology, May 2015, **26**(5): 1343-1350

亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗生长及镁吸收的影响*

杨全勇[1] 王秀峰[1,2**] 韩宇睿[1] 杨静静[1] 魏 珉[1,2,3] 杨凤娟[1,2] 史庆华[1,2] 李 岩[1]
([1]山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; [2]作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; [3]农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, 山东泰安 271018)

摘 要 在亚适温条件(昼/夜 18 ℃/12 ℃)下,研究硝酸盐胁迫1和14 d对黄瓜幼苗生长及镁吸收的影响.结果表明:亚适温条件下,硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗生长产生显著抑制作用.与适温对照相比,其叶片的净光合速率、蒸腾速率、光系统Ⅱ最大光化学效率和实际光化学效率均明显下降;幼苗根、茎、叶中镁含量明显下降,尤以处理Ⅳ(亚适温+140 mmol·L^{-1} NO_3^-+1 mmol·L^{-1} Mg^{2+})最为显著;Mg^{2+}对K^+和Ca^{2+}吸收有拮抗作用,增加营养液中的Mg^{2+}浓度,可使黄瓜幼苗的缺镁症状得到缓解.

关键词 黄瓜幼苗; 亚适温; 硝酸盐胁迫; 镁
文章编号 1001-9332(2015)05-1343-08 **中图分类号** S311, S642.2 **文献标识码** A

Effects of NO_3^- stress on cucumber seedling growth and magnesium absorbing under suboptimal temperature. YANG Quan-yong[1], WANG Xiu-feng[1,2], HAN Yu-rui[1], YANG Jing-jing[1], WEI Min[1,2,3], YANG Feng-juan[1,2], SHI Qing-hua[1,2], LI Yan[1] ([1]*College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *Shandong, China*; [2]*State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an* 271018, *Shandong, China*; [3]*Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Tai'an* 271018, *Shandong, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(5): 1343-1350.

Abstract: The effects of NO_3^- stress on the growth and the magnesium absorption of cucumber seedlings were investigated after 1 and 14 d of suboptimal temperature [18 ℃/12 ℃ (day/night)] treatment. The results indicated that the growth, net photosynthetic rate, transpiration rate, F_v/F_m and Φ_{PSII} of cucumber seedlings were significantly inhibited by NO_3^- stress under suboptimal temperature. The magnesium content of cucumber seedlings was also significantly decreased compared with control treatment, especially in the Ⅳ treatment (suboptimal temperature +140 mmol·L^{-1} NO_3^-+1 mmol·L^{-1} Mg^{2+}), and the antagonistic impact of magnesium ion absorption on the absorption of potassium and calcium ion was observed. The magnesium deficiency symptom of cucumber seedlings could be partly alleviated by increasing the concentration of magnesium ion in the nutrient solution.

Key words: cucumber seedling; suboptimal temperature; NO_3^- stress; magnesium.

我国北方大部分地区的设施黄瓜栽培以非加温的日光温室和塑料大棚为主,低温冷害频繁发生,弱光亚适温逆境也较为常见[1-2].黄瓜属于喜温、喜光植物,冬春季节的弱光亚适温严重影响了黄瓜的产量和品质[3-5].同时,设施栽培还具有封闭性的特点,土壤缺少雨水淋洗,并且长期处于高度集约化、高复种指数、高肥料施用量的生产状态下,极易发生土壤次生盐渍化,影响植物正常生理代谢,导致植物生长量下降[6-8].目前,土壤的次生盐渍化已成为国内外设施栽培中普遍存在的问题[9],而其阴离子主要是NO_3^-,占阴离子总量的67%~76%,阳离子则以Ca^{2+}和K^+为主[10-11].

土壤次生盐渍化引起的渗透胁迫会对作物造成一系列的损害.研究表明,温室土壤发生次生盐渍化

*国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25)和山东省财政支持农业重大应用技术创新项目(2009)资助.
**通讯作者. E-mail: xfwang@sdau.edu.cn
2014-04-24 收稿,2015-02-26 接受.

致使土壤溶液浓度过高、渗透势增加,降低了土壤与植物根系和植物叶片间的水势梯度,导致叶片细胞膨压下降、气孔关闭,蒸腾作用和光合作用降低,使植物生长发育受阻,干物质生产降低[12-15].在较高浓度的硝酸盐胁迫下,黄瓜幼苗出现了较为严重的受胁迫症状,光饱和点和羧化效率减小,光补偿点和CO_2补偿点升高,黄瓜幼苗利用强光和弱光的能力降低,幼苗中 Rubisco 的活性以及固定低浓度CO_2的能力降低,叶绿体超微结构受到不同程度的损害.由于非气孔限制因素,黄瓜幼苗净光合速率明显下降.在高浓度硝酸盐胁迫下,黄瓜幼苗叶片叶肉细胞气孔扩散阻抗增大.光系统Ⅱ反应中心开放程度降低,电子传递受到抑制,导致两个光系统之间激发能分配不平衡,光化学效率降低,CO_2同化力下降,最终影响黄瓜幼苗的生长[16].但是,目前有关高浓度硝酸盐胁迫对植株离子吸收的影响及其机理的研究较少.

镁是植物生长发育的重要元素之一[17],在叶绿体发育和维持功能过程中发挥着重要作用;镁参与类囊体膜的组装和基粒垛叠,对维持叶绿体结构有重要作用[18].镁可促进光合作用的碳同化[19-20],还是许多酶的活化剂[21-22],能够稳定 DNA 和 RNA,对转录和翻译过程也有重要作用[23].研究表明,影响温室黄瓜镁吸收的主要因素是根际镁离子浓度、其他离子的拮抗作用以及环境因子(包括地温、气温和光照等)的影响[24-25].本试验通过研究亚适温条件下硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗镁吸收的影响,探求在亚适温和硝酸盐胁迫下的最佳镁肥施用量,避免废液的富营养化及对环境造成的污染.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 3—8 月在山东农业大学玻璃温室内进行.供试黄瓜品种为'津优 1 号',采用常规方法浸种催芽,挑选发芽整齐的种子播于装有基质(草炭∶蛭石=2∶1)的穴盘中,待第二片真叶展平时,选取生长一致的幼苗移栽至盛有 10 L 营养液的水培盆中,每盆 8 株,每 3 d 更换一次营养液,培养至 3 叶 1 心时进行处理.营养液中大量元素参照山崎配方,微量元素参照 Arnon 配方,以浓 H_2SO_4 调整营养液 pH 至 5.5~6.5.

将水培黄瓜幼苗转移至宁波产 GXZ 型光照培养箱内,在适温下适应 3 d 后进行亚适温处理.处理前为 0 d.亚适温处理温度为 18 ℃/12 ℃(昼/夜),适温对照为 25 ℃/18 ℃(昼/夜)[5].光量子通量密度(PFD)为 400 μmol·m^{-2}·s^{-1},日照时数 12 h,相对湿度 80%左右.试验设计 7 个处理:CK:适温+常规营养液(山崎配方,Mg^{2+}浓度 2 mmol·L^{-1});Ⅰ:亚适温+14 mmol·L^{-1} NO_3^-+1 mmol·L^{-1} Mg^{2+};Ⅱ:亚适温+14 mmol·L^{-1} NO_3^-+2 mmol·L^{-1} Mg^{2+};Ⅲ:亚适温+14 mmol·L^{-1} NO_3^-+3 mmol·L^{-1} Mg^{2+};Ⅳ:亚适温+140 mmol·L^{-1} NO_3^-+1 mmol·L^{-1} Mg^{2+};Ⅴ:亚适温+140 mmol·L^{-1} NO_3^-+2 mmol·L^{-1} Mg^{2+};Ⅵ:亚适温+140 mmol·L^{-1} NO_3^-+3 mmol·L^{-1} Mg^{2+}.NO_3^-由 $Ca(NO_3)_2·4H_2O$ 和 KNO_3 提供,各占 1/2,pH 由 H_2SO_4 调节,保持在 5.5~6.5.胁迫处理开始时,为防止盐刺激,NO_3^-浓度按每天递增总浓度的 1/4 处理,直至达到预定浓度 140 mmol·L^{-1},然后更换成标准处理营养液.每个处理 3 次重复,每 3 d 更换 1 次营养液.

处理 1 和 14 d 后,分别取各处理植株上数第二至第四片叶片,测定各生理指标.重复 3 次,求平均值.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生长量的测定 处理前、后分别用直尺测定黄瓜幼苗的株高、叶宽和叶长计算叶面积[26];称量法测定干物质量.

1.2.2 电导率的测定 取鲜叶,用自来水冲洗并蘸干表面水分,称取 0.5 g,装入大试管中,加入 20 mL 蒸馏水,抽气 3 次,室温保持 3~4 h,多次摇动,测定电导率(S_1),封口沸水浴 10 min,冷却,平衡 10 min 后测电导率(S_2),同时测定蒸馏水电导率(S_0).

相对电导率=$(S_1-S_0)/(S_2-S_0)\times100\%$

1.2.3 光合色素含量的测定 参照李合生等[27]的方法,以 96%乙醇浸提剪碎的叶片 48 h,用日本产 UV-160 分光光度计测定吸光度值,计算叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、[Chl (a+b)]含量.用 Li-6400 型光合速率测定仪(美国 Li-Cor 公司),于晴天 9:00—11:00测定见光一致的上数第三片平展叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r),测定时光强约为 800 μmol·m^{-2}·s^{-1},温度为 25 ℃,空气 CO_2 浓度为(380±10 μmol·mol^{-1}),每处理随机选取 5 株,求平均值.

1.2.4 叶绿素荧光参数的测定 在各处理中选取生长一致的黄瓜幼苗 5 株,将照光一致的上数第三片叶暗适应 30 min,用英国 Hansatech 生产的 FMS2 型

表 1　亚适温和硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗株高和叶面积的变化

Table 1　Changes of plant height and leaf area in cucumber seedlings under suboptimal temperature and NO_3^- stress

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)			叶面积 Leaf area (cm^2)		
	处理前 Before treatment	处理后 After treatment	增加量 Increment	处理前 Before treatment	处理后 After treatment	增加量 Increment
CK	6.50±0.50a	25.00±1.00a	18.50±1.50a	95.40±2.78ab	581.99±3.60a	486.59±5.69a
Ⅰ	6.17±0.29a	10.17±0.29d	4.00±0.50d	87.64±6.54bc	228.39±5.82c	140.76±1.63d
Ⅱ	6.50±0.50a	12.00±0.50bc	5.50±0.87bcd	86.67±7.32bc	278.57±7.28b	191.90±14.20bc
Ⅲ	6.33±0.29a	12.67±0.29b	6.33±0.29bc	84.67±5.42c	297.18±6.16b	212.51±5.32b
Ⅳ	5.83±0.30a	7.67±0.76e	1.83±0.58e	84.18±4.35c	166.61±7.10d	82.43±4.29e
Ⅴ	6.17±0.28a	11.00±0.50cd	4.83±1.04cd	89.04±2.02bc	234.47±5.36c	145.42±6.22d
Ⅵ	6.17±0.29a	13.00±0.50b	6.83±0.29b	98.40±2.36a	280.70±4.35b	182.30±6.42c

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

调制式荧光仪测定相应光强下的各项荧光参数[28].

1.2.5 镁离子含量测定　不同部位新鲜黄瓜幼苗样品用去离子水洗净后,吸水纸吸干水分,105 ℃下杀青 15 min,70 ~ 80 ℃下烘干,磨碎后过 60 目筛,精确称取 0.1000 g 样品放入硝煮管中,加入 5 mL 浓 H_2SO_4,放置过夜,使样品充分被氧化.再逐滴加入 30%H_2O_2后消煮,直至溶液由黑色变为无色清亮透明为止.将溶液转移到 50 mL 容量瓶中,用双蒸水定容.溶液稀释 10 倍,用日立 Z2000 原子吸收分光光度计测定 Mg^{2+}浓度[29].

1.3　数据处理

采用 Excel 2003 软件处理数据和作图,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$).

2　结果与分析

2.1　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗株高和叶面积的影响

由表 1 可知,处理 14 d 后,各处理植株的株高和叶面积均产生显著差异.与适温对照相比,亚适温条件下黄瓜幼苗的株高和叶面积增加值明显变小;通过增加营养液中 Mg^{2+}浓度,黄瓜幼苗的株高和叶面积增加值明显变大;硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗株高和叶面积增加值较正常硝酸盐浓度的黄瓜幼苗明显偏低,说明亚适温和硝酸盐胁迫抑制了黄瓜幼苗的生长.

2.2　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗干物质量的影响

由图 1 可知,处理 14 d 后,各处理的黄瓜幼苗干物质量差异显著.在 Mg^{2+}浓度相同的条件下,亚适温条件下黄瓜幼苗干物质量较适温对照黄瓜幼苗显著降低,说明亚适温影响黄瓜幼苗干物质积累.在亚适温条件下,增加营养液中 Mg^{2+}浓度,黄瓜幼苗的干物质量显著增大.亚适温条件下硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗干物质量较适温对照黄瓜幼苗降低更为显著,说明亚适温和硝酸盐胁迫严重抑制了黄瓜幼苗的生长,通过增加营养液中 Mg^{2+}浓度可适当缓解胁迫,黄瓜幼苗的干物质量明显升高.

2.3　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗电解质渗漏率的影响

由图 2 可以看出,亚适温处理 14 d 后,各处理的黄瓜幼苗电解质渗漏率差异显著.亚适温处理下

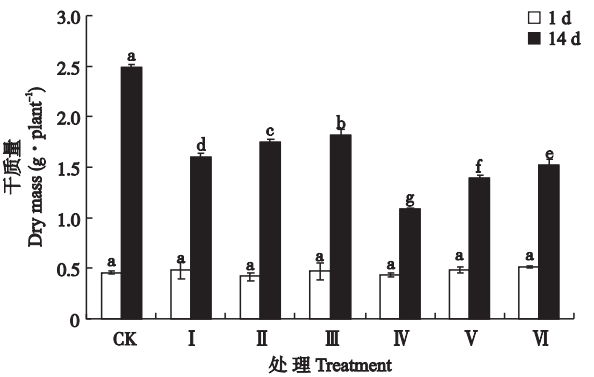

图 1　亚适温和硝酸盐胁迫条件下黄瓜幼苗干物质量的变化

Fig.1　Changes of dry mass in cucumber seedlings under suboptimal temperature and NO_3^- stress.

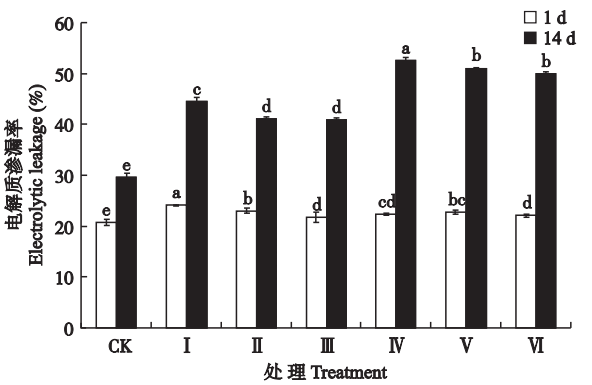

图 2　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗电解质渗透率的影响

Fig.2　Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on electrolyte leakage in cucumber seedlings.

表 2 亚适温和硝酸盐胁迫对不同镁处理黄瓜幼苗叶绿素含量的影响
Table 2 Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on pigment content in cucumber seedlings

处理 Treatment	叶绿素 a Chl a (mg·g^{-1}FM)	叶绿素 b Chl b (mg·g^{-1}FM)	类胡萝卜素 Car (mg·g^{-1}FM)	叶绿素(a+b) Chl (a+b) (mg·g^{-1}FM)	叶绿素 a/b Chl a/b
CK	1.88±0.01a	0.54±0.01a	0.35±0.00bc	2.42±0.02a	3.49±0.09b
Ⅰ	1.31±0.04f	0.38±0.01d	0.29±0.01f	1.68±0.03f	3.43±0.21b
Ⅱ	1.45±0.02e	0.42±0.01c	0.32±0.01de	1.87±0.03e	3.46±0.04b
Ⅲ	1.49±0.01d	0.43±0.01c	0.34±0.01cd	1.92±0.00d	3.50±0.01b
Ⅳ	1.50±0.02d	0.42±0.01c	0.32±0.01e	1.93±0.01d	3.55±0.08b
Ⅴ	1.63±0.03c	0.42±0.01c	0.37±0.02b	2.05±0.03c	3.92±0.09a
Ⅵ	1.79±0.02b	0.46±0.01b	0.39±0.01a	2.25±0.03b	3.86±0.06a

黄瓜幼苗电解质渗漏率较适温对照黄瓜幼苗显著升高.亚适温条件下,硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗电解质渗漏率较适温对照黄瓜幼苗升高更为显著,说明亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗造成双重逆境伤害.通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗的电解质渗漏率降低,胁迫得到一定程度地缓解.

2.4 亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

由表 2 可以看出,处理 14 d 后,各处理的黄瓜幼苗叶绿素含量差异显著,亚适温条件下黄瓜幼苗叶绿素含量较适温对照黄瓜幼苗明显偏低,说明长期亚适温处理导致黄瓜幼苗叶片中叶绿素含量下降.通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗叶片叶绿素含量明显升高.在亚适温条件下,硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗叶片叶绿素含量较适温对照黄瓜幼苗显著偏低,但较硝酸盐浓度正常的黄瓜幼苗显著偏高,可能是由于硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗的叶片变小、变厚,对叶绿素具有一定的浓缩效应.

2.5 亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗光合活性的影响

由表 3 可以看出,亚适温处理 14 d 后,黄瓜幼苗叶片净光合速率(P_n)、胞间CO_2浓度(C_i)、气孔导度(g_s)、蒸腾速率(T_r)较适温对照黄瓜幼苗明显偏低,说明长期的亚适温环境对黄瓜幼苗的生长和光合活性造成不利影响.亚适温条件下,缺镁处理的黄瓜幼苗叶片 P_n 较低,通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗叶片 P_n 显著升高.在亚适温条件下,硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗 P_n、C_i、g_s 和 T_r 较适温对照的黄瓜幼苗降低更为显著,C_i 降低和 g_s 下降,说明气孔限制是光合作用下降的主要因素,亚适温和硝酸盐双重胁迫导致黄瓜幼苗叶片气孔部分关闭,通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗叶片 P_n 值明显升高.

表 3 亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗光合活性的影响
Table 3 Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on photosynthetic characteristics of cucumber seedlings

处理 Treatment	光合速率 P_n (μmol·m^{-2}·s^{-1})	胞间 CO_2 浓度 C_i (μmol·mol^{-1})	气孔导度 g_s (mmol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率 T_r (mmol·m^{-2}·s^{-1})
CK	8.27±0.32a	448.67±4.04a	0.41±0.01a	4.70±0.06a
Ⅰ	4.30±0.10e	421.33±5.86bcd	0.23±0.01b	2.26±0.08d
Ⅱ	5.07±0.15c	432.33±1.53b	0.22±0.01b	2.75±0.08b
Ⅲ	5.70±0.10b	425.00±1.73bc	0.22±0.01b	2.61±0.06c
Ⅳ	3.80±0.17f	418.00±1.00cd	0.15±0.00c	1.36±0.08f
Ⅴ	4.50±0.10de	411.00±2.00d	0.16±0.00c	1.51±0.03e
Ⅵ	4.73±0.15de	421.33±2.50bcd	0.15±0.00c	1.58±0.02e

2.6 亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 的影响

由图 3 可以看出,亚适温处理 14 d 后,黄瓜幼苗叶片光系统Ⅱ最大光化学效率(F_v/F_m)和光系统Ⅱ的实际光化学效率($\Phi_{PSⅡ}$)较适温对照黄瓜幼苗明显下降,硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗叶片 F_v/F_m 和 $\Phi_{PSⅡ}$ 下降更为明显,说明亚适温和硝酸盐双重胁迫对黄瓜幼苗的生长产生的抑制作用更大,影响光系统Ⅱ电子传递效率,导致F_v/F_m和$\Phi_{PSⅡ}$降低.通过

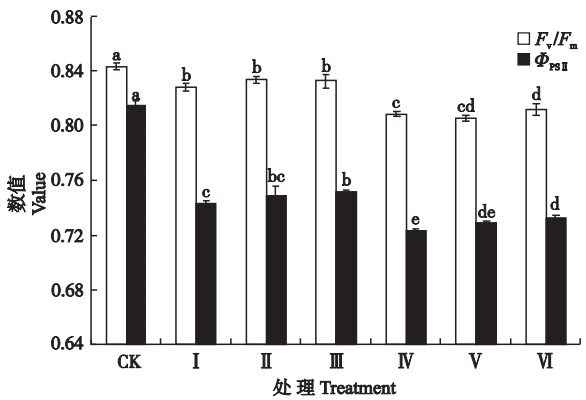

图 3 亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗 F_v/F_m 和 $\Phi_{PSⅡ}$ 的影响
Fig.3 Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on F_v/F_m and $\Phi_{PSⅡ}$ in cucumber seedlings.

增加营养液中 Mg^{2+} 浓度黄瓜幼苗叶片 $\Phi_{PS\,II}$ 显著增加.

2.7　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中镁含量的影响

由图 4 可以看出，在亚适温条件下，与适温对照相比，Mg^{2+} 浓度相同处理(Ⅱ)的黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg 含量明显降低，说明亚适温抑制黄瓜幼苗根系对 Mg 的吸收及往地上部输送，通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度(Ⅲ)，黄瓜幼苗根、茎中的 Mg 含量没有增加，而幼苗叶片中 Mg 含量显著增加，与对照适温相比没有显著差异.亚适温条件下，硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg 含量较适温对照黄瓜幼苗降低更为显著，增加营养液中 Mg^{2+} 浓度(Ⅵ)，黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg 含量虽比正常浓度处理(Ⅴ)有所增加，但与对照适温相比差异仍非常明显.说明亚适温和硝酸盐双重胁迫进一步抑制了黄瓜幼苗对 Mg 的吸收和运输.

2.8　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中钙、钾含量的影响

由图 5 可以看出，在亚适温条件下，黄瓜幼苗根、茎、叶中 Ca 和 K 含量较适温对照的黄瓜幼苗显著降低，说明亚适温影响黄瓜幼苗对 Ca 和 K 的吸收.亚适温条件下，硝酸盐胁迫的黄瓜幼苗根、茎、叶中 Ca 和 K 含量较适温对照的黄瓜幼苗显著升高，亚适温条件下硝酸盐胁迫促进了黄瓜幼苗对 Ca 和 K 的吸收及往地上部的运输，但营养液中 Mg^{2+} 浓度的变化对黄瓜幼苗根茎叶中 Ca 和 K 含量的影响不明显.在亚适温条件下，营养液中 Mg^{2+} 浓度增加黄瓜幼苗茎中 K 含量明显降低，而对根、叶中 K 含量以及根茎叶中 Ca 含量影响不明显.另外，黄瓜幼苗茎叶中 Ca^{2+} 远比根中的多，而黄瓜幼苗根茎中的 K^+ 远比叶中的多.

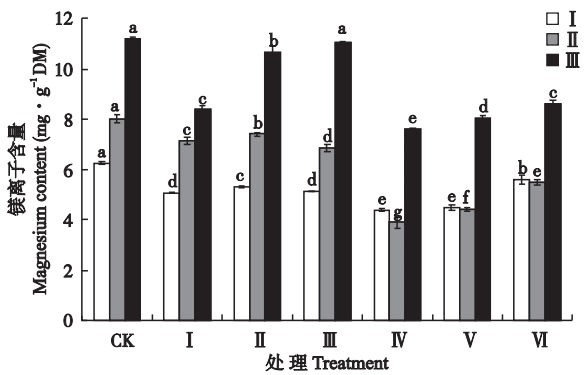

图 4　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中镁含量的影响

Fig.4　Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on magnesium content in root, stem and leaf of cucumber seedlings.

Ⅰ：根 Root；Ⅱ：茎 Stem；Ⅲ：叶 Leaf. 下同 The same below.

2.9　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 影响

由图 6 可以看出，在亚适温条件下，与适温对照

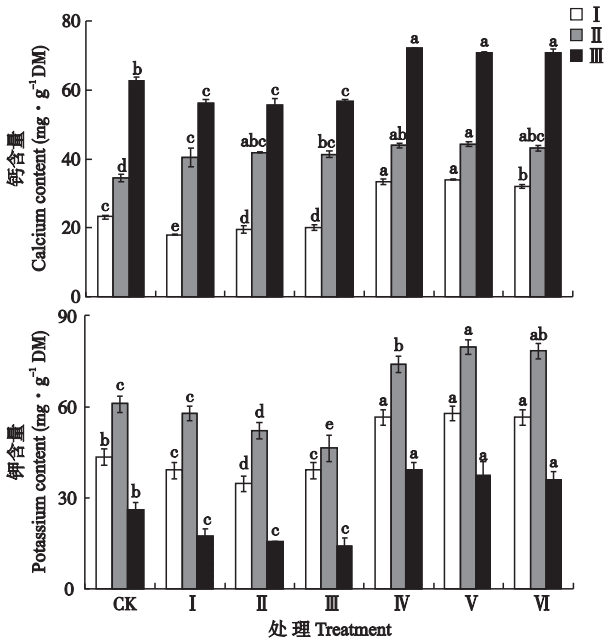

图 5　亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中钙、钾含量的影响

Fig.5　Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on calcium and potassium contents in root, stem and leaf of cucumber seedlings.

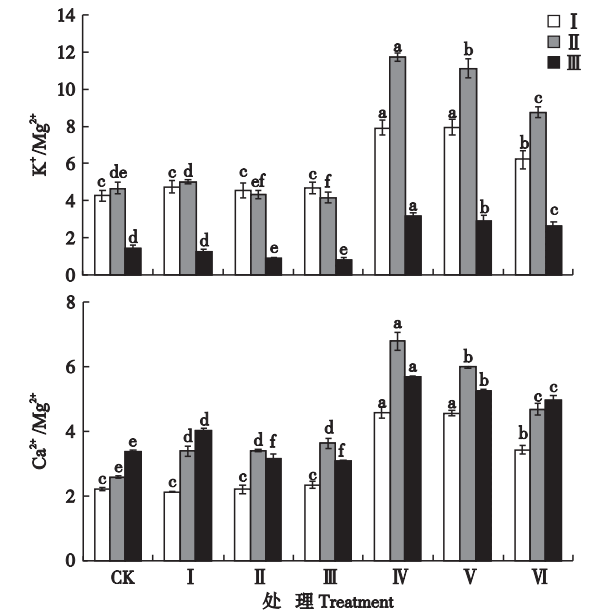

图 6　亚适温条件下硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗根、茎、叶中 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 影响

Fig.6　Effects of suboptimal temperature and NO_3^- stress on K^+/Mg^{2+} and Ca^{2+}/Mg^{2+} in root, stem and leaf of cucumber seedlings.

相比,正常硝酸盐浓度处理黄瓜幼苗根中 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 差异不显著,而茎、叶中 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 随营养液中 Mg^{2+} 浓度的增加有减小的趋势;硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗根、茎、叶中 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 显著增高,而随营养液中 Mg^{2+} 浓度的增加明显变小.说明营养液中 Mg^{2+} 浓度的增加对 K 和 Ca 的吸收产生明显的拮抗作用,硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗根和茎中 K^+/Mg^{2+} 明显大于 Ca^{2+}/Mg^{2+},说明 Mg^{2+} 对 K^+ 的抑制作用大于对 Ca^{2+} 的抑制作用.

3 讨 论

我国土壤缺镁的面积约占全国耕地总面积的6%,在一些设施栽培中,植株缺镁而出现失绿现象更加严重[30-33].研究表明,不同植物对镁的需求不同,因而对镁的吸收也不相同,影响植株对镁吸收的主要因素有:温度、介质中的 pH 值、供水、外源物质、根际镁浓度、根际溶液浓度(EC 值)、钾、钙的含量以及田间农艺措施[34].

胡文海等[35]研究表明,低温弱光条件下番茄株高受抑制,地上部干物质量下降.苏秀荣等[16]和杨凤娟[36]研究表明,NO_3^- 浓度较低时,短时间内有利于黄瓜植株的生长,叶面积增加,干物质积累增多;当 NO_3^- 高于一定浓度后就表现出胁迫作用,且对地上部的胁迫作用较大.本研究表明,亚适温胁迫条件下,黄瓜幼苗生长受到显著抑制,株高和叶面积降低、干物质量明显下降;亚适温条件下硝酸盐胁迫处理黄瓜幼苗干物质量较适温对照黄瓜幼苗降低更为显著,双重胁迫加重了对黄瓜幼苗生长的抑制作用.增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗株高和叶面积增加值比低浓度 Mg^{2+} 处理明显升高,干物质量显著增大.表明提高营养液中 Mg^{2+} 浓度可以部分缓解由于亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜生长所造成的抑制作用.

杨晓玉等[37]研究表明,硝酸盐胁迫下,黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg、Fe 和 Mn 含量均有不同程度的下降.裴孝伯等[38]研究表明,冬春茬黄瓜的镁吸收速率较秋冬茬黄瓜快,主要是秋冬茬黄瓜的生长环境是弱光、亚适温或低温.本研究表明,在根际 Mg^{2+} 浓度相同条件下,亚适温环境抑制了黄瓜幼苗对 Mg^{2+} 的吸收,使黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg^{2+} 含量降低,植株出现缺镁症状.这与谢小玉等[34]的研究结果一致.在亚适温和硝酸盐双重胁迫下,黄瓜幼苗根、茎、叶中 Mg 含量较适温对照的黄瓜幼苗降低更为显著,双重胁迫加重了黄瓜幼苗对 Mg 的吸收和运输的抑制作用.增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,在一定程度上可以使亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗造成的缺镁抑制症状得到部分缓解.

Mengel 等[39]研究表明,土壤中某些养分离子的生物有效性,除了受其有效含量影响外,还受与其他离子间的平衡关系影响,同电性离子间具有拮抗作用.有研究表明,过多的 K^+、Ca^{2+} 会抑制植物对 Mg^{2+} 的吸收[40-41],尤其是 K^+ 对 Mg^{2+}、Ca^{2+} 吸收具有较强的竞争作用.陈竹君等[42]研究表明,K^+ 对 Mg^{2+} 的拮抗作用大于 Ca^{2+} 对 Mg^{2+} 的拮抗作用,可能是离子拮抗引起番茄缺镁的主要原因.本研究中,与适温对照相比,亚适温影响了黄瓜幼苗对 Ca 和 K 的吸收;亚适温条件下,硝酸盐胁迫反而促进了黄瓜幼苗对 Ca 和 K 的吸收以及往地上部的运输,但营养液中 Mg^{2+} 浓度的增加对黄瓜幼苗根茎叶中 Ca 和 K 含量的影响不显著;由亚适温条件下硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗根茎中 K^+/Mg^{2+} 明显高于 Ca^{2+}/Mg^{2+} 可以看出,Mg^{2+} 对 K^+ 吸收的拮抗作用远远大于对 Ca^{2+} 的拮抗作用,反向说明与陈竹君等[42]研究结论相同,表明同电性离子间的拮抗作用反而小.增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 明显下降,也说明黄瓜幼苗的缺镁抑制症状得到部分缓解.

Hemans 等[43]研究表明,缺镁会导致黄瓜叶片的光合速率和光合关键酶活性下降.谢小玉等[34]研究表明,低温下缺镁胁迫显著抑制了黄瓜幼苗的生长,叶绿素含量低导致净光合速率下降.本研究表明,亚适温条件下,缺镁黄瓜幼苗生长受到显著抑制,净光合速率明显下降,通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度,黄瓜幼苗的缺镁症状得到缓解,P_n、T_r、$\Phi_{PS\,II}$ 显著提高.Farquhar 等[44]研究表明,在盐逆境胁迫下,引起植物叶片光合速率降低的植物自身因素主要有:由于气孔的部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制两类,C_i 降低和 g_s 下降,气孔因素起主要作用;C_i 升高和 g_s 下降则是非气孔因素起主要作用.史庆华等[45]研究表明,$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下,番茄幼苗叶片 g_s 下降、C_i 也下降,推断气孔限制是导致番茄幼苗光合下降的主要原因.本研究表明,亚适温条件下,硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗 P_n 显著下降,g_s 和 C_i 同时下降,说明气孔限制因素导致光合下降.王强等[46]研究表明,碳氮同化之间不仅存在物质竞争,还存在能量上的竞争.因此,高浓度 NO_3^- 胁迫下,植株体内的氮代谢旺盛,与光合碳同化竞争光反应所产生的同化力(ATP 和 NADPH),使 CO_2 同化速率降低,造成碳、氮代谢失

调，是导致光合速率降低的另一个原因.

亚适温条件下，硝酸盐胁迫处理的黄瓜幼苗生长受到明显抑制，植株体内的 Mg 含量和叶绿素含量降低，净光合速率下降，亚适温和硝酸盐胁迫对黄瓜幼苗产生明显抑制作用；通过增加营养液中 Mg^{2+} 浓度，黄瓜幼苗受亚适温和硝酸盐胁迫的抑制症状得到一定程度缓解.黄瓜幼苗根、茎、叶中的 K^+/Mg^{2+} 和 Ca^{2+}/Mg^{2+} 比值，说明营养液中 Mg^{2+} 浓度的增加对 K 和 Ca 的吸收产生明显的拮抗作用，而 Mg^{2+} 对 K^+ 的抑制作用大于对 Ca^{2+} 的抑制作用；营养液中较高浓度的 NO_3^- 影响黄瓜幼苗对镁的吸收，同时 NO_3^- 对 Mg^{2+} 的吸收也有拮抗作用.

参考文献

[1] Wang Y-J (王永健), Zhang H-Y (张海英), Zhang F (张　峰). Effects of low temperature and low light intensity stress on photosynthesis in seedlings of different cucumber varieties. *Acta Horticulturae Sinaca* (园艺学报), 2001, **28**(3): 230-234 (in Chinese)

[2] Hu W-H (胡文海), Yu J-Q (喻景权). Effects of chilling under low light on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristic in tomato leaves. *Acta Horticulturae Sinaca* (园艺学报), 2001, **28**(1): 41-46 (in Chinese)

[3] Gao L-H (高丽红), Chen Q-J (陈青君), Zhang F-M (张福墁). Study on the adaptability of different types of cucumber varieties under protected culture. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2002(3): 20-23 (in Chinese)

[4] Gao L-H (高丽红), Zhang F-M (张福墁), Chen Q-J (陈青君). Study on growth and development of different type cucumber varieties and its relationship with environment factor. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2000, **5**(3): 58-62 (in Chinese)

[5] Chen Q-J (陈青君), Zhang F-M (张福墁), Wang Y-J (王永健), *et al*. Studies of physiologic characteristics of reaction of cucumber to low temperature and poor light. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(1): 77-81 (in Chinese)

[6] Grattan SR, Grieve CM. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, **38**: 275-300

[7] Feng G (冯　固), Bai D-S (白灯莎), Yang M-Q (杨茂秋), *et al*. Effect of salinity on VA mycorrhiza formation and of inoculation with VAM fungi on salinetolerance of plant. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(1): 79-82 (in Chinese)

[8] Liu R-J (刘润进), Liu P-Q (刘鹏起), Xu K (徐坤), *et al*. Ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in saline-alkaline soils of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(6): 721-724 (in Chinese)

[9] Ning Y-W (宁运旺), Zhang Y-C (张永春). The occurrence of secondary saline of protected cultivation soil and its prevention and cure. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2001(4): 49-52 (in Chinese)

[10] Tong Y-W (童有为), Chen D-F (陈淡飞). Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouses. *Acta Horticulturae Sinaca* (园艺学报), 1991, **18**(2): 159-162 (in Chinese)

[11] Xue J-C (薛继澄), Bi D-Y (毕德义), Li J-J (李家金), *et al*. Soil factors and countermeasures of protected cultivation of vegetables physiological disorders. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), 1994(1): 4-9 (in Chinese)

[12] Rubeiz IG, Oebker NF, Stroehlein JL. Subsurface drip irrigation and urea phosphate fertigation for vegetables on calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 1989, **12**: 1457-1465

[13] Sahrawat KL. Control of urea hydrolysis and nitrification in soil by chemicals: Prospects and problems. *Plant and Soil*, 1980, **57**: 335-352

[14] Wu X-X (吴雪霞), Zhu W-M (朱为民), Zhu Y-L (朱月林). Effects of exogenous nitric oxide on photosynthetic characteristics of tomato seedlings under NaCl stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(6): 1105 (in Chinese)

[15] Fan H-F (樊怀福), Guo S-R (郭世荣), Zhang R-H (张润花), *et al*. The effects of exogenous nitric oxide on growth, active oxygen metabolism and photosynthetic characteristics in cucumber seedlings under NaCl stress. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(2): 546-553 (in Chinese)

[16] Su X-R (苏秀荣), Wang X-F (王秀峰), Yang F-J (杨凤娟). Effects of different NO_3^- concentration on photosynthetic characteristics in cucumber seedling. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(6): 1110-1117 (in Chinese)

[17] Beale SI. Enzymes of chlorophyll biosynthesis. *Photosynthesis Research*, 1999, **60**: 43-73

[18] Hao N-B (郝廼斌), Li T-Z (李桐柱), Zhang Q-D (张其德), *et al*. Structure and function of the chloroplast membrane. Ⅷ. Effect of magnesium ions on chlorophyll-protein complex aggregation of Libation chloroplast thylakoid. *Biochemistry and Biophysics* (生物化学与生物物理学报), 1981, **13**(4): 365-372 (in Chinese)

[19] Wu W, Peters J, Berkowltz GA. Surface charge mediated effects of Mg On K flux across the chloroplast envelope are associated with regulation of stromal pH and photosynthesis. *Plant Physiology*, 1991, **97**: 580-587

[20] Piazza GJ, Gibbs M. Influence of adenosine phosphates and magnesium on photosynthesis in chloroplasts from peas, sedum, and spinach. *Plant Physiology*, 1983, **71**: 680-687

[21] Rao L-H (饶立华). Plant Mineral Nutrition and Diagnostics. Beijing: China Agriculture Press, 1993: 78-82 (in Chinese)

[22] Li Y (李　岩), Liu X-H (刘星辉), Zhuang W-M (庄卫民). Advances in magnesium nutritional physiology in plants. *Journal of Fujian Agriculture University* (福建农业大学学报), 2000, **29**(1): 74-80 (in Chinese)

[23] Horlitz M, Klaff P. Gene specific trans regulatory functions of magnesium for chloroplast mRNA stability in higher plants. *Journal of Biological Chemistry*, 2000,

275: 35638-35645
[24] Ohno T, Grunes L. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, **45**: 685-690
[25] Pei X-B (裴孝伯), Zhang F-M (张福墁), Wang L (王 柳). Effect of light and temperature on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of solar greenhouse cucumber. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35**(12): 1510-1513 (in Chinese)
[26] Robbins NS, Pharr DM. Leaf area predication model for cucumber from linear measurements. *Horticulture Science*, 1987, **22**: 1264-1266
[27] Li H-S (李合生), Sun Q (孙 群), Zhao S-J (赵世杰). Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000: 138-142 (in Chinese)
[28] Demming-Adams B, Adams WW Ⅲ. Xanthophyll cycle and light stress in nature: Uniform response to excess direct sunlight among higher plant species. *Planta*, 1996, **198**: 460-470
[29] Zhang Q-K (张起凯), Yao D-M (姚冬梅), Liu L-X (刘立行), *et al*. Determination of calcium and zinc in cucumber by flame atomic absorption spectrometry. *Analytical Instruments* (分析仪器), 2006(2): 31-32 (in Chinese)
[30] Wu J-J (吴俊江). Attention to nutritional balance of magnesium sparse crops. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 2004, **19**(3): 74-76 (in Chinese)
[31] Wang S-J (王世济), Ji X-J (季学军), Zu C-L (祖朝龙). Preliminary investigations of Wannan magnesium deficiency in tobacco. *Journal of Anhui Agriculture Sciences* (安徽农业科学), 2007, **35**(27): 8508 (in Chinese)
[32] Wang Y-J (王银均), Feng Y-F (冯咏芳). Occurrence and control of vegetable magnesium deficiency disease. *Shanghai Vegetables* (上海蔬菜), 2007(5): 108-109 (in Chinese)
[33] Zhang X-S (张西森). Hazards and prevention of greenhouse tomato magnesium. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2007(12): 75 (in Chinese)
[34] Xie X-Y (谢小玉), Zou Z-R (邹志荣), Deng X-Y (邓小勇), *et al*. Effects of magnesium stress and temperature on the cowhand photosynthetic character of cucumber seedlings. *Journal of Chongqing University* (Natural Science) (重庆大学学报: 自然科学版), 2009, **32**(2): 227-232 (in Chinese)
[35] Hu W-H (胡文海), Yu J-Q (喻景权). Effects of low temperature and low light on the growth, development and physiological functions of tomato plants. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(3): 61-63 (in Chinese)
[36] Yang F-J (杨凤娟). Study on Injury Mechanism Induced by NO_3^- Stress to Growth and Development of Cucumber (*Cucumis sativus* L.). PhD Thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2006 (in Chinese)
[37] Yang X-Y (杨晓玉), Hu C-C (胡淳淳), Wang X-F (王秀峰), *et al*. Effects of nitrate stress on growth and mineral element content of cucumber seedlings. *Shandong Agricultural Sciences* (山东农业科学), 2008, **9**(8): 61-65 (in Chinese)
[38] Pei X-B (裴孝伯), Zhang F-M (张福墁), Gao L-H (高丽红). Study on uptake and distribution of Ca and Mg of solar greenhouse cucumber in different season. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2001, **17**(6): 7-11 (in Chinese)
[39] Mengel K, Kirkby EA. Principles of Plant Nutrition. Berlin: Springer, 2001: 541-552
[40] Ding Y, Luo W, Xu G. Characterization of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, 2006, **149**: 111-123
[41] Bernstein N, Ioffe M, Luria G, *et al*. Effects of K and N nutrition on function and production of *Ranunculus asiaticus*. *Pedosphere*, 2011, **21**: 288-301
[42] Chen Z-J (陈竹君), Zhao W-Y (赵文艳), Zhang X-M (张晓敏), *et al*. Relationship of magnesium deficiency of tomato with salt composition and ion activities in greenhouse soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **50**(2): 388-395 (in Chinese)
[43] Hermans C, Verbruggen N. Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, 2005, **56**: 2153-2161
[44] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**: 317-345
[45] Shi Q-H (史庆华), Zhu Z-J (朱祝军), Qian Q-Q (钱琼秋), *et al*. Effects of iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ and NaCl treatment on photosynthesis in leaves of tomato. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(2): 188-191 (in Chinese)
[46] Wang Q (王 强), Zhong X-H (钟旭华), Huang N-R (黄农荣), *et al*. Interactions of nitrogen with light in the photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen of crop. *Guangdong Agriculture Sciences* (广东农业科学), 2006(2): 37-40 (in Chinese)

作者简介 杨全勇,男,1988 年生,硕士研究生. 主要从事设施蔬菜与无土栽培研究. E-mail: yangqy07z3@163.com

责任编辑 张凤丽