

植物小分子信号肽CIF对拟南芥矿质元素吸收和积累的影响

肖媛¹, 梁绮雯², 赵金平², 苏益^{2*}, 萧浪涛^{2*}

¹清华大学生命科学学院, 北京100084

²湖南农业大学植物激素与生长发育湖南省重点实验室, 长沙410128

摘要: 通过人工合成植物小分子信号肽CIF (Casparian strip integrity factor)核心序列, 并用其处理拟南芥根和叶, 探讨CIF对拟南芥中矿质元素吸收和积累的影响。结果表明: 根施 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CIF可以显著促进根中镁、钙、锰、铁、锌、铜和硼等矿质元素的积累; 叶施CIF可显著提高根中镁、钙、锰、铁、锌和铜等元素的含量, 而对拟南芥叶中矿质元素含量影响较小。CIF可以显著诱导根中镁、钙、锰、铁、锌、铜和硼等元素的吸收转运体基因表达上调。说明植物根和叶均可吸收利用CIF, CIF亦具有作为植物生长调节剂的应用潜力。

关键词: 植物小分子信号肽; 拟南芥; 凯氏带; 矿质元素; 吸收积累

植物小分子信号肽(small signaling peptide, SSP)是一类分泌型多肽小分子, 其通过一系列的信号转导过程调控植物生长发育和环境响应, 因具有与经典植物激素相似的功能, 亦被称为植物多肽激素(Murphy等2012)。据生物信息学方法推测, 植物体内可能存在1 000种以上的SSP (Lease和Walker 2006)。目前已发现数十种植物SSP, 其中成熟植物SSP的肽链长度通常在5~20个氨基酸残基之间, 根据其序列特点可以分为三种类型: 依赖于糖基化等修饰的SSP、依赖于分子间二硫键和蛋白酶加工的SSP和只依赖于分子间二硫键而不需要蛋白酶加工的SSP(Matsubayashi 2014; 孙婷婷等2015; Oh等2018; Olsson等2019)。植物SSP在逆境相应(Pearce等1991; Huffaker等2006; Nakaminami等2018)、顶端分生组织维持(Zhou等2015; Matsuzaki等2010; Mohd-Radzman等2016)、维管束发育(Rodriguez-Villalon等2015)、气孔发育(Suk等2015)、生殖生长(Wang等2016)、细胞分裂(Wang等2015)、根系结瘤(Okamoto等2012)和矿质元素吸收(Wang等2018)等方面发挥重要功能。

植物矿质营养包括植物对矿质的吸收、运输与同化等过程。土壤中的矿质离子通过集流和扩散等方式到达根系表面, 一部分离子经由质膜上的高特异性转运体和离子通道以不消耗能量的被动运输方式或需要消耗能量的主动运输方式进入根表皮细胞内, 然后由共质体途径(symplast pathway)到达中柱; 另一部分可以经由质外体途径(apoplast pathway)直接到达内皮层后转入共质体途径

进入中柱, 最终沿木质部导管运往地上部(Foster和Miklavcic 2017)。凯氏带(Casparian strip)指根内皮层细胞的径向壁木栓化加厚从而形成的带状结构。凯氏带是水和溶质的屏障, 矿质元素在此只能以共质体途径进一步运输, 因此凯氏带对于矿质元素的选择性运输具有重要作用。最近发现一类植物小分子信号肽AtCIF (Casparian strip integrity factor)与拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)凯氏带形成直接相关。拟南芥中有2个成员AtCIF1 (At2g16385)和AtCIF2 (At4g34600), 其成熟肽链分别为DYGNNSPSPRLERPPFKLIPN和DYGHSSPKPKLVRP-PFKLIPN, 可以与其受体AtGSO1 (GASSHO1)和AtGSO2特异结合并引发下游生理响应(Nakayama等2017)。AtCIFs主要在根中柱中表达, 进一步研究发现在低钾情况下, *cif1cif2*突变体木质部中 K^+ 相对减少, 表明CIF对拟南芥 K^+ 吸收和积累有重要影响(Nakayama等2017)。然而, CIF对其他必需矿质元素的吸收和积累的影响还有待系统研究。因此, 本研究人工合成了CIF的核心序列RPPFKLIPN, 用低浓度($0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的合成CIF处理拟南芥幼苗, 研究CIF对拟南芥矿质元素吸收积累以及代表性吸收转运体基因表达的影响, 以便为应用CIF类小分子信号肽调控作物矿质营养提供参考依据。

收稿 2019-04-25 修定 2019-05-10

资助 国家自然科学基金(91417300-03和31570372)。

* 共同通讯作者: 苏益(suyi1979@163.com)、萧浪涛(langtaoxiao@163.com)。

1 材料与方法

1.1 植物材料

供试植物材料为拟南芥哥伦比亚生态型(*Arabidopsis thaliana* L. Columbia ecotype, Col-0), 由本实验室扩繁和保存。

1.2 主要试剂

CIF (序列为RPPFKLIPN)由武汉华美生物工程有限公司合成。MS培养基(不含琼脂和蔗糖)购于北京索莱宝科技有限公司, 琼脂粉、蔗糖及其他常规试剂购于国药集团化学试剂有限公司。Trizol、RNase-free DNase I和M-MLV逆转录酶购自Invitrogen公司, 定量PCR试剂盒和荧光染料SYBR Green I购自北京全式金生物技术有限公司。碘化丙啶(propidium iodide, PI)购于Sigma公司。

1.3 拟南芥培养和CIF处理

用340 mL组培瓶配制含CIF ($0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和不含CIF (对照)的固体MS培养基, 每个培养瓶中盛40 mL固体培养基。拟南芥种子用70%的酒精灭菌5 min, 无菌水清洗3~5次后, 点播于MS固体培养基上。4°C黑暗春化48 h后置于长日照条件下培养(22°C, 16 h光照/8 h黑暗)。培养15 d后, 测定拟南芥幼苗根长, 并取拟南芥幼苗用于矿质元素分析。

另外, 取未做CIF处理的拟南芥幼苗, 直接在叶面上喷施 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CIF, 继续培养5 d后分析幼苗中矿质元素含量。

从MS培养基中取出15 d龄拟南芥幼苗, 转置于含CIF的固体MS培养基, 继续培养6 h后取样分析基因表达。

在营养土中盆栽拟南芥, 刚抽薹时叶面喷施 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CIF, 5 d后观察拟南芥生长情况, 并测定地上部分生物量。

1.4 矿质元素测定

拟南芥鲜样分别在105°C下20 min杀青, 80°C干燥30 min以上, 直至重量不变。取0.1 g左右干样置于 $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (7:1.5, V/V)中, 在120°C下消化10 min, 139°C处理20 min, 当温度低于50°C时, 取样品放置120°C的赶酸仪(上海屹尧仪器科技发展有限公司)中赶酸30 min, 降温到室温后定容至100

mL, 用5 μm 过滤头过滤10 mL, 取2.5 mL注入ICP-MS (Agilent 7500)测定离子含量。

ICP-MS工作条件: Babington高盐雾化器; 石英双通道Scott雾化室, 石英一体化矩管, 1.5 mm中心通道。雾化室温度200°C; 1.0/0.4 mm (Ni)取样锥; 载气流速 $0.85 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; 高频发射功率1 450 W; 混合气流量 $0.28 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; 样品提升速率 $0.1 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$; 等离子气流量 $15.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; 采样深度7.0 mm; 辅助气流量 $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; 样品提升量 $0.4 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 氦气流量 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.5 拟南芥根PI染色及观察

MS培养基中培养8 d的拟南芥幼苗移入含CIF的MS培养基中继续培养2 d。以未用CIF处理的拟南芥幼苗为对照, 取拟南芥的根系浸入 $15 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ PI染液, 静置10 min后, 用 ddH_2O 清洗3次, 制作根的临时装片。设置543 nm激发光, 利用激光扫描共聚焦显微镜(Zeiss LSM710)观察拟南芥根中红色荧光。

1.6 RT-qPCR

检索部分代表性的矿质元素吸收转运体基因, 如*AtMGT1* (Gebert等2009)、*AtCAX4* (Cheng等2002)、*AtNRAMP1* (Ihnatowicz等2014)、*AtIRT1* (Eide等1996)、*AtMTP1* (Tanaka等2015)、*AtCOPT1* (Andrés-Colás等2010)、*AtMOT1* (Tomatsu等2007)和*AtNIP5;1* (Takano等2006)分别对应镁、钙、锰、铁、锌、铜、钼和硼的吸收转运体基因。

取0.1 g左右植物组织, 利用Trizol (Invitrogen)试剂提取总RNA, 参照M-MLV试剂盒(Invitrogen)说明书利用Poly(dT)引物获得cDNA, 参照荧光定量PCR试剂盒说明书配置反应溶液, 在CFX96 Real-time system (BIO-RAD)中运行反应程序: 95°C预变性30 s; 然后运行40个循环, 包括95°C变性10 s, 58°C退火30 s和72°C延伸10 s。内参基因为*Actin*, 分别分析*AtMGT1*、*AtCAX4*、*AtNRAMP1*、*AtIRT1*、*AtMTP1*、*AtCOPT1*、*AtMOT1*和*AtNIP5;1*基因的表达量, 所涉及的引物如表1所示。

1.7 统计方法

应用Excel 2017版软件进行统计分析。

2 实验结果

2.1 CIF对拟南芥表型的影响

分析CIF对拟南芥幼苗根长的影响, 结果显

表1 RT-qPCR中用到的引物序列
Table 1 Primer sequences used in RT-qPCR

基因	正向引物	反向引物
<i>AtMGT1</i>	5'-GTGTGCTAGGAGCTCAGAAGACGC-3'	5'-CAA CAAGGCCACACACTCCAGT-3'
<i>AtCAX4</i>	5'-TCTAGAAGATGTCTTCAATCAGTACGG-3'	5'-CCACATGTGGCGTTCATTAAT-3'
<i>AtNRAMP1</i>	5'-CAAACGGGAGCTCAAAGGAT-3'	5'-TGCTCTCATCGGTGGTTCAG-3'
<i>AtIRT1</i>	5'-CACCATTTCGGAATAGCGTTAGG-3'	5'-CCAGCGGAGCATGCATTTA-3'
<i>AtMTP1</i>	5'-ATGGAGTCTTCAAGTCCCCAC-3'	5'-CCGGAAGCATTCTTAGAATCTG-3'
<i>AtCOPT1</i>	5'-TTGCAATTTCTCTCCTCCCAA-3'	5'-ATGATGGTCGAGGCATT-3'
<i>AtMOT1</i>	5'-ATTGACAGGGGTAGAGCTTG-3'	5'-AACAAAGCCTATGGCAGCAT-3'
<i>AtNIP5;1</i>	5'-CACCGATTTCCCTCTCCTGAT-3'	5'-GCATGCAGCGTTACCGATTA-3'
<i>Actin</i>	5'-ACAGTGTCTGGATCGGTGGTTC-3'	5'-TGCCTCATCATACTCAGCCTTG-3'

示, 在培养基中添加 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CIF可以促进拟南芥幼苗根的生长, 但与对照相比差异不显著(图1-A和B)。进一步用激光扫描共聚焦显微镜观察经PI染色幼苗根部凯氏带的形成情况, 发现对照和CIF处理的拟南芥根中柱中均没有检测到荧光, 说明凯氏带较完整(图1-C和D)。与对照相比, CIF处理后中柱与根内皮层细胞边界的荧光带较宽(图1-C和D), 可能跟凯氏带的增厚相关。此外, 盆栽试验表明, 抽薹时喷施 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CIF对拟南芥株高影响较小(图1-E); 而喷施CIF的拟南芥重量略有提高, 但与对照差异不显著(图1-F)。说明CIF对拟南芥生长有一定促进作用。

2.2 根施CIF对拟南芥中矿质元素积累的影响

凯氏带的存在使得矿质元素只能通过内皮层的原生质体才能进入维管柱, 为了研究CIF是否直接影响矿质元素的积累, 本文检测CIF处理的拟南芥幼苗的根叶中矿质元素含量变化。

图2表明, CIF处理后, 除钼元素外, 拟南芥幼苗根中的镁(Mg)、钙(Ca)、锰(Mn)、铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu)和硼(B)等元素含量均显著上升, 其中镁、钙、锰、铁和锌的变化达极显著水平($P<0.01$), 铜和硼元素变化为显著水平($P<0.05$)。说明CIF处理可直接促进拟南芥根对矿质元素的吸收和积累。

进一步分析了CIF处理对拟南芥叶片中矿质元素含量, 结果如图3所示。CIF处理与对照相比, 拟南芥叶片中仅有铁和锌的含量显著上升($P<0.05$), 锰、镁和铜反而有下降趋势, 钙、硼和钼含量没有明显变化。这与根中的结果差异较大。推测

CIF主要在根中发挥作用, 促进多种矿质元素在根中的吸收和积累, 同时可能促进少数几种离子向地上部分运输。

2.3 叶施CIF对拟南芥中矿质元素积累的影响

CIF是小分子肽, 拟南芥根可以直接吸收CIF, 从而影响凯氏带形成, 但是拟南芥叶片是否可以吸收叶面喷施CIF则并不清楚。因此, 本研究用 $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的CIF喷施于拟南芥叶面, 分析其对拟南芥矿质元素吸收积累的影响。结果如图4所示, CIF处理拟南芥叶后, 叶中铁和锌含量有显著提高($P<0.05$), 镁、钙、锰、铜、硼和钼等元素含量变化并不明显。由此可见, 叶施CIF可能影响铁和锌通过叶片吸收进入植物体内。

分析叶施CIF对根中矿质元素的积累, 结果(图5)表明, CIF处理拟南芥叶片后, 其根中矿质元素含量与根施CIF的结果基本一致, 镁、钙、锰、铁、锌和铜等元素含量不同程度提高, 其中镁、钙、铁和锌的变化达极显著水平($P<0.01$), 锰和铜元素变化为显著水平($P<0.05$), 根中硼和钼元素差异不明显。进一步证明了拟南芥叶片可以直接吸收CIF, 从而发挥生理功能。同时说明小分子肽CIF也可以从地上部分向下运输到根中发挥作用。

2.4 CIF对拟南芥其他元素积累的影响

分析根施CIF对拟南芥体内部分非必需元素积累的影响, 结果如表2所示, 在CIF处理下的拟南芥幼苗的根中, 铝(Al)、铬(Cr)、钴(Co)和铅(Pb)元素均比对照显著提高($P<0.05$); 叶中铬和钴元素含量差异不大, 但铝和铅含量均显著提高($P<0.05$)。

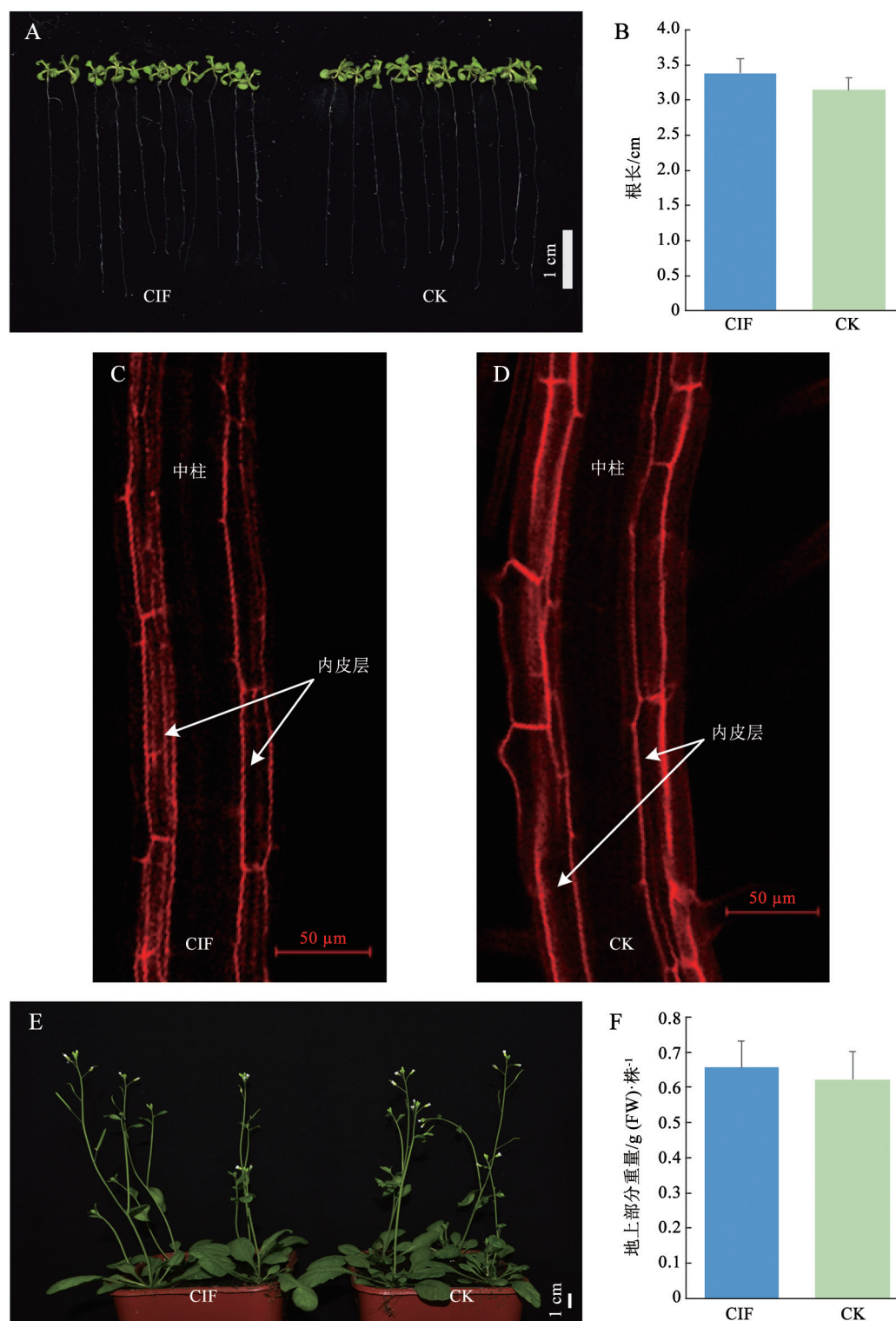


图1 CIF对拟南芥表型的影响

Fig.1 Effects of CIF on *Arabidopsis* phenotype

A和B: 15 d龄拟南芥幼苗的生长状况和根长; C和D: 对照和CIF处理的10 d龄拟南芥幼苗根的PI染色; E和F: 抽薹后5 d拟南芥的表型和地上部生物量。

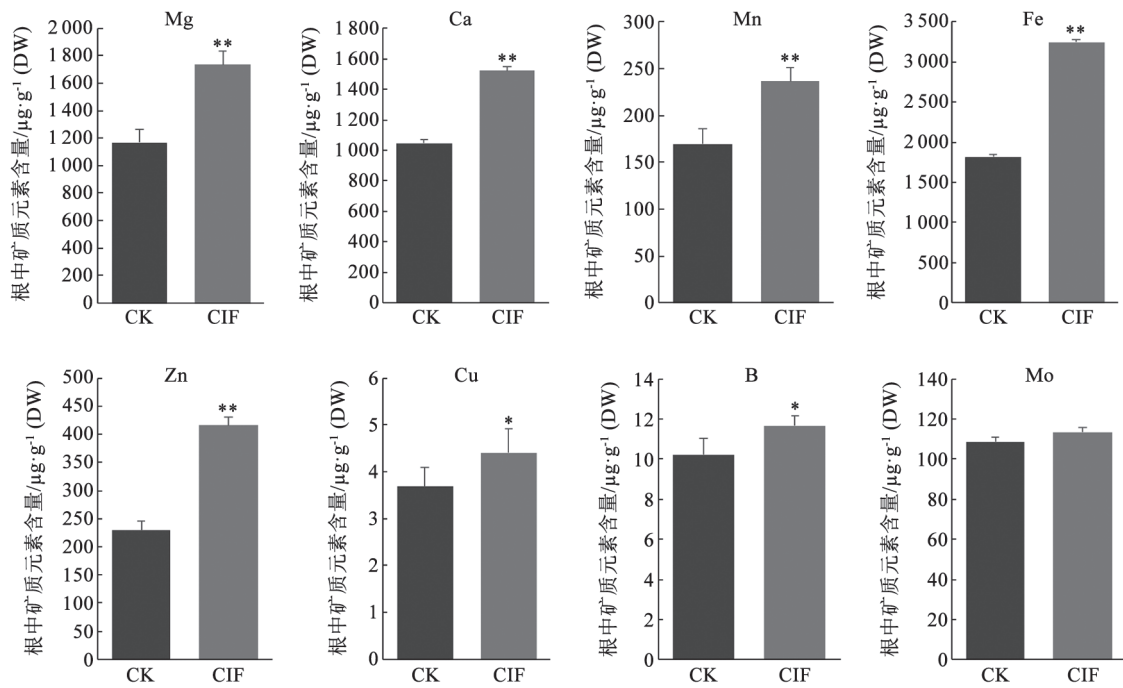


图2 根施CIF的拟南芥根中矿物质含量的变化

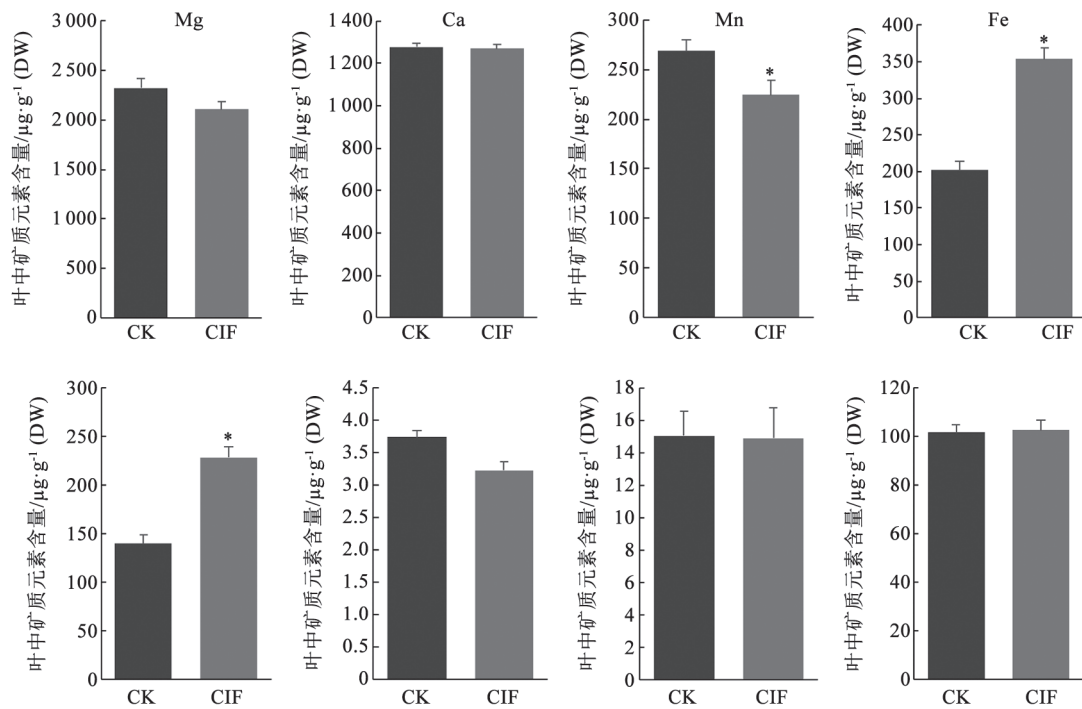
Fig.2 Changes in mineral elements contents in *Arabidopsis* root under root treatment with CIF*表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), **表示不同处理间差异极显著($P < 0.01$)。下图表同此。

图3 根施CIF的拟南芥叶片中矿物质含量的变化

Fig.3 Changes in mineral elements contents in *Arabidopsis* leaves under root treatment with CIF

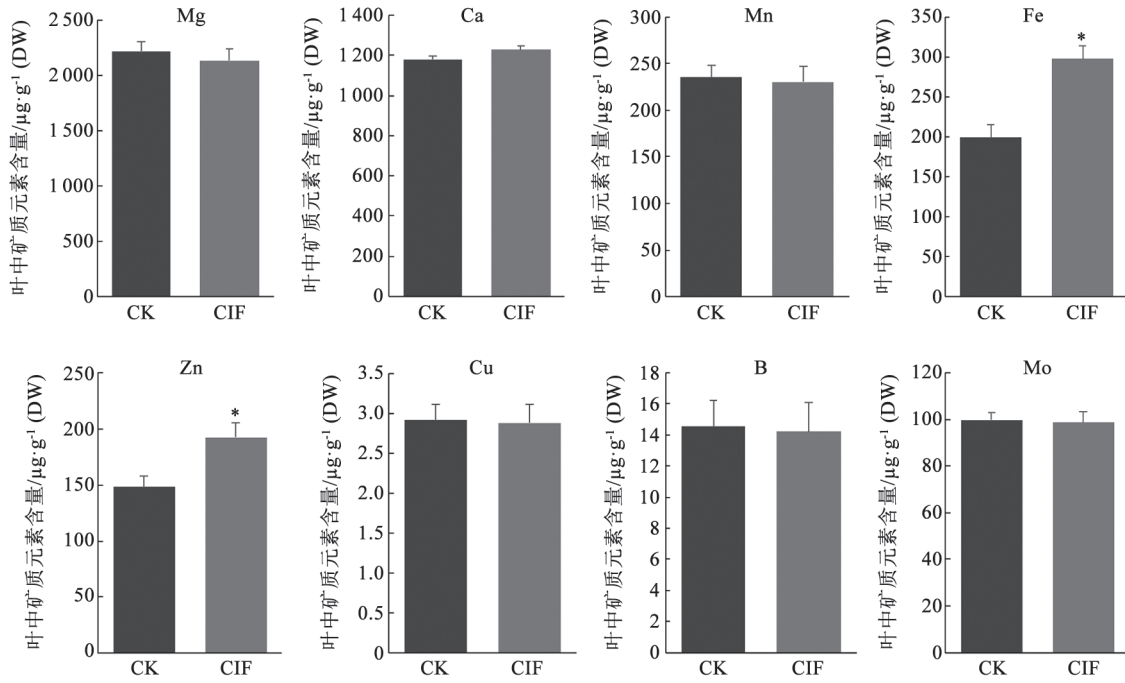


图4 叶施CIF的拟南芥叶片中矿质元素含量变化

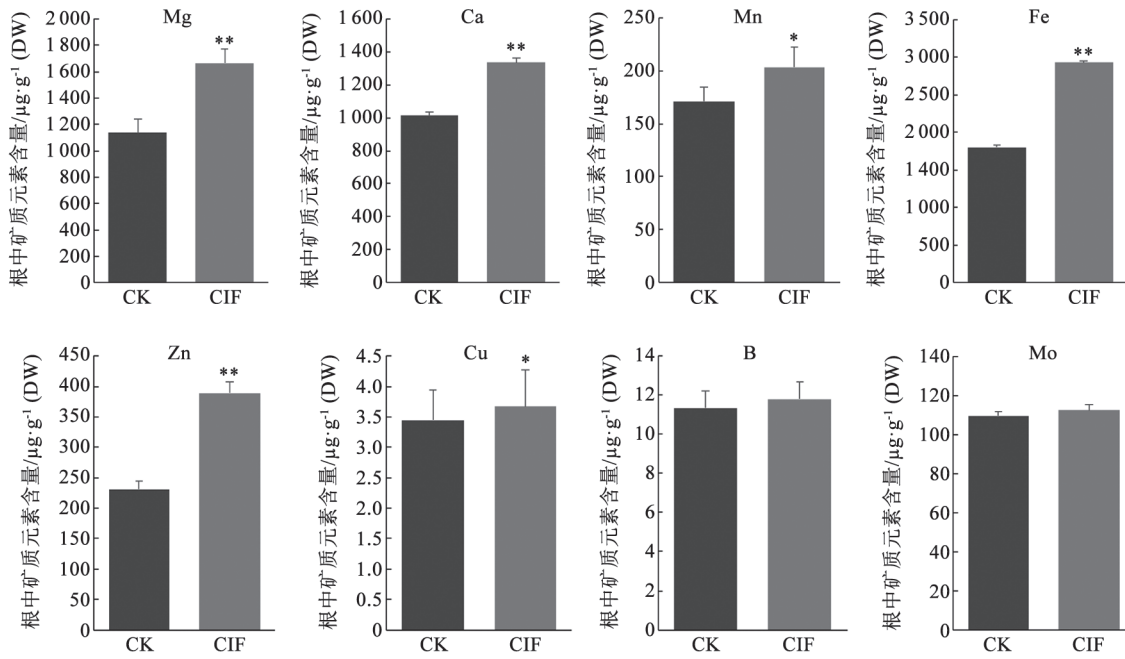
Fig.4 Changes in mineral elements contents in *Arabidopsis* leaves under leaf treatment with CIF

图5 叶施CIF的拟南芥根中矿质元素含量变化

Fig.5 Changes in mineral elements contents in *Arabidopsis* roots under leaf treatment with CIF

表2 根施CIF的拟南芥中部分非必需元素含量的变化

Table 2 Changes in contents of other elements in *Arabidopsis* under root treatment with CIF

处理	根				叶			
	铝含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	铬含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	钴含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	铅含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	铝含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	铬含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	钴含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)	铅含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (DW)
对照	51.71±5.32	46.79±4.78	0.26±0.01	3.79±0.34	18.35±2.34	28.86±3.14	0.21±0.01	2.53±0.31
CIF	116.29±7.36*	76.08±5.98*	0.44±0.02*	5.82±0.46*	30.98±3.12*	29.21±3.89	0.24±0.02	4.55±0.27*

2.5 CIF对拟南芥矿质元素吸收转运基因表达的影响

检测CIF处理对拟南芥矿质元素吸收转运基因表达变化。结果(图6)表明,根施CIF后,除钼元素吸收转运基因*AtMOT1*表达无明显变化以外,拟南芥根中*AtMGT1*、*AtCAX4*、*AtNRAMP1*、*AtIRT1*、*AtMTP1*、*AtCOPT1*和*AtNIP5;1*等基因的表达显著上调;拟南芥叶中仅*AtIRT1*和*AtMTP1*基因表达显著上调。由此可见,根施CIF处理拟南芥使根诱导矿质元素吸收转运基因表达。

3 讨论

矿质元素通过植物根系表皮吸收后,沿着共质体途径和质外体途径向中柱横向运输(Taiz和Zeiger 2006)。正常情况下,由于凯氏带的存在,矿质元素穿过内皮层时只能通过共质体途径进入中柱(Taiz和Zeiger 2006)。矿质元素的共质体运输主要由各种离子通道和转运体介导,这些离子通道和转运体有的具有高度专一性,有的可以转运多种离子

(Hewitt 2003)。植物通过质外体和共质体途径的协同作用保证细胞离子吸收并为植物各组织提供必需元素。拟南芥*AtCIFs*基因通过转录、翻译及翻译后修饰可以形成含21个保守氨基酸残基的小肽,该小肽具有小分子信号肽特征,其主要功能为调控拟南芥凯氏带形成,且已知其对钾离子的动态平衡具有重要作用(Nakayama等2017)。

本研究按CIFs核心序列(RPPFKLIPN)人工合成了肽链用于拟南芥处理,发现根施 $0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 合成CIF可以显著促进根中镁、钙、锰、铁、锌、铜和硼等矿质元素的积累(图2);叶施CIF时根中镁、钙、锰、铁、锌和铜等元素的含量显著提高(图5)。两种处理对拟南芥叶中矿质元素含量影响相对较小(图3和4)。进一步研究发现,用CIF处理拟南芥根系,根中镁、钙、锰、铁、锌、铜和硼的吸收转运体s基因*AtMGT1*、*AtCAX4*、*AtNRAMP1*、*AtIRT1*、*AtMTP1*、*AtCOPT1*和*AtNIP5;1*等的表达显著上调(图6)。由此可见,CIF对植物根

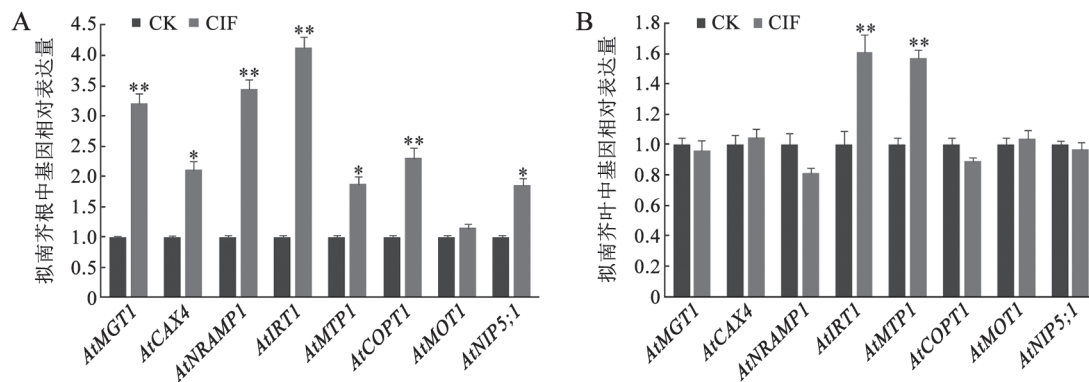


图6 CIF处理对拟南芥矿质元素吸收转运基因表达的影响

Fig.6 Effect of CIF on genes expression of microelement uptake and transport in *Arabidopsis*

A: 拟南芥根中基因相对表达量; B: 拟南芥叶中基因相对表达量。

中矿质元素的吸收和积累具有显著促进作用, 其对叶的影响较小, 叶中仅铁和锌的转运基因表达上调。Takahashi等(2018)发现另一小分子信号肽CLE25信号在干旱响应时能进行长距离传递, 本文发现叶施CIF处理影响到根系中矿质的吸收, 说明CIF不仅可以被根吸收利用, 也可以被叶吸收并向根长距离传递。本文的结果还表明, 除调控凯氏带以外, CIF能调控矿质元素吸收转运基因的表达。有关机制尚待深入研究。此外, 尽管CIFs具有21个保守氨基酸残基, 本研究表明仅用9个氨基酸残基的CIF核心序列就可以引起矿质元素含量变化, 且作用浓度较低, 具有作为植物生长调节剂用于调控植物矿质营养吸收的应用潜力。

参考文献(References)

- Andrés-Colás N, Perea-García A, Puig S, et al (2010). Deregulated copper transport affects *Arabidopsis* development especially in the absence of environmental cycles. *Plant Physiol*, 153 (1): 170–184
- Cheng NH, Pittman JK, Shigaki T, et al (2002). Characterization of CAX4, an *Arabidopsis* H⁺/cation antiporter. *Plant Physiol*, 128 (4): 1245–1254
- Eide D, Broderius M, Fett J, et al (1996). A novel iron-regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast. *Proc Natl Acad Sci USA*, 93 (11): 5624–5628
- Foster KJ, Miklavcic SJ. (2017). A Comprehensive biophysical model of ion and water transport in plant roots. I. Clarifying the roles of endodermal barriers in the salt stress response. *Front Plant Sci*, 8:1326
- Gebert M, Meschenmoser K, Svidová S, et al (2009). A Root-expressed magnesium transporter of the *MRS2/MGT* gene family in *Arabidopsis thaliana* allows for growth in low-Mg²⁺ environments. *Plant Cell*, 21 (12): 4018–4030
- Hewitt EJ (2003). The role of the mineral elements in plant nutrition. *Annu Rev Plant Physiol*, 2 (2): 25–52
- Huffaker A, Pearce G, Ryan CA (2006). An endogenous peptide signal in *Arabidopsis* activates components of the innate immune response. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103 (26): 10098–10103
- Ihnatowicz A, Siwinska J, Meharg AA, et al (2014). Conserved histidine of metal transporter AtNRAMP1 is crucial for optimal plant growth under manganese deficiency at chilling temperatures. *New Phytol*, 202 (4): 1173–1183
- Lease KA, Walker JC (2006). The *Arabidopsis* unannotated secreted peptide database, a resource for plant peptidomics. *Plant Physiol*, 142 (3): 831–838
- Matsubayashi Y (2014). Posttranslationally modified small-peptide signals in plants. *Annu Rev Plant Biol*, 65 (1): 385–413
- Matsuzaki Y, Ogawa-Ohnishi M, Mori A, et al (2010). Secreted peptide signals required for maintenance of root stem cell niche in *Arabidopsis*. *Science*, 329 (5995): 1065–1067
- Mohd-Radzman NA, Laffont C, Ivanovici A, et al (2016). Different pathways act downstream of the peptide receptor CRA2 to regulate lateral root and nodule development. *Plant Physiol*, 171 (4): 2536–2548
- Murphy E, Smith S, De Smet I (2012). Small signaling peptides in *Arabidopsis* development: how cells communicate over a short distance. *Plant Cell*, 24 (8): 3198–3217
- Nakaminami K, Okamoto M, Higuchi-Takeuchi M, et al (2018). AtPep3 is a hormone-like peptide that plays a role in the salinity stress tolerance of plants. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115 (22): 5810–5815
- Nakayama T, Shinohara H, Tanaka M, et al (2017). A peptide hormone required for casparian strip diffusion barrier formation in *Arabidopsis* roots. *Science*, 355 (6322): 284–286
- Oh E, Seo PJ, Kim J (2018). Signaling peptides and receptors coordinating plant root development. *Trends Plant Sci*, 23 (4): 337–351
- Okamoto S, Shinohara H, mori T, et al (2012). Root-derived CLE glycopeptides control nodulation by direct binding to HAR1 receptor kinase. *Nat Commun*, 4 (4): 2191
- Olsson V, Joos L, Zhu S, et al (2019). Look closely, the beautiful may be small: precursor-derived peptides in plants. *Annu Rev Plant Biol*, 70: 153–186
- Pearce G, Strydom D, Johnson S, et al (1991). A polypeptide from tomato leaves induces wound-inducible proteinase inhibitor proteins. *Science*, 253 (5022): 895–897
- Rodriguez-Villalon A, Gujas B, Van Wijk R, et al (2015). Primary root protophloem differentiation requires balanced phosphatidylinositol-4,5-biphosphate levels and systemically affects root branching. *Development*, 142 (8): 1437–1446
- Suk LJ, Marketa H, Michal M, et al (2015). Competitive binding of antagonistic peptides fine-tunes stomatal patterning. *Nature*, 522 (7557): 439–443
- Sun TT, Zhang LL, Wang Q, et al (2015). Rice peptidomics based on nano LC-MS/MS analysis. *Plant Physiol J*, 51 (7): 1173–1177 (in Chinese with English abstract) [孙婷婷, 张乐乐, 王倩等(2015). 基于Nano LC-MS/MS的水稻多肽组学研究. *植物生理学报*, 51 (7): 1173–1178]
- Taiz L, Zeiger E (2006). *Plant Physiology*. 4th ed. Oxford

- University Press, 47–50
- Takahashi F, Suzuki T, Osakabe Y, et al (2018). A small peptide modulates stomatal control via abscisic acid in long-distance signalling. *Nature*, 556 (7700): 235–238
- Takano J, Wada M, Ludewig U, et al (2006). The *Arabidopsis* major intrinsic protein NIP5;1 is essential for efficient boron uptake and plant development under boron limitation. *Plant Cell*, 18 (6): 1498–509
- Tanaka N, Fujiwara T, Tomioka R, et al (2015). Characterization of the histidine-rich loop of *Arabidopsis* vacuolar membrane zinc transporter AtMTP1 as a sensor of zinc level in the cytosol. *Plant Cell Physiol*, 56 (3): 510–519
- Tomatsu H, Takano J, Takahashi H, et al (2007). An *Arabidopsis thaliana* high-affinity molybdate transporter required for efficient uptake of molybdate from soil. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104 (47): 18807–18812
- Wang J, Li H, Han Z, et al (2015). Allosteric receptor activation by the plant peptide hormone phytosulfokine. *Nature*, 525 (7568): 265–268
- Wang T, Liang L, Xue Y, et al (2016). A receptor heteromer mediates the male perception of female attractants in plants. *Nature*, 531 (7593): 241–244
- Wang YY, Cheng Y, Chen KE, et al (2018). Nitrate transport, signaling, and use efficiency. *Ann Rev Plant Biol*, 69: 85–122
- Zhou Y, Liu X, Engstrom EM, et al (2015). Control of plant stem cell function by conserved interacting transcriptional regulators. *Nature*, 517 (7534): 377–380

Effects of small signaling peptide CIF on the mineral absorption and accumulation in *Arabidopsis*

XIAO Yuan¹, LIANG Qi-Wen², ZHAO Jin-Ping², SU Yi², XIAO Lang-Tao^{2,*}

¹College of Life Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Hunan Provincial Key Laboratory of Phytohormones and Growth Development, Hunan Agricultural University, Changsha 401028, China

Abstract: Synthetic small signaling peptide CIF was used to treat *Arabidopsis*. The effects of CIFs on the absorption and accumulation of mineral elements in roots and leaves were studied. The results were as follows: Root treatment with 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CIF could significantly promote the accumulation of mineral elements such as Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu and B in *Arabidopsis* roots. Leaf treatment with CIF could significantly increase the contents of Mg, Ca, Mn, Fe, Zn and Cu in *Arabidopsis* roots. CIF had little effect on the microelement content in leaves. CIF could significantly induce transporter gene expression of Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu and B in roots. It indicated that CIF could be absorbed and utilized by plant roots and leaves, and CIF could also be used as growth regulator.

Key words: small signaling peptide; *Arabidopsis*; casparian strip; mineral element; absorption and accumulation

Received 2019-04-25 Accepted 2019-05-10

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (91417300-03 and 31570372).

*Corresponding authors: Su Y (syui1979@163.com), Xiao LT (langtaoxiao@163.com).