植物营养与肥料学报 2002,8(4):467～472
Plant Nutrition and Fertilizer Science

外源有机酸对两种生态型东南景天吸收和积累锌的影响

龙新宪，倪吾钟，叶正钱，杨肖娥
（浙江大学环境与资源学院，浙江杭州 310029）

摘要：通过溶液培养试验，比较研究了外源有机酸对两种生态型东南景天生长和锌吸收与积累的影响。结果表明，外加柠檬酸或草酸能明显增强非超积累生态型东南景天的耐锌毒能力，叶片、茎和根系的生物量均有增加；而对锌超积累生态型东南景天的生长没有显著性影响。外加柠檬酸、草酸或柠檬酸＋草酸，锌超积累生态型根系 Zn 含量显著增加，但叶片和茎组织中 Zn 含量无明显变化；而非超积累生态型叶片、茎和根系 Zn 含量均显著增加，尤其是根系 Zn 含量，与单独 Zn 处理相比外源有机酸处理增加 4～5 倍。同样，外加柠檬酸、草酸或柠檬酸＋草酸明显提高 Zn 在非超积累生态型根系和地上部的积累量，且对地上部 Zn 积累量的促进程度大于根部；柠檬酸的促进作用又比草酸及 2 种酸混合处理高 1 倍。然而，有机酸处理对 Zn 超积累生态型根系 Zn 积累量有所增加，但对叶片和茎中 Zn 积累量无影响。叶片和茎中水溶态 Zn 含量也受外源有机酸的影响，2 种生态型叶片、茎中水溶态 Zn 含量均受有机酸处理而提高。Zn 超积累生态型叶片和茎中水溶态 Zn 含量占总 Zn 含量比例也受有机酸处理而增大，但非超积累生态型则显著降低。上述结果表明，柠檬酸和草酸可能作为其 Zn 吸收的配基，促进根系对 Zn 吸收与积累，叶片和茎中的 Zn 可能与可溶性有机化合物或无机盐结合。

关键词：东南景天；超积累；有机酸；锌
中图分类号：Q948.11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2002)04-0467-06

Effect of organic acids application on zinc uptake and accumulation by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance

LONG Xin-xian, NI Wu-zhong, YE Zheng-qian, YANG Xiao-e
(*College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

Abstract: A solution culture experiment was carried out to compare the influences of organic acids application on zinc (Zn) uptake and accumulation by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. The results indicated that addition of citric acid or oxalic acid enhanced the tolerance of non-accumulating ecotype of *Sedum alfredii* to Zn toxicity, but had no obvious effects on the growth of the hyperaccumulating ecotype. Addition of citric acid, oxalic acid or both increased Zn concentration in leaf, stem especially root for the non-accumulating ecotype. Zinc concentrations in the roots treated with these organic acids were 4～5 times higher than treated with only Zn. However, application of citric acid, oxalic acid or both had no obvious effects on Zn concentration in leaf and stem of the hyperaccumulating ecotype, except that root Zn concentration was increased by organic acid treatments. The Zn accumulation in both roots and shoots of the non-accumulating ecotype was enhanced by organic acids addition, by citric acid addition in particular. Whereas slight increase in root Zn accumulation but no influence on shoot Zn accumulation were noted for the hyperaccumulating ecotype when grown at external addition of citric acid, oxalic acid or both. The concentration of water soluble Zn increased in leaves and stems, but its proportion to the total Zn concentration decreased by addition of organic acids for the non-accumulating ecotype. For the hyperaccumulating ecotype, however, similar changes in water soluble Zn and its proportion to total Zn in stems

收稿日期：2001-12-03
作者简介：龙新宪(1975—)，女，湖南邵东县人，博士研究生，主要从事植物营养环境生态方向的研究工作。

were noted among the treatments. Application of organic acids increased water soluble Zn and its proportion to the total in the leaves of the hyperaccumulating ecotype. The results implied that citric acid or oxalic acid might be as ligand with Zn to reinforce Zn absorption, transportation and immobilization in roots, and Zn in leaves and stems may exist as the complex with soluble organic compounds or as soluble inorganic salts.

Key words: *Sedum alfredii* Hance; hyperaccumulation; organic acid; zinc

近年来,重金属超积累植物已引起国内外诸多学者的浓厚兴趣,并认为超积累植物在重金属污染土壤的植物修复(phytoremediation)[1,2]和植物采矿(phytomining)[3,4]等方面具有广阔的前景。迄今为止,已发现大约400种植物属于超积累植物,其中有18种属于锌(Zn)超积累植物,其地上部Zn含量超过10 g·kg^{-1}(以干物计)[5,6]。Zn超积累植物主要分布在富含Zn的矿质土壤上,如 *T. caerulescens* 是一种国际上公认的Zn超积累植物,与非超积累植物相比, *T. caerulescens* 具有很强的吸收和向地上部运输Zn的能力[7~9]。研究还发现,该植物地上部的Zn含量可高达25~28 g·kg^{-1},且生长未受到显著的影响[9]。

有机酸广泛存在于植物体内和根际环境中,可能作为重金属元素的配基,与之配位结合参与重金属元素的吸收、运输、积累等过程,从而促进植物对重金属的超积累,并达到植物体内重金属解毒的目的[10]。植物体内或根际区域发现的螯合重金属的有机酸主要包括:草酸(Oxalic acid)、组氨酸(Histidine)、苹果酸(Malate acid)、柠檬酸(Citric acid)[11]。如Krämer[12]发现 *Alyssum* 超积累Ni与大量产生组氨酸密切相关。许多学者也致力于寻找与Zn超积累作用有关的有机载体,但至今尚未获得明确的结果[13,14]。

最近我们的研究发现,东南景天(*Sedum alfredii* Hance)是一种新的锌超积累植物,其耐Zn毒的能力、吸收和运输锌的能力远强于珠芽景天(*Sedum sarmentosum*),凹叶景天(*Sedum bulbiferum*)和垂盆草(*Sedum emarginatum*),当溶液中Zn浓度为80 mg·L^{-1},东南景天地上部Zn含量高达19.09±0.86 g·kg^{-1},且生长未受任何影响[15]。研究还发现,东南景天不同生态型耐高Zn能力、吸收和运输Zn的能力存在显著的差异,超积累生态型东南景天由于长期生长在高Zn的土壤环境中,已进化为Zn超积累植物;而非超积累生态型东南景天取自浙江省杭州市九溪的茶园地,当营养液中Zn为80 mg·L^{-1}时,则出现了明显的中毒症状,生长被严重抑制[16]。分析两种生态型体内的有机酸含量发现,超积累生态型和非超积累生态型东南景天体内均含有丰富的苹果酸,且两者间没有显著的差异,但超积累生态型体内柠檬酸和草酸含量明显高于非超积累生态型(结果未发表),这可能与其超积累生态型东南景天超积累Zn有一定的关系。本研究通过外加柠檬酸和草酸,探讨其对两种生态型东南景天的生长、吸收和积累Zn的影响,以期阐明柠檬酸和草酸与东南景天超积累Zn的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为两种生态型东南景天(*Sedum alfredii* Hance)—超积累生态型和非超积累生态型。超积累生态型取自浙江省衢州古老铅锌矿,非超积累生态型取自杭州九溪。两种植物于2000年12月移至浙江大学玻璃温室繁殖,培育新枝芽,供试验之用。

1.2 溶液培养

用自来水将两种供试植物的根系冲洗干净后,移至营养液中培养,基本营养液的组成为: $Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$ 2.00 mmol/L, KH_2PO_4 0.10 mmol/L, $MgSO_4\cdot 7H_2O$ 0.50 mmol/L, KCl 0.10 mmol/L, K_2SO_4 0.70 mmol/L, H_3BO_3 10.00 μmol/L, $MnSO_4\cdot H_2O$ 0.50 μmol/L, $ZnSO_4\cdot 7H_2O$ 1.00 μmol/L, $CuSO_4\cdot 5H_2O$ 0.20 μmol/L, $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ 0.01 μmol/L, Fe-EDTA 100 μmol/L。预培养20d,待茎基部长出不定根后,开始进行处理。共设5个处理,即:CK(T_0)、0.5 mmol/L Zn(T_1)、0.5 mmol/L Zn + 0.5 mmol/L 柠檬酸(T_2)、0.5 mmol/L Zn + 0.5 mmol/L 草酸(T_3)和0.5 mmol/L Zn + 0.25 mmol/L 柠檬酸 + 0.25 mmol/L 草酸(T_4)。Zn^{2+}以 $ZnSO_4\cdot 7H_2O$ 形态加入,重复3次。每天用pH计(PH 1270)测定营养液pH值,并用0.1 mol/L NaOH或0.1 mol/L HCl调节营养液pH至5.8,并保持24h连续通气。每2d更换一次营养液,处理18d后收获,先反复用自来水把根冲洗干净,再用20 mmol/L Na-EDTA交换15min,去除根表面吸附的Zn^{2+},最后用去离子水冲洗干净,分成叶片、茎和根系3部分,分别测定鲜重。杀青后在60℃下烘干至恒重,测定干物量;最后用不锈钢粉碎机磨细,过0.25mm尼龙网筛,供分析测定用。

1.3 测定方法

叶片、茎、根系组织中Zn总含量的测定采用 HNO_3 消

煮[17]。基本步骤为：称取 0.5000 g 样品于石英消煮管中，加入 10 mL HNO_3，静置过夜，于 180℃ 消煮 5h，至残留液为 1～2 mL，再用去离子水溶解，过滤，定容至 50 mL。用原子分光光度计法（岛津公司生产的 AA-6800 型）测定 Zn 含量。

叶片和茎组织中水溶态 Zn 采用 1 mmol/L MES 缓冲液（pH 6.0）[18]提取。基本步骤为：称取 0.5000 g 样品于 50 mL 塑料离心管中，加入 20 mL 提取液，25℃ 下震荡 24h，过滤。原子分光光度计法（岛津公司生产的 AA-6800 型）测定滤液中 Zn 含量。

2　结果与分析

2.1　生物产量

两种生态型东南景天对过量 Zn 的反应存在显著性差异（表 1）。0.5 mmol/L Zn（T_1）处理抑制非超积累生态型的生长，根尖坏死，褐化，处理 10d 后，叶片失水萎蔫，叶片、茎和根系的生物产量急剧减少，特别是根系，与对照（T_0）相比，差异达极显著水平；而超积累生态型生长健康，无任何中毒症状。

柠檬酸或草酸可明显减缓 0.5 mmol/L Zn 对非超积累生态型东南景天的毒害作用，特别是根系。单独或同时加入柠檬酸或草酸（T_2、T_3、T_4）后，根系的生物量显著高于 T_1 处理，且与对照之间的差异不显著。相反，柠檬酸或草酸对超积累生态型的生长无明显影响，不同处理之间，叶片、茎和根系的生物产量差异不显著。

表 1　不同处理对两种生态型东南景天的鲜重的影响（g/plant）

Table 1　Effect of different treatments on the fresh weight of two ecotypes of *S. alfredii*

类型 Type	处理 Treatment	叶片 Leaf	茎 Stem	根系 Root
超积累生态型	T_0	5.35±0.47 a	3.50±0.71 a	1.15±0.06 a
Hyperaccumulating	T_1	5.76±0.64 a	4.20±0.55 a	1.39±0.38 a
ecotype	T_2	5.71±1.19 a	4.18±0.80 a	1.39±0.22 a
	T_3	5.66±0.87 a	4.04±0.89 a	1.35±0.28 a
	T_4	5.66±1.14 a	4.36±0.67 a	1.30±0.32 a
非超积累生态型	T_0	2.85±0.68 aA	2.36±0.65 aA	0.15±0.03 aA
Non-accumulating	T_1	1.21±0.24 bB	1.23±0.06 bB	0.04±0.01 cB
ecotype	T_2	1.56±0.23 bB	1.39±0.28 bB	0.14±0.06 abA
	T_3	1.72±0.09 bB	1.51±0.08 bAB	0.09±0.01 abcAB
	T_4	1.41±0.06 bB	1.34±0.20 bB	0.08±0.02 bcAB

注（Note）：1）T_0：CK，T_1：0.5 mmol·L^{-1} Zn，T_2：0.5 mmol·L^{-1} Zn + 0.5 mmol·L^{-1}柠檬酸（citric acid，CA），T_3：0.5 mmol·L^{-1} Zn + 0.5 mmol·L^{-1}草酸（oxalic acid，OA），T_4：0.5 mmol·L^{-1} Zn + 0.25 mmol·L^{-1}柠檬酸（CA）+ 0.25 mmol·L^{-1}草酸（OA）。下同，same as follows.

2）不同大小写字母表示差异达 1% 和 5% 水平。Different capital and small letters means significant at 1% and 5% levels.

2.2　Zn 的吸收、积累和分配

两种生态型东南景天叶片、茎和根系组织中 Zn 含量存在显著差异（图 1）。无论在低 Zn（CK）或高 Zn（0.5 mmol·L^{-1} Zn）条件下，超积累生态型的叶片和茎中 Zn 含量比非超积累生态型高。T_1 处理条件下，超积累生态型的叶片和茎中 Zn 含量分别约是非超积累生态型的 17 和 8 倍。相反，在低 Zn 条件下，两者根系 Zn 含量无显著性差异，但在高 Zn 条件下，非超积累生态型根系 Zn 含量约是超积累生态型的 3.5 倍。对于超积累生态型，不同组织中 Zn 含量以叶片≈茎＞根系，叶片（或茎）Zn 含量/根系 Zn 含量的比值始终大于 1，而非超积累生态型以根系＞茎＞叶片，叶片（或茎）Zn 含量/根系 Zn 含量的比值始终小于 1。

图 1 还看出，柠檬酸和草酸促进了 2 种生态型东南景天对 Zn 的吸收，根系中 Zn 含量显著提高，与 T_1 处理比较，差异均达极显著水平，超积累生态型根系 Zn 含量以 T_4 处理最高，而非超积累生态型以 T_2 处理最高。对于非超积累生态型，当单独加入柠檬酸或草酸时，叶片中 Zn 含量显著增加，但当同时加入柠檬酸和草酸时，叶片 Zn 含量虽也有所提高，但与 T_1 处理之间的差异未达显著水平；加草酸的处理（T_3、T_4）显著提高非超积累生态型茎 Zn 含量，而柠檬酸（T_2）处理对茎 Zn 含量没有显著性影响。对于超积累生态型，柠檬酸或草酸处理后，叶片和茎 Zn 含量均没有显著性变化。这些结果表明，柠檬酸和草酸促进非超积累生态型东南景天 Zn 的吸收和向地上部转运；促进超积累生态型根系对 Zn 的吸收，但对其地上部转运无影响。

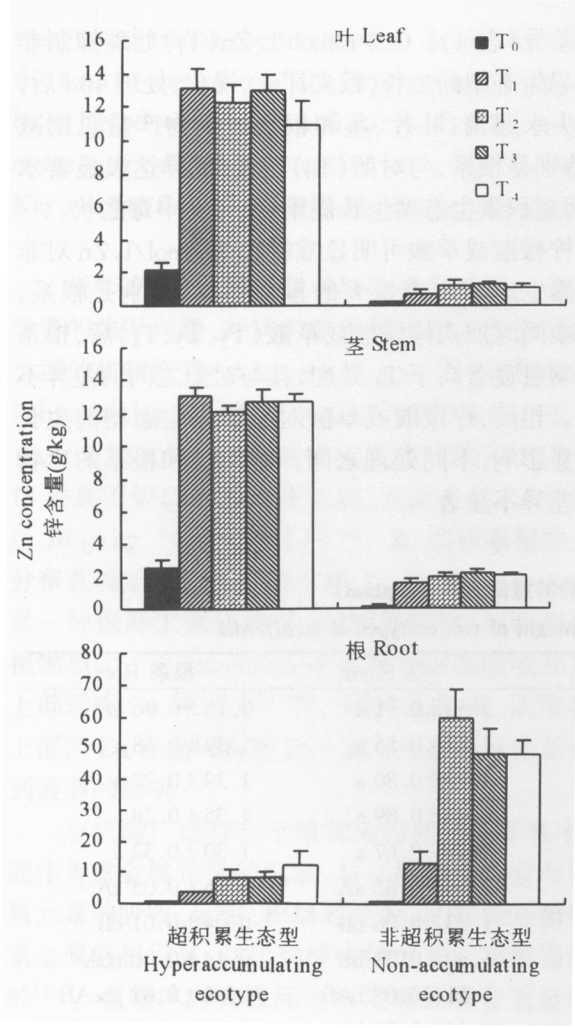

图 1 两种生态型东南景天叶片、茎和根系组织中 Zn 含量

Fig. 1 Zn concentrations in the leaf, stem and root of two ecotypes of *S. alfredii*.

柠檬酸和草酸显著地影响 Zn 在两种生态型东南景天的地上部和根系中的积累和分配(图 2)。超积累生态型地上部 Zn 积累量远远大于非超积累生态型，T_1 处理，前者地上部 Zn 积累量为 5.44 ± 0.52 g/plant，占总积累量的(95.44 ± 0.74)%，后者为 0.14 ± 0.03 g/plant，占总积累量的(65.08 ± 9.93)%。单独或同时加入柠檬酸和草酸，非超积累生态型地上部和根系 Zn 积累量显著增加，尤以根系更为明显，从而导致地上部 Zn 积累量占总积累量的比例减少。T_2、T_3、T_4 处理，地上部 Zn 积累量占总积累量的比率分别为(17.96 ± 3.84)%、(36.32 ± 3.84)%和(32.06 ± 5.53)%。柠檬酸或草酸显著增加超积累生态型地上部根系 Zn 的积累，对根系 Zn 积累量没有显著影响，导致根系 Zn 积累量占总积累量的比例有所下降。T_2、T_3、T_4 处理，地上部 Zn 积累量占总积累量的比例分别为(87.59 ± 2.56)%、(89.83 ± 1.42)% 和(84.40 ± 4.91)%。

2.3 水溶态 Zn 含量

超积累生态型东南景天叶片和茎中的水溶态 Zn 含量远远超过非超积累生态型，T_1 处理，超积累生态型东南景天叶片和茎组织中的水溶态 Zn 含量分别约为非超积累生态型的 19.4 和 44.7 倍(图 3)。增加 Zn 处理水平(0.5 mmol·L^{-1} Zn 处理与对照比较)，两种生态型东南景天叶片和茎中的水溶态 Zn 绝对含量均增加，但超积累生态型叶片和茎中水溶态 Zn 含量占总 Zn 含量比例急剧增加，而非超积累生态型则显著减少(图 3)。

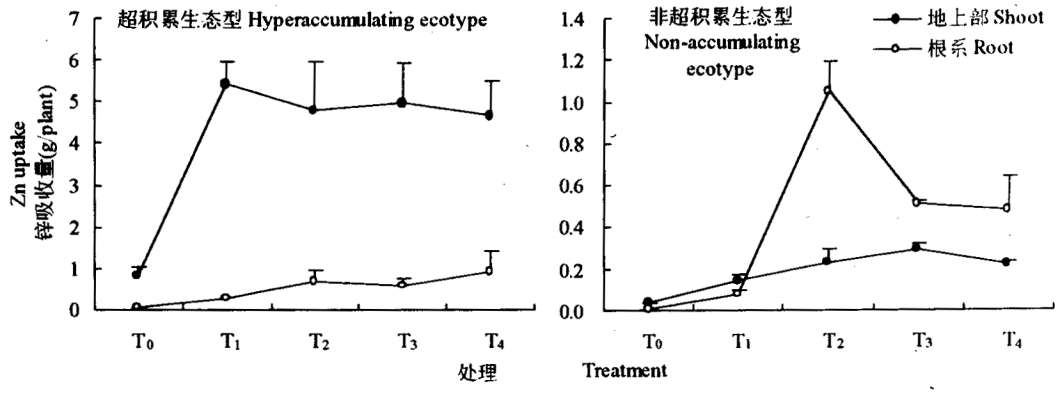

图 2 两种生态型东南景天地上部和根系 Zn 总积累量

Fig. 2 The total uptake of Zn in the shoots and roots of two ecotypes of *S. alfredii*.

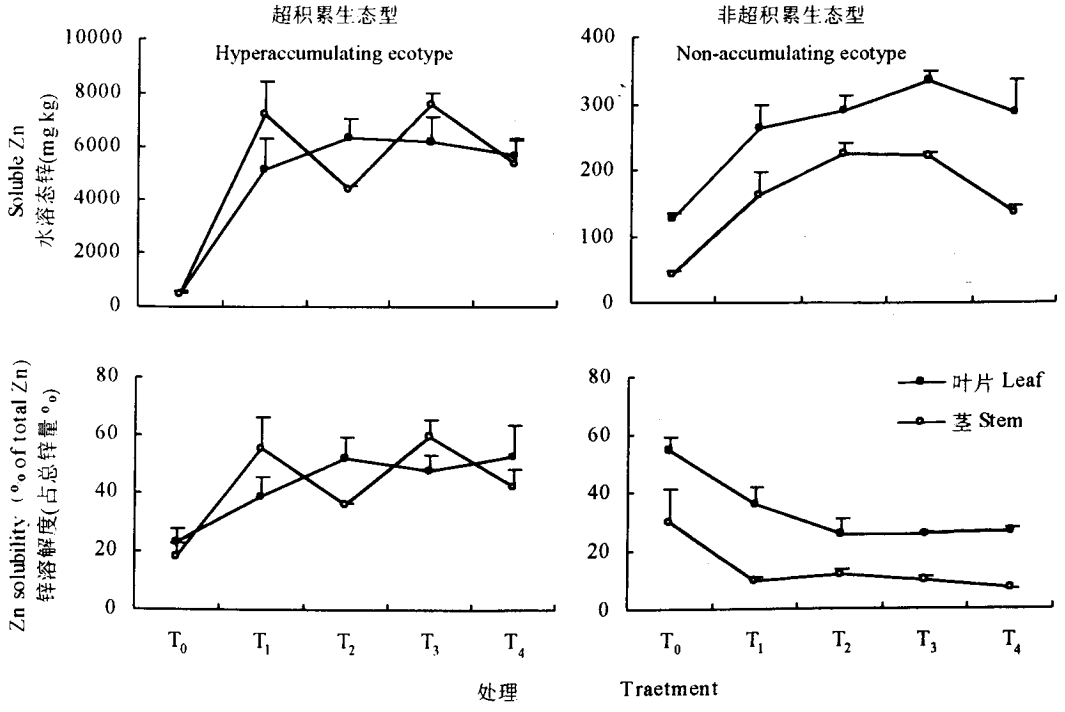

图 3　两种生态型东南景天的叶片和茎组织中水溶态 Zn 含量

Fig. 3　The water soluble Zn in the leaves and stems of two ecotype of *S. alfredii*

柠檬酸和草酸影响两种生态型东南景天叶片和茎中水溶态 Zn 含量(图 3)。对于超积累生态型,柠檬酸处理(单独或与草酸同时处理),叶片中水溶态 Zn 含量及其占总 Zn 含量比例增加,但茎中水溶态 Zn 含量及其占总 Zn 含量减少,与 T_1 处理之间的差异达显著水平;草酸单独(T_3)处理,叶片和茎中水溶态 Zn 含量及其占总 Zn 含量比例均增加。对于非超积累生态型,柠檬酸或草酸(单独或同时)处理后,叶片中水溶态 Zn 含量增加,尤其是草酸单独处理,比 T_1 处理差异达显著水平,但水溶态 Zn 含量占总 Zn 含量比例显著降低;柠檬酸或草酸单独处理显著增加茎组织中的水溶态 Zn 含量,但两者同时处理时,水溶态 Zn 含量反而有所下降,但各处理对水溶态 Zn 含量占总 Zn 含量比例没有显著性影响。

3　讨论

有机酸广泛存在于植物体内和根际环境中,可能作为重金属元素的配基,与之配位结合参与重金属元素的吸收、运输、积累以及重金属解毒等过程[10]。陈英旭等报道[19],柠檬酸和酒石酸可以明显地减轻 Cd 和 Pb 对萝卜的毒害。我们的研究结果也表明,柠檬酸和草酸减轻 Zn 对非超积累生态型东南景天的毒害作用,尤其是根系的生长状况得到明显改善。重金属对植物毒害的机理之一是抑制其它营养元素的吸收和运输,破坏植物体内养分平衡。分析体内各种营养元素的含量发现(结果未发表),0.5 mmol·L^{-1} Zn 处理显著降低非超积累生态型根系、叶片和茎中 K 和 Mn 的含量,叶片和茎中 P、K、Ca 和 Mn 的含量也显著降低;而柠檬酸和草酸处理后,根系中 K、Mn 和 Cu 含量显著提高,叶片和茎组织中 K、Mn 含量也所增加,这可能是其毒害作用减轻的原因之一。此外,柠檬酸和草酸还促进非超积累生态型对 Zn 的吸收和向地上部转运,其根系、叶片和茎中 Zn 含量显著增加,推测其原因之一是柠檬酸和草酸缓减了植物的 Zn 毒害作用,根系活力和蒸腾作用加强,从而间接促进了 Zn 的吸收和运输;原因之二可能是柠檬酸和草酸作为 Zn 的配基并与其结合,通过离子通道或载体进入根细胞,从而导致根系 Zn 含量增加,进一步促进 Zn 从根系细胞向木质部的装载,导致茎和叶片 Zn 含量增加。

目前,有机酸与植物超积累 Zn 的报道还存在很大争议。如 Tolrà 等[20]观察到 Zn 超积累植物 *T. caerulescens* 地上部可溶性 Zn 浓度与苹果酸和草酸浓度显著正相关,而根系中缺乏这种关系,认为有机酸的积累可能是阴阳离子平衡的结果,而不是

一种特殊的忍耐机制。Salt 等[14]利用 X 射线吸收光谱分析 *T. caerulescens* 体内 Zn 的结合基团，地上部 Zn 主要与柠檬酸结合（占 38%），其次依次为游离的水合阳离子（26%）、组氨酸结合态（16%）、细胞壁结合态（12%）和草酸结合态（9%）；木质部的 Zn 主要以水合阳离子形态运输（占 79%），剩余的与柠檬酸结合（占 21%）。但同一种金属对不同植物种类有机酸作用的差异很大。东南景天植物的 C 同化途径为景天酸代谢途径，体内有机酸的代谢及有机酸积累与 Zn 超积累的关系是否存在其特殊性？研究结果表明，超积累生态型对 Zn 毒已有很强的耐性，0.5 mmol·L^{-1} Zn 条件下的生长比对照更好；且其在 4.5 mmol·L^{-1} Zn 下生长基本正常[15,16]。柠檬酸和草酸处理后，超积累生态型东南景天根系 Zn 含量较低，但各处理间差异达显著水平（图 1）。最近我们还发现，在植物正常生长范围内，增加 Zn 供应水平，超积累生态型东南景天根系柠檬酸和草酸含量显著提高（结果未发表），这些结果启示柠檬酸和草酸可能参与根系对 Zn 的吸收，运输及 Zn 在根液泡内的贮藏过程。超积累生态型叶片和茎积累的 Zn 约有一半以水溶态存在，且随着 Zn 总含量的增加而增加（图 3），这就排除了质外体沉淀作为其主要的解毒机制。表明茎叶细胞中过量 Zn 可能与可溶性有机化合物结合，贮存在液泡中。同时我们还发现，东南景天的叶细胞液泡很大，体内积累大量的苹果酸。但 Zn 是否与苹果酸结合贮存在液泡中，东南景天体内 Zn 究竟以何种形态长距离运输，还有待于深入研究。

参考文献：

[1] Baker A J M, Reeves R D and Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J & C (Brassicacease)[J]. New Phytol., 1994, 127:61-68.

[2] McGrath S P, Shen Z G and Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical change in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucm* grown in contaminated soils[J]. Plant and Soil, 1997, 188:153-159.

[3] Brooks R R, Chambers M F, Nicks L J and Robinson B H. Phytomining[J]. Trends in Plant Sci., 1998, 3:359-362.

[4] Robinson B H, Brooks R R, Howes A W, Kirkman J H and Gregg P E H. The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator Berkheya coddii for phytoremediation and phytomining[J]. J. of Geochem. Explor., 1997, 60:115-126.

[5] Reeves R D and Baker A J M. Metal -accumulating plants[A]. *In*: Raskin H and Ensley BD (eds). Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clear up the environment[C]. John Wiley & Sons. Inc.,2000. 193-230.

[6] Lasat M M, Baker A J M and Kochian L V. Physiological characterization of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and non-accumulator species of *Thlapi* [J]. Plant Physiol., 1996,112:1715-1722.

[7] Lasat M M, Pence N S, Garvin D F, Ebbs S D and Kochian L V. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. J. Exp. Bot., 2000, 51:71-79.

[8] Shen Z G, Zhao F J and McGrath S P. Uptake and transport of zinc in hyperaccumulator *T. caerulescens* and non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum* [J]. Plant Cell and Envion, 1997,20:898-906.

[9] Brown S L, Chaney R L, Angle J S *et al*. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 125-133.

[10] 杨肖娥，龙新宪和倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理与分子机制[J]. 植物营养与肥料学报，2002, 8(1):8-15.

[11] 张玉秀，柴团耀. 植物耐重金属机理研究进展[J]. 植物学报，1999, 41(5):453-457.

[12] Kramer U, Cotter-Howells J D, Charnock J M, Baker A J M and Smith J A C. Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel[J]. Nature, 1996, 379: 635-638.

[13] Vázquez M D, Poschenrieder C, Barcelo J, Baker A J M, Hatton P and Cope G H. Compartment of zinc in roots and leaves of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J& C Presl[J]. Bot. Acta, 1994, 107:243-250.

[14] Salt D E, Prince R C, Backer A J M, Raskin I and Pickering I J. Zinc ligands in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* as determined using X-ray absorption spectroscopy [J]. Environ. Sci. Technol., 1999, 33:713-717.

[15] Long Xin-xian, Yang Xiao-e, Ye Zheng-qian, Ni Wu-zhong and Shi Wei-yong. Study of the differences of uptake and accumulation of zinc in four species of *Sedum linn*[J]. Acta Bot. Sic., 2002, 2

[16] 杨肖娥，龙新宪，倪吾钟和倪士锋. 古老铅锌矿区生态型东南景天对锌耐性及超积累特性的研究[J]. 植物生态学报，2001, 6:670-677.

[17] Zarcinas B A, Cartwright B and Spouncer L R. Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry [J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1987, 18:131-146.

[18] Zhao F J, Shen Z G and McGrath S P. Solubility of zinc and interactions between zinc and phosphorus in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant, Cell and Environment, 1998, 21:108-114.

[19] 陈英旭，林琦，陆芳和何云峰. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. 环境科学学报，2000,20:467-472.

[20] Tolra R P, Poschenrieder C and Barcelo J. Zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*, Ⅰ. Influence on growth and mineral nutrient[J]. J. Plant Nutr., 1996, 19:1531-1540.

[21] Zhao F J, Lombi E, Breedon T and McGrath S P. Zinc hyperaccumulation and cellular distribution in *Arabidopsis halleri* [J]. Plant, Cell and Environment, 2000, 23: 507-514.