

外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗生长和离子平衡的影响

熊英杰¹, 赵立群², 钟韬韬¹, 安长廷¹, 梁荣¹, 孙宝腾^{1,*}

¹南昌大学生命科学与食品工程学院, 南昌 330031; ²河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050016

摘要: 研究了在缺镁胁迫下, 外源 NO 对缺镁玉米幼苗生长、根系活力和离子含量的影响。结果表明, 缺镁胁迫使玉米幼苗株高、根长和干鲜重下降, 根系活力降低, N 元素在地上部和根部分配失调, 新叶和老叶中 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等离子含量下降, Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 等离子含量上升。根中 Mg^{2+} 离子含量下降, Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等离子含量上升。用 $100 \mu mol \cdot L^{-1}$ 一氧化氮供体硝普钠(SNP)处理后, 玉米幼苗株高、根长、干重和鲜重均提高, 根系活力增强, 改善了 N 代谢, 新叶中 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Zn^{2+} 等离子含量下降, Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 等离子含量提高, 老叶中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Zn^{2+} 等离子含量下降, Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 等离子含量提高, 根中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 离子含量均下降。实验结果表明, NO 保护玉米幼苗免受缺镁胁迫的影响。

关键词: 玉米; 缺镁胁迫; 一氧化氮; 离子平衡

Effects of Exogenous Nitric Oxide on the Growth and Ion Homeostasis of Maize (*Zea mays* L.) Seedlings under Magnesium Deficient Stress

XIONG Ying-Jie¹, ZHAO Li-Qun², ZHONG Tao-Tao¹, AN Chang-Ting¹, LIANG Rong¹, SUN Bao-Teng^{1,*}

¹College of Life Sciences and Food Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; ²School of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

Abstract: Effects of exogenous nitric oxide (NO) on the growth, root activity and some inorganic ions changes of maize seedlings under magnesium deficient stress were investigated. The results showed that the shoot and root length, fresh and dry weight of maize seedlings were reduced under magnesium deficient stress. The root activity was reduced under magnesium deficiency, either. The distribution of nitrogen in shoot and root was interfered under magnesium deficiency stress. The contents of inorganic ions such as Mg^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} and Mn^{2+} in younger and older leaves of maize subjected to magnesium deficiency were decreased while those of Ca^{2+} , K^+ and Zn^{2+} increased. Magnesium content in root of maize seedlings was decreased under Mg deficient condition, but the contents of Ca^{2+} , K^+ , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} and Mn^{2+} were increased. In comparison with magnesium deficient stress, the shoot length, root length, fresh weight and dry weight of maize seedlings treated with $100 \mu mol \cdot L^{-1}$ sodium nitroprusside (SNP), an nitric oxide donor, was increased. The root activity was increased due to SNP treatment, either. The distribution and partition of N was rationalized in shoot and root. The contents of Mg^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} and Mn^{2+} in younger leaves and those of Cu^{2+} , Fe^{3+} and Mn^{2+} in older leaves were increased due to SNP treatment. Whereas the contents of Ca^{2+} , K^+ and Zn^{2+} in younger leaves and Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ and Zn^{2+} in older leaves were decreased under SNP treatment condition. Contents of all of the ions were decreased in roots of magnesium deficient maize seedlings due to SNP treatment. The results obtained showed that NO protected maize seedlings from magnesium deficiency stress.

Key words: maize; magnesium deficiency stress; nitric oxide; ion homeostasis

镁是维持植物正常生长发育所必需的营养元素, 在植物体的光合作用、酶活化、离子平衡、细胞膨压作用、细胞膜稳定以及活性氧代谢等多方面均有重要影响(汪洪和褚天铎 1999)。植物在缺镁条件下叶绿素含量降低, 光合作用受阻, 严重影响植物生长发育。缺镁还会增强植物细胞膜脂过氧化, 加速植物衰老, 并影响植物体内某些离子

含量(Tewari 等 2006)。我国土壤缺镁趋势越来越严重, 尤其是设施栽培土壤中缺镁更加严重, 从而导致作物生长发育受到抑制, 产量和品质下降, 因

收稿 2010-04-15 修定 2010-05-13

资助 江西省教育厅项目(赣教技字[2007] 39 号)和教育部博士点新教师基金(20091303120005)。

* 通讯作者(E-mail: sbt72@163.com; Tel: 0791-8331501)。

此,植物缺镁逐渐成为农业生产发展的制约因素(汪洪和褚天铎 1999)。

NO 是一种具有水溶性和脂溶性的气体小分子,作为信号分子参与调控植物生长发育和防御反应。NO 参与植物生长、发育、衰老、细胞程序性死亡、乙烯释放、抗病和对环境胁迫响应等许多生理过程(肖强和郑海雷2004),对盐胁迫(Zhao 等 2004)、 Cd^{2+} 胁迫(陈世军等 2009)、高温胁迫(Song 等 2006)、缺铁胁迫(Sun 等 2007)等许多逆境都有缓解作用,但 NO 对缺镁胁迫是否有影响尚无报道。

本实验以溶液培养的玉米幼苗为材料,研究外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗生长和离子含量的影响,从离子平衡的角度探讨NO缓解缺镁胁迫的作用机制,并为缺镁矫治提供理论基础。

材料与amp;方法

1 材料培养

实验材料为目前主栽玉米品种‘郑单958’ (*Zea mays* L. ‘Zhengdan-958’),种子经 1.8% 的次氯酸钠消毒 30 min,浸种 1 d 后萌发,幼芽长到 2 cm 左右时于培养液中培养。培养液组成见 Sun 等(2007)。培养液中镁离子含量设定为 3 个梯度:缺镁($0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、低镁($1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)和对照($4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),分别记为 0、1、4,以 K_2SO_4 补足低镁和缺镁溶液中的 SO_4^{2-} 。NO 处理为每次换溶液时加入 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NO 供体硝普钠(sodium nitroprusside, SNP),相应处理记为 0+S、1+S 和 4+S。材料在培养室培养,以普通日光灯为光源,光照强度为 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光照时间为 14 h/10 h (光/暗),温度为 $28 \text{ }^\circ\text{C}/25 \text{ }^\circ\text{C}$ (昼/夜),每天早晚通气各 1 h,每 7 d 更换一次营养液。幼苗生长 21 d 后达到五叶一心时收获,进行相关指标测定。实验各处理均为 3 次重复。

2 生长量测定

材料收获后,从胚乳着生部位分为地上部和根系,直接测定株高、根长和鲜重。干重测定需将鲜样品置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中杀青 10 min,再于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重后测定。

3 根系活力测定

材料收获后,取根系用蒸馏水冲洗干净,吸净表面水分后,采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法(李德

华等2004)测定,以单位时间内三苯基甲臍(TTF)的生成量表示根系活力。

4 元素含量测定

材料按老叶、新叶和根收获,进行相关测定。老叶指从基部开始的第 1、2 片叶,新叶指第 3、4 片成熟叶。

N 元素测定参照鲁如坤(1998)的方法,稍加改动。5 g 鲜重材料于烘箱中烘干,用浓硫酸消化 3 h,消化液用高纯水定容至 50 mL,取 5 mL 样液于消煮管中加 1 mL 蒸馏水放入凯式定氮仪中定氮,用 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 滴定,以消耗 HCl 量计算含氮量。

金属离子用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES) (Optima 2100DV, 美国 Perkin-Elmer 公司)测定,参照席晓岚等(2009)的方法稍加改动。5 g 新鲜材料于干燥箱中烘干后,于马弗炉中 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 灰化约 2 h,至材料呈灰白色,用硝酸:高氯酸(4:1)联合消煮,消煮液用高纯水定容,用 ICP-AES 测定金属离子含量。

5 药品及数据统计

金属离子测定用硝酸和高氯酸为国产优级纯,硝普钠(SNP)、氯化三苯基四氮唑(TTC)等其他实验试剂均为国产分析纯。数据统计采用 SPSS 17.0 统计软件(SPSS, Chicago, USA)进行显著性差异分析(ANOVA)。

实验结果

1 外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗生长的影响

实验结果显示,与对照相比,低镁条件下,玉米幼苗株高和根长分别降低 16.97% 和 10.02%,鲜重和干重分别下降 21.3% 和 23.3%;缺镁条件下,株高和根长分别降低 19.16% 和 14.24%,鲜重和干重分别下降 30.3% 和 30.4%。结果表明,缺镁胁迫抑制玉米幼苗的生长(表 1、图 1)。

加入 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SNP 后,玉米幼苗生长量明显提高。与未加 SNP 的植株相比,低镁条件下,玉米幼苗株高和根长增加,分别增加 12.3% 和 11.75%,鲜重和干重分别增加 13.76% 和 12.98%;缺镁条件下,株高和根长分别增加 12.68% 和 13.17%,鲜重和干重分别增加 14.88% 和 19.11% (表 1、图 1)。由结果可见,NO 能够缓解缺镁胁迫导致的玉米幼苗生长抑制。

表1 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗鲜重和干重的影响

Table 1 Effects of exogenous nitric oxide on the fresh weight and dry weight of maize seedlings under Mg deficient stress

镁浓度 /mmol·L ⁻¹	鲜重/g		干重/g	
	茎叶	根	茎叶	根
0	3.44±0.317 ^e	0.984±0.036 ^d	0.168±0.0122 ^d	0.048±0.004 ^e
0+S	4.11±0.357 ^d	1.045±0.037 ^d	0.204±0.006 ^c	0.055±0.002 ^d
1	3.96±0.297 ^e	1.048±0.096 ^d	0.183±0.007 ^{cd}	0.054±0.003 ^d
1+S	4.47±0.709 ^c	1.117±0.47 ^c	0.216±0.009 ^c	0.060±0.006 ^c
4	5.09±0.212 ^b	1.273±0.094 ^b	0.241±0.024 ^b	0.068±0.004 ^{bc}
4+S	5.76±0.752 ^a	1.295±0.397 ^a	0.263±0.01 ^a	0.075±0.005 ^a

+S表示在溶液中加入100 μmol·L⁻¹ SNP。同列数据旁不同小写字母表示在0.05水平上显著差异。下同。

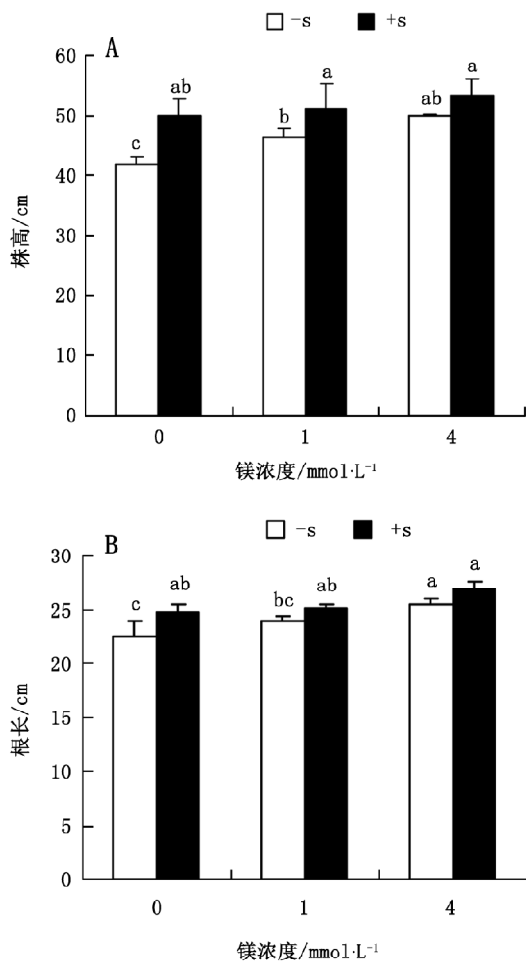


图1 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗株高(A)和根长(B)的影响

Fig.1 Effects of exogenous nitric oxide on the shoot length (A) and root length (B) of maize seedlings under Mg deficient stress

2 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗根系活力的影响

实验结果(图2)表明,玉米幼苗在遭受低镁和缺镁胁迫时,根系活力分别较对照降低27.04%和41.23%。加入100 μmol·L⁻¹ SNP后,低镁和缺镁胁迫下,根系活力分别较未加SNP的植株增加17.94%和32.22%(图2),表明NO能够显著提高缺镁胁迫下玉米幼苗根系活力。

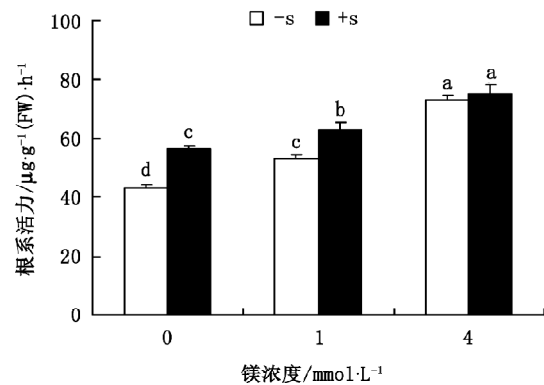


图2 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗根系活力的影响
Fig.2 Effects of exogenous nitric oxide on the root activity of maize seedlings under Mg deficient stress

3 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗体内N元素含量的影响

实验结果(表2)表明,新叶中N元素含量在低镁和缺镁条件下较对照分别下降20.83%和32.14%;老叶分别下降12.59%和24.46%;根分别增加42.58%和56.05%。

加入100 μmol·L⁻¹ SNP后,在低镁和缺镁条件

下新叶中 N 元素含量较未加 SNP 的植株分别提高 23.81% 和 31.94%; 老叶分别提高 11.11% 和 12.59%; 根分别下降 29.86% 和 28.74%。

表 2 外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗体内 N 元素含量的变化

Table 2 Effects of exogenous nitric oxide on the nitrogen content in maize seedlings under Mg deficient stress

镁浓度 /mmol·L ⁻¹	N 元素含量 /mg·g ⁻¹ (FW)		
	新叶	老叶	根
0	720±52 ^e	420±21 ^d	325±15 ^a
0+S	950±63 ^c	485±7 ^c	231±12 ^c
1	840±43 ^d	486±27 ^c	297±17 ^b
1+S	1 040±77 ^b	540±14 ^b	215±2 ^d
4	1 061±90 ^b	556±25 ^b	208±6 ^d
4+S	1 190±23 ^a	603±14 ^a	179±6 ^c

4 外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗体内离子含量的影响

4.1 外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗新叶中离子含量的影响 与对照相比(表 3), 低镁条件下, 新叶中 Ca²⁺、K⁺ 和 Zn²⁺ 含量分别升高 4.29%、26.53% 和 25.20%; 缺镁条件下, 分别上升 5.39%、54.08% 和 52.80%。低镁条件下, Mg²⁺、Cu²⁺、Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 含量分别较对照下降 41.30%、29.82%、43.96% 和 29.95%; 缺镁条件下, 分别下降 66.55%、35.67%、52.57%、34.67%。由此可见, 缺镁培养严重影响玉米幼苗新叶离子平衡。

加入 100 μmol·L⁻¹ SNP 后, 与未加 SNP 的植株相比, 低镁条件下, Mg²⁺、Cu²⁺、Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 含

量分别升高 35.46%、23.33%、55.28%、19.57%; 缺镁条件下, 分别升高 45.76%、27.27%、66.40%、23.54%。低镁条件下, Ca²⁺、K⁺ 和 Zn²⁺ 含量分别较未加 SNP 处理下降 3.93%、4.35% 和 20.16%; 缺镁条件下, 分别降低 23.84%、16.93% 和 21.47%。

4.2 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗老叶中离子含量的影响 由实验结果(表 4)可知, 与对照相比, 低镁条件下, 老叶中 Mg²⁺、Cu²⁺、Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 含量分别减少 31.96%、26.32%、18.96% 和 17.00%; 缺镁条件下, 分别减少 50.73%、34.98%、25.82% 和 27.67%; 而低镁条件下, Ca²⁺、K⁺ 和 Zn²⁺ 含量分别较对照增加 16.07%、28.57% 和 24.89%; 缺镁条件下, 分别增加 36.60%、25.87% 和 40.70%。

加入 100 μmol·L⁻¹ SNP 后, 与未加 SNP 的植株相比, 低镁条件下, Cu²⁺、Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 含量分别增加 18.91%、15.25% 和 10.95%; 缺镁条件下, 增加 19.05%、18.75% 和 17.49%。低镁条件下, Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺ 和 Zn²⁺ 含量分别较未加 SNP 处理降低 15.30%、5.38%、14.28% 和 14.09%; 缺镁条件下, 分别减少 25.00%、6.25%、16.48% 和 15.08%。

4.3 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗根中离子含量的影响 实验结果(表 5)显示, 与对照相比, 低镁条件下, 根中 Ca²⁺、K⁺、Cu²⁺、Zn²⁺、Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 含量分别增加 44.06%、54.41%、20.61%、18.57%、27.18% 和 14.78%; 缺镁条件下, 分别增加 52.66%、78.03%、27.27%、30.71%、39.81% 和 24.35%。而低镁条件下, 根中 Mg²⁺ 含量减少 33.29%, 缺镁条件下, 减少 50.85%。

加入 100 μmol·L⁻¹ SNP 后, 与未加 SNP 的植株相比, 低镁条件下, Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Cu²⁺、Zn²⁺、

表 3 外源 NO 对缺镁胁迫下玉米幼苗新叶中离子含量的影响

Table 3 Effects of exogenous nitric oxide on the ion content in younger leaves of maize seedlings under Mg deficient stress

镁浓度 /mmol·L ⁻¹	新叶中离子含量 /mg·g ⁻¹ (FW)						
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺
0	118.00±10.60 ^f	774.67±30.52 ^a	1 510.00±45.30 ^a	3.82±0.23 ^a	2.20±0.21 ^e	9.23±0.13 ^f	12.87±0.78 ^e
0+S	172.00±6.28 ^c	741.00±10.55 ^{bc}	1 150.00±72.10 ^{bc}	3.00±0.55 ^b	2.80±0.17 ^c	15.35±0.33 ^d	15.90±1.20 ^{cd}
1	207.00±7.13 ^d	766.50±57.50 ^a	1 240.00±36.80 ^b	3.13±0.16 ^b	2.40±0.18 ^d	10.90±0.89 ^e	13.80±0.83 ^d
1+S	280.45±11.44 ^c	736.40±22.66 ^c	990.00±84.90 ^c	2.60±0.11 ^c	2.96±0.28 ^{bc}	16.93±1.50 ^e	16.50±1.50 ^c
4	325.75±23.00 ^b	735.00±47.20 ^c	980.00±27.64 ^c	2.50±0.2 ^{cd}	3.42±0.14 ^b	19.45±1.73 ^b	19.70±1.50 ^b
4+S	370.00±13.30 ^a	724.00±30.00 ^c	880.00±9.90 ^d	2.28±0.20 ^d	3.60±0.21 ^a	21.50±1.40 ^a	21.10±1.05 ^a

表4 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗老叶中离子含量的影响

Table 4 Effects of exogenous nitric oxide on the ion content in older leaves of maize seedlings under Mg deficient stress

镁浓度 /mmol·L ⁻¹	老叶中离子含量 /mg·g ⁻¹ (FW)						
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺
0	252.00±5.70 ^e	1 440.00±41.00 ^a	8 740.00±12.73 ^a	4.60±0.11 ^a	2.10±0.18 ^e	10.80±0.28 ^e	18.30±0.70 ^e
0+S	189.00±8.50 ^f	1 350.00±35.40 ^{ab}	7 300.00±141.40 ^c	3.80±0.06 ^c	2.50±0.13 ^d	12.83±0.25 ^d	21.50±0.92 ^d
1	348.00±8.50 ^c	1 300.00±35.60 ^b	7 991.00±15.50 ^b	4.25±0.27 ^b	2.38±0.09 ^{de}	11.80±0.44 ^{de}	21.00±0.83 ^d
1+S	294.80±6.70 ^d	1 230.00±28.30 ^{bc}	6 850.00±14.10 ^d	3.64±0.06 ^d	2.83±0.07 ^c	13.6±0.14 ^c	23.30±0.85 ^c
4	511.50±16.30 ^a	1 120.00±56.60 ^{cd}	6 398.00±68.50 ^e	3.57±0.13 ^{de}	3.23±0.08 ^b	14.56±0.37 ^b	25.30±0.28 ^b
4+S	480.00±12.70 ^b	1 090.00±16.90 ^d	6 000.00±70.70 ^f	3.20±0.14 ^e	3.52±0.21 ^a	15.20±0.57 ^a	27.00±0.57 ^a

表5 外源NO对缺镁胁迫下玉米幼苗根中离子含量的影响

Table 5 Effects of exogenous nitric oxide on the ion content in roots of maize seedlings under Mg deficient stress

镁浓度 /mmol·L ⁻¹	根中离子含量 /mg·g ⁻¹ (FW)						
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺
0	116.00±10.50 ^e	42.60±0.26 ^a	8 670.00±56.60 ^a	3.66±0.21 ^a	21.00±0.34 ^a	14.40±0.48 ^a	14.30±0.79 ^a
0+S	100.00±6.80 ^f	35.80±1.98 ^c	6 460.00±69.90 ^c	3.03±0.08 ^c	17.50±0.85 ^c	12.20±0.50 ^e	12.20±0.64 ^{bc}
1	157.40±9.80 ^c	40.20±1.30 ^b	7 520.00±32.50 ^b	3.32±0.07 ^b	19.90±0.57 ^b	13.10±0.16 ^b	13.20±0.55 ^b
1+S	140.00±10.60 ^d	34.40±1.84 ^d	5 930.00±77.80 ^d	2.88±0.14 ^d	17.00±0.52 ^c	11.30±0.13 ^d	11.60±0.42 ^e
4	236.00±10.60 ^b	28.00±0.08 ^{de}	4 870.00±212.10 ^e	2.80±0.03 ^d	16.50±0.95 ^d	10.30±0.56 ^{de}	11.50±0.57 ^e
4+S	223.00±13.40 ^a	25.60±0.28 ^e	4 600.00±155.60 ^f	2.54±0.11 ^e	15.20±0.20 ^e	9.60±0.42 ^e	10.50±0.14 ^d

Fe³⁺和Mn²⁺含量分别下降11.07%、14.43%、21.14%、14.57%、13.25%、13.74%、12.12%;缺镁条件下,分别下降13.79%、15.96%、25.49%、16.67%、17.21%、15.28%、14.69%。

讨 论

镁是植物体内的重要营养元素,参与植物体内的许多生理过程(汪洪和褚天铎1999)。因此缺镁必然影响植物的生理功能,导致植物生长受抑制(Hermans和Verbruggen2005)。本实验结果表明,缺镁胁迫使玉米幼苗鲜重和干重下降,株高和根长减少,这与前人研究结果一致(李延和刘星辉2002; Hermans和Verbruggen2005)。硝普钠(SNP)是一氧化氮(NO)供体,能够在溶液中缓慢释放0.1%~1% NO(Graziano等2002)。培养液中加入100 μmol·L⁻¹ SNP后,低镁和缺镁条件下玉米幼苗株高、根长、鲜重和干重均增加(表1、图1),表明NO能够缓解缺镁引起的生长抑制,促进幼苗生长。

N元素是植物的生命元素,参与几乎所有植物

生命活动,结果显示,缺镁胁迫增加了根中N元素积累,而在新叶和老叶中,N元素含量均降低(表2),这可能是因为镁可提高硝酸还原酶活性,促进NO₃⁻同化(Riens和Heldt1992),缺镁则抑制硝酸还原酶活性(李延等2001),导致根部吸收的NO₃⁻不能顺利同化为有机氮化物,而植物体内N元素的运输主要是氨基酸等有机氮形式,因此导致根中积累N元素,叶中N元素含量下降。氮元素为可移动元素,缺镁胁迫下,新叶中的氮元素含量降低幅度(32.14%)反而较老叶降低幅度(24.46%)大,推测可能是由于镁在植物体内N元素的转运中发挥作用,缺镁降低了N由老叶向新叶的转运,但相关机理尚需深入研究。缺镁影响N元素代谢,可能是导致玉米幼苗生长受抑制的原因之一。加入SNP后,玉米幼苗根部N元素含量降低,而新叶和老叶中N元素含量均升高,表明NO改善了N元素代谢,可能是NO促进硝酸还原酶(NR)活性(Du等2008;樊怀福等2006;陈坤等2009),使根部NO₃⁻转化为有机氮,从而加速N元素向地上部运输。

植物体内各种离子在一定条件下保持在一定水平的平衡状态反映了植物细胞内环境的稳定程度,是细胞内部各种生理生化过程正常进行的前提条件之一。但是重金属、盐碱、过量铁等许多逆境条件下,这种离子间的平衡状态会被打破,从而影响植物正常代谢活动(刘爱荣等 2009; 杨春武等 2008; 蔡妙珍等 2003)。低镁和缺镁条件下,玉米幼苗新叶、老叶和根部 Mg^{2+} 含量均下降(表 3~5)。培养液中没有 Mg^{2+} 时,玉米幼苗中的 Mg^{2+} 主要来自颖果中储存的镁。低镁和缺镁条件下,新叶、老叶和根部的 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 等离子含量均较对照升高,可能是这三种离子能够代替镁的部分功能(Schwartz 和 Bar-Yosef 1983),缺镁促进了植物吸收 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 等离子并促进其向地上部运输,从而维持植物的正常生长。而缺镁胁迫降低玉米幼苗新叶和老叶中 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等几种离子的含量(表 3、4),却增加了根中这几种离子的含量(表 5)。我们推测, Mg^{2+} 可能通过某种机制在这几种离子向地上部运输中发挥作用。由以上结果可见,缺镁胁迫影响了植物体内离子平衡,导致离子在地上部和地下部的分配发生变化,这种离子平衡的改变可能是抑制玉米幼苗正常生长的机理之一。低镁和缺镁条件下,玉米幼苗根系活力分别较对照降低 27.04% 和 41.23% (图 2)。根系活力降低导致根部质外体空间吸收的离子不能迅速向地上部运输,这也可能是离子在根部积累的原因。

SNP 处理后,玉米幼苗新叶 Mg^{2+} 含量升高,而老叶和根中 Mg^{2+} 含量降低(表 3~5),表明 NO 能够促进 Mg^{2+} 由根部和老叶向新叶中运输,有利于增加新叶中 Mg^{2+} 的含量,增强光合作用等生理功能,促进植物生长。SNP 处理后,玉米幼苗新叶 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 等离子含量降低,可能是 NO 改善了 Mg 营养,降低新叶对 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Zn^{2+} 等离子需求。SNP 处理也使低镁和缺镁条件下地上部含量减少的 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等离子含量升高,而低镁和缺镁条件下根中积累的这几种离子,SNP 处理后却下降,可能是 NO 可与 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 等过渡金属形成配合物(Cooper 1999; Stamler 等 1992),从而促进它们由根部向地上部转运。NO 是否能与 Mg^{2+} 结合促进其向新叶运输还需深入研究。SNP 处理后,玉米幼苗根系活力提高,尤其在缺镁胁迫

下,SNP 处理使根系活力迅速提高 32.22%,这与 NO 促进逆境胁迫下植物根系活力的结果一致(闻玉等 2008)。NO 提高了玉米幼苗根系活力可能是促进离子向地上部运输的原因之一。

总之,缺镁降低玉米幼苗根系活力,影响 N 代谢,导致植物体内离子平衡失调,使离子在地上部和根中的含量发生变化,这可能是缺镁抑制玉米幼苗生长的机理之一。NO 可提高根系活力,调控 N 代谢,调控植物体内离子平衡,使缺镁导致紊乱的离子分配得以恢复,促进缺镁胁迫玉米幼苗的生长。

参考文献

- 蔡妙珍, 罗安程, 林咸永, 章永松(2003). 过量 Fe^{2+} 胁迫下水稻的养分吸收和分配. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 29 (3): 305~310
- 陈坤, 朱涛, 张娅婷, 杨桂芳, 刘永定(2009). 增强 UV-B 辐射下一氧化氮对小球藻氮素代谢和类囊体的保护作用. 生态环境学报, 18 (3): 865~868
- 陈世军, 张明生, 韦美玉(2009). SNP 处理的辣椒幼苗对 Cd^{2+} 胁迫的生理响应. 植物生理学通讯, 45 (3): 229~232
- 樊怀福, 郭世荣, 杜长霞, 焦彦生, 栗娜娜, 段九菊(2006). 外源 NO 对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗氮化合物和硝酸还原酶活性的影响. 西北植物学报, 26 (10): 2063~2068
- 李德华, 贺立源, 刘武(2004). 玉米根系活力与耐铝性的关系. 中国农学通报, 20 (1): 161~164
- 李延, 刘星辉(2002). 缺镁胁迫对龙眼叶片衰老的影响. 应用生态学报, 13 (3): 311~314
- 李延, 刘星辉, 庄卫民(2001). 缺镁胁迫对龙眼苗期氮代谢的影响. 植物营养与肥料学报, 7 (2): 218~222
- 刘爱荣, 张远兵, 张雪平, 李百学(2009). 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响. 核农学报, 23 (1): 128~133
- 鲁如坤(1998). 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 55~70
- 汪洪, 褚天铎(1999). 植物镁素营养的研究进展. 植物学通报, 16 (3): 245~250
- 闻玉, 赵翔, 张骁(2008). 水分胁迫下一氧化氮对小麦幼苗根系生长和吸收的影响. 作物学报, 34 (2): 344~348
- 席晓岚, 季宇飞, 曾广铭, 徐红, 李明(2009). 微波消解 ICP 法测定银杏叶中微量元素. 微量元素与健康研究, 26 (4): 20~24
- 肖强, 郑海雷(2004). 一氧化氮与植物胁迫响应. 植物生理学通讯, 40 (3): 379~384
- 杨春武, 李长有, 张美丽, 刘杰, 鞠淼, 石德成(2008). 盐、碱胁迫下小冰麦体内的 pH 及离子平衡. 应用生态学报, 19 (5): 1000~1005
- Cooper CE (1999). Nitric oxide and iron proteins. Biochim Biophys Acta, 1411: 290~309
- Du ST, Zhang YS, Lin XY, Wang Y, Tan CX (2008). Regulation of nitrate reductase by nitric oxide in Chinese cabbage pakchoi

- (*Brassica chinensis* L.). *Plant Cell Environ*, 31 (2): 195~204
- Graziano M, Beligni MV, Lamattina L (2002). Nitric oxide improves internal iron availability in plants. *Plant Physiol*, 130: 1852~1859
- Hermans C, Verbruggen N (2005). Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. *J Exp Bot*, 56 (418): 2153~2161
- Riens B, Heldt HW (1992). Decrease of nitrate reductase activity in spinach leaves during a light-dark transition. *Plant Physiol*, 98: 573~577
- Schwartz S, Bar-Yosef B (1983). Magnesium uptake by tomato plants as affected by Mg and Ca concentration in solution culture and plant age. *Agron J*, 75: 267~272
- Song LL, Ding W, Zhao MG, Sun BT, Zhang LX (2006). Nitric oxide protects against oxidative stress under heat stress in the calluses from two ecotypes of reed. *Plant Sci*, 171: 449~458
- Stamler JS, Singel DJ, Loscalzo J (1992). Biochemistry of nitric oxide and its redox-activated forms. *Science*, 258: 1898~1902
- Sun BT, Jing Y, Chen KM, Song LL, Chen FJ, Zhang LX (2007). Protective effect of nitric oxide on iron deficiency-induced oxidative stress in maize (*Zea mays*). *J Plant Physiol*, 164 (5): 536~543
- Tewari RK, Kumar P, Sharma PN (2006). Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. *Sci Hortic*, 108: 7~14
- Zhao LQ, Zhang F, Guo JK, Yang YL, Li BB, Zhang LX (2004). Nitric oxide functions as a signal in salt resistance in the calluses from two ecotypes of reed. *Plant Physiol*, 134: 849~857