

两种生态型东南景天(*Sedum alfredii* Hance)根系互作效应对植株生长及吸收利用土壤 Zn 的影响

龙新宪¹, 王艳红^{1,2}, 吴启堂¹

(1.华南农业大学资源与环境学院, 广东 广州 510642; 2.广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广东 广州 510640)

摘要:采用盆栽套种方法探讨了不同程度根系互作对两种生态型东南景天的生长和吸收利用土壤 Zn 的影响,以及超积累生态型东南景天的根系是否能活化土壤中难利用态 Zn。不同程度的根系互作采用不同隔膜处理,即无隔膜处理、400 目尼龙筛布隔开和 PVC 板隔开。结果发现,当两种生态型东南景天套种时,不同程度的根系互作对非超积累生态型东南景天的地上部和根系的生物量、根系 Zn 含量有显著影响。当与超积累生态型东南景天的根系完全交互作用或采用 400 目尼龙筛布隔开时,非超积累生态型的根系 Zn 含量显著增加,其地上部和根系生物量比其单种时显著减少。这些结果间接表明,超积累生态型东南景天根系能够活化土壤中的难溶态 Zn。

关键词:东南景天;根系; 锌;套种

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0092-07

Effects of Root Interaction Between Two Ecotypes of *Sedum alfredii* Hance on Plant Growth and Soil Zinc Uptake and Utilization

LONG Xin-xian¹, WANG Yan-hong^{1,2}, WU Qi-tang¹

(1.College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Guangdong Academy Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance has exceptional abilities to mobilize and uptake Zn from soil. The study, through interplanting non-hyperaccumulating ecotype of *S. alfredii* Hance as a bioassay, was to test if the roots of the hyperaccumulating ecotype can mobilize Zn from less-available pools in the soil and this mobilization of Zn in the rhizosphere of the hyperaccumulating ecotype of *S. alfredii* Hance would increase the uptake of Zn and inhibit the growth of the less metal-tolerant plants with their roots permitted to intermingle and develop coincident rhizosphere. The hyperaccumulating ecotype of *S. alfredii* Hance was interplanted with non-hyperaccumulating ecotype in pots without barrier, or separated by solid barriers or mesh barriers to limit the extent of root intermingling (rhizosphere interaction). The results showed that the biomass and Zn concentrations in the root of non-hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance varied with different extents of root intermingling, shoot and root biomass of non-hyperaccumulating ecotype was decreased significantly, and the Zn concentration in the root of non-hyperaccumulating ecotype were increased when the roots of non-hyperaccumulating ecotype were completely intermingled or separated by mesh with hyperaccumulating ecotype.

Keywords: *Sedum alfredii* Hance; root system; Zn; interplanting

重金属超积累植物具有超常的从土壤中吸收重金属,并将重金属转运和积累到地上部的能力,可能的机制之一是超积累植物能够活化土壤中的重金属^[1]。

如Knight等^[2]发现,种植 *Thlaspi caerulescens* 后的土壤溶液中 Zn 和 Cd 含量显著下降,但土壤溶液中减少的 Zn 和 Cd 的量也只能解释 *T. caerulescens* 吸收的总 Zn 量的 1%。McGrath等^[3]研究也发现,种植 Zn 超积累植物 *T. caerulescens* 和非超积累植物 *T. ochroleucum* 后,根际和非根际土壤中可提取态 Zn ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{NO}_3$ 提取) 的含量均显著下降,且 *T. caerulescens*

收稿日期:2007-02-01

基金项目:国家自然科学基金资助(20407008)

作者简介:龙新宪(1975—),女,湖南人,博士,副教授,主要从事重金属污染土壤的治理与修复研究工作。

E-mail:longxx@scau.edu.cn

比 *T. ochroleucum* 降低的更多,但可提取态部分减少的量只能解释 *T. caerulescens* 吸收的总 Zn 量的 10%,说明 *T. caerulescens* 能有效活化土壤中难溶态 Zn。然而,目前对超积累植物活化土壤中的难溶态重金属的机制还了解甚少。国内外对超积累植物活化重金属的研究手段主要借助于测定土壤中的可提取态(植物有效态)的重金属含量变化和植物吸收量,如果植物吸收重金属的总量大于土壤中可提取态的重金属的减少量,则推断植物根系能活化土壤中难溶态重金属^[2,3]。然而,当土壤中可利用的重金属被植物耗竭后,由于植物的生长周期较长,在此期间,土壤中的难利用态和可利用态重金属之间可能重新达到动态平衡,导致植物根系对土壤中重金属的活化并不能通过土壤中的有效态金属含量的变化反映出来。鉴于此,本文提出这样的假设:如果超积累植物的根系能有效地活化土壤中难溶态重金属,那么当其与非超积累植物共享同一个根际环境时,势必能促进后者根系对土壤 Zn 的吸收。因此,通过非超积累植物对重金属的吸收情况可间接地反映超积累植物对土壤中重金属有效性的影响。

我们的研究发现,生长在我国东部古老铅锌矿上的东南景天由于长期生长在富含 Zn、Pb 和 Cd 的土壤和废矿堆上,与非矿山生态型相比,具有很强的忍耐、吸收和富集 Zn 的能力,是一种 Zn、Cd 超积累植物^[4-6]。近年来,国内对东南景天的研究主要集中在其吸收和积累 Zn 的特点^[7-9]、动力学特征^[10]、筛选合适的螯合剂提高其富集 Zn 的能力^[11-13],但对其根系如何活化和吸收土壤 Zn 的机制仍不清楚。为了检验上述假设,本文将超积累和非超积累两种生态型东南景天套种,采用 3 种不同程度的根系互作方式来限制根系的交互作用,即无隔膜(允许根系的完全互作)、400 目尼龙筛布隔开(不允许根系互作,但是允许土壤溶液及根系分泌物的相互扩散)和 PVC 板完全隔开(既没有根系互作,也没有土壤溶液及根系分泌物的相互扩散),探讨不同程度的根系互作对两种生态型东南景天的生长及根系吸收土壤 Zn 的影响,以期在理论上进一步揭示超积累生态型东南景天吸收 Zn 的土壤微生态过程。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物采用超积累生态型和非超积累生态型东南景天。其中超积累生态型东南景天取自浙江衢

州的古老铅锌矿,非超积累生态型取自浙江杭州九溪茶园地^[4],两种生态型均培养在华南农业大学试验网室。移栽前,首先选取大小一致的枝条在育苗板上培育 2 周,待其长出较旺盛的根系后,开始进行盆栽试验。

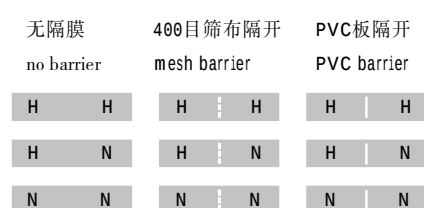
供试土壤取自华南农业大学农场的无污染水稻土。其基本理化性质为:pH(土:水=1:2.5) 6.27,全 N 0.84 g·kg⁻¹,全 P 1.27 g·kg⁻¹,全 K 29.84 g·kg⁻¹,速效 K 101.43 mg·kg⁻¹,碱解 N 49.42 mg·kg⁻¹,全 Zn 72.45 mg·kg⁻¹,全 Cu 24.30 mg·kg⁻¹,全 Cd 0.32 mg·kg⁻¹,全 Pb 81.28 mg·kg⁻¹,H₂O-Zn 0.045 mg·kg⁻¹ 和 NH₄OAc-Zn 0.105 mg·kg⁻¹。土壤自然风干后,过 5 mm 筛,把 65 kg 土壤装入大塑料筐中,添加 81.00 g ZnO(过 100 目),使得土壤中总 Zn 含量约为 1 000 μg·g⁻¹,加入去离子水使土壤保持田间持水量的 60%~70%,进行土壤预培养。选择 ZnO 的原因在于其溶解性较低(冷水中的溶解度为 1.6 mg·L⁻¹)^[14],可作为一种持续 Zn 供应源,且不对非超积累生态型东南景天产生毒害作用^[15]。培养 10 周后,土壤中的 NH₄OAc(pH=7.0)提取态 Zn 含量为 67.26 mg·kg⁻¹,水提取态 Zn 含量为 0.105 mg·kg⁻¹,pH 为 6.51。

1.2 盆栽试验

每种生态型东南景天采用双因素随机区组设计,即 A 因素为种植方式,两个水平,即单种(超积累生态型东南景天或非超积累生态型东南景天分别单种)和套种(超积累与非超积累生态型东南景天套种),B 因素为不同程度的根系互作,即 I:无隔膜处理,允许根系完全交互;II:采用 400 目的尼龙筛布将根系隔开,但允许土壤溶液相互扩散;III:采用 PVC 板将根系完全隔开,既没有根系的交互作用,也没有土壤溶液的相互扩散。共 9 个处理,每个处理重复 4 次,共 36 盆,试验设计见图 1。上述土壤预培养 10 周后,于 2005 年 3 月 8 日将培养好的土壤分装于长方体塑料花盆中(19.5 cm×13.0 cm×10.5 cm)。有隔膜的每盆左右各装土 800 g,无隔膜的每盆装土 1 600 g。用去离子水从盆底部进行灌溉,使土壤保持田间持水量的水平,平衡 7 d。2005 年 3 月 14 日移苗,每盆左右两边各种 4 株。65 d 后收获,分别测定植株地上部分和根系鲜重和干重、地上部分和根系 Zn 含量和土壤中的 NH₄OAc-Zn 含量。

1.3 测定项目与分析方法

收获时,用不锈钢剪刀贴地面剪下地上部,称其鲜重。地上部收获后,立刻将根系从土壤中分离出来,



H:超积累生态型东南景天(hyperaccumulating ecotype)

N:非超积累生态型东南景天(non-hyperaccumulating ecotype)

图 1 试验设计示意图

Figure 1 Illustration of the experimental design

然后用自来水分别冲洗地上部和根系,再用去离子水冲洗 3 遍,于 60 ℃烘干至恒重,记录其干物质量。最后磨细,过 60 目尼龙网筛备用。地上部和根系的干重以每半盆(即 4 株植物)进行计算和统计。

植物样品中 Zn 含量的测定:先称取 0.100 0 g 样品在电炉上碳化,然后在 550 ℃马福炉中干灰化 6 h,再用 1:1HCl 溶解,过滤,定容,最后用原子吸收分光光度法测定^[5]。

土壤 pH 的测定:新鲜土壤自然风干后,磨细,过 1 mm 筛,测定土壤 pH(土:水=1:2.5)^[5]。

土壤中水提取态和 NH₄OAc 提取态 Zn 含量的测定:称取 10 g 过 1 mm 筛的风干土壤,加入 25 mL 去

离子水或 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液(pH=7.0),振荡 2 h,过滤,原子吸收分光光度法测定滤液中的 Zn 含量。

数据统计采用 SAS8.1 软件。

2 结果与讨论

2.1 地上部和根系的生物量

双因素方差分析表明(表 1),对于超积累生态型东南景天,种植方式、根系的互作程度以及它们的交互作用对地上部和根系的干重均无显著性影响($P>0.05$);对于非超积累生态型东南景天,种植方式对其地上部干重没有显著影响($P>0.05$),根系互作程度、种植方式和根系互作程度的交互对地上部干重影响显著($P<0.05$),而且种植方式、根系的互作程度以及它们的交互作用对根系干重的影响达到极显著水平($P<0.001$)。

由表 2 可知,当两种生态型东南景天套种时,将非超积累生态型东南景天 3 种不同程度的根系互作处理之间进行比较发现,其地上部和根系干重均以根系完全隔开(Ⅲ)>筛布隔开(Ⅱ)>不隔开(Ⅰ)。无隔膜处理(Ⅰ)下,非超积累生态型的地上部和根系干重也分别比其单种时减少了 23%和 30%。

表 1 两种生态型东南景天的地上部和根系干重和 Zn 含量的双因素分析

Table 1 Two-way analysis of variance of shoot and root dry matter, shoot and root Zn concentration in two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance

	超积累生态型			非超积累生态型		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
地上部干重						
种植方式	1	0.008 2	0.03	1	0.074 6	0.34
根系互作程度	2	0.056 6	0.22	2	0.808 4	3.72*
种植方式×根系互作程度	1	0.136 0	0.54	1	1.321 5	6.07*
误差	67	0.253 4		67	0.217 5	
根系干重						
种植方式	1	0.000 1	0.04	1	11.710	88.0***
根系互作程度	2	0.000 01	0.01	2	11.575	87.0***
种植方式×根系互作程度	1	0.003 2	2.15	1	8.502 3	63.9***
误差	67	0.001 5		67	0.133 1	
地上部 Zn 含量						
种植方式	1	2 446 901.76	0.57	1	54.561 805	0.85
根系互作程度	2	19 919 797.40	4.65*	2	296.636 98	4.64*
种植方式×根系互作程度	1	16 375 136.60	3.82	1	3.571 727 3	0.06
误差	67	4 285 227.6		67	63.892 877	
根系 Zn 含量						
种植方式	1	41 426.133	0.03		20 991.027 5	0.83
根系互作程度	2	1 456 290.109	1.16		127 196.878 9	5.03**
种植方式×根系互作程度	1	8 190 405.428	6.53*		296 278.065 9	11.72***
误差	67	1 254 397.13			25 286.225	

注:*** $P<0.001$,** $P<0.01$,* $P<0.05$ 。

2.2 地上部和根系 Zn 含量

超积累生态型和非超积累生态型东南景天的地上部的 Zn 平均含量分别为 $(10\ 124 \pm 1\ 717) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(473 \pm 8.34) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者约是后者的 23 倍; 超积累生态型和非超积累生态型东南景天的根系 Zn 含量的平均值分别为 $(4\ 042 \pm 985) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(875 \pm 187) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者约是后者的 4.6 倍(表 3)。超积累生态型的地上部 Zn 含量大于根系, 而非超积累生态型则以根系 Zn 含量大于地上部。

双因素方差分析结果发现(表 1), 种植方式、种植方式与根系互作程度的交互作用两种生态型超积累生态型东南景天地上部 Zn 含量均没有显著影响($P > 0.05$), 但根系互作程度对两种生态型超积累生态型东南景天地上部 Zn 含量的影响均达到显著水平($P < 0.05$)。对于超积累生态型的根系 Zn 含量, 种植方式、根系互作程度对其影响不显著($P > 0.05$), 但两者的交互作用达到显著水平; 对于非超积累生态型的根系 Zn 含量, 根系互作程度、根系互作程度与种植方式的交互作用的影响均达到极显著水平($P < 0.01$, $P < 0.001$), 但种植方式的影响不显著($P > 0.05$)。

当两种生态型东南景天套种时, 非超积累生态型的根系 Zn 含量在 3 种不同程度的根系交互程度处理间的差异显著, 以无隔膜(I) > 筛布隔开(II) > 完全隔开(III)(表 3), 即两种生态型东南景天的根系完全交互作用或用膜隔开时, 非超积累生态型的根系 Zn 含

量显著增加, 其原因可能是超积累生态型东南景天的根系分泌了某些特殊物质, 这些根系分泌物促进土壤中难溶态 Zn 的溶解, 土壤溶液中 Zn 的含量增加, 从而导致了非超积累生态型东南景天的根系 Zn 含量显著增加, 并且对非超积累植物的生长产生抑制作用, 其地上部和根系的生物量降低(表 2)。尽管根系 Zn 含量增加了, 但地上部 Zn 含量并没有显著增加, 这也说明非超积累生态型东南景天向地上部分转移重金属的能力也很低, 且其吸收 Zn 的形态与其在体内运输的形态也不同。

2.3 东南景天对 Zn 富集和转运作用

采用根系 Zn 浓度/土壤 NH_4OAc 提取态 Zn 浓度(R/A)、地上部 Zn 浓度/根系 Zn 浓度(S/R)和地上部 Zn 吸收总量/植株总 Zn 吸收量(T_s/T)3 个指标来比较不同处理对两种生态型东南景天吸收土壤 Zn 和向地上部转运 Zn 能力的影响。由表 4 可知, R/A、S/R 和 T_s/T 均以超积累生态型东南景天远远超过非超积累生态型, 而且超积累生态型东南景天吸收的 Zn 有 98%~99% 运输到地上部, 说明超积累生态型东南景天不仅比非超积累生态型有更强的吸收土壤 Zn 的能力, 而且有非常强的向地上部转运 Zn 的能力。

双因素方差分析发现, 种植方式、根系互作程度、以及它们的交互作用对超积累生态型东南景天的 R/A、S/R 和 T_s/T 均没有显著影响; 然而, 根系互作程度、根系互作程度与种植方式的交互作用对非超积累生

表 2 不同根系互作条件下两种生态型东南景天地上部和根系干重比较($\text{g} \cdot \text{half}^{-1}$)

Table 2 Biomass of shoots and roots of two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance under interplanting conditions($\text{g} \cdot \text{half pot}^{-1}$)

生态型	种植方式	地上部			根系		
		I	II	III	I	II	III
超积累生态型	单种	$2.62 \pm 0.24 \text{ a}$	$2.84 \pm 0.35 \text{ a}$	$2.95 \pm 0.30 \text{ a}$	$0.13 \pm 0.03 \text{ a}$	$0.14 \pm 0.02 \text{ a}$	$0.14 \pm 0.03 \text{ a}$
	套种	$2.80 \pm 0.70 \text{ a}$	$2.82 \pm 0.30 \text{ a}$	$2.66 \pm 0.51 \text{ a}$	$0.12 \pm 0.03 \text{ a}$	$0.13 \pm 0.02 \text{ a}$	$0.12 \pm 0.03 \text{ a}$
非超积累生态型	单种	$2.13 \pm 0.26 \text{ ab}$	$2.30 \pm 0.31 \text{ a}$	$2.39 \pm 0.31 \text{ a}$	$0.10 \pm 0.03 \text{ a}$	$0.09 \pm 0.02 \text{ a}$	$0.10 \pm 0.03 \text{ a}$
	套种	$1.63 \pm 0.21 \text{ b}$	$2.27 \pm 0.29 \text{ a}$	$2.55 \pm 0.49 \text{ a}$	$0.07 \pm 0.01 \text{ b}$	$0.11 \pm 0.02 \text{ a}$	$0.12 \pm 0.02 \text{ a}$

注: I 指无隔膜处理, II 指采用 400 目的尼龙筛布隔开, III 指根系完全隔开, 以下表格中的表述均相同。表中数据为 4 次重复的平均值 $\pm$ 标准差, 同一行相同部位不同字母表示 5% 水平显著差异(LSD 法)。

表 3 两种生态型东南景天地上部和根系 Zn 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Zn concentrations in shoot and root of two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

生态型	种植方式	地上部			根系		
		I	II	III	I	II	III
超积累	单种	$11\ 649 \pm 1\ 317 \text{ a}$	$10\ 086 \pm 1\ 781 \text{ a}$	$9\ 497 \pm 1\ 505 \text{ a}$	$4\ 412 \pm 531 \text{ a}$	$3\ 552 \pm 529 \text{ a}$	$3\ 714 \pm 852 \text{ a}$
	套种	$11\ 725 \pm 1\ 544 \text{ a}$	$9\ 193 \pm 600 \text{ a}$	$9\ 439 \pm 1\ 793 \text{ a}$	$4\ 765 \pm 1\ 357 \text{ a}$	$4\ 439 \pm 605 \text{ a}$	$3\ 964 \pm 265 \text{ a}$
非超积累	单种	$472.9 \pm 2.24 \text{ a}$	$468.5 \pm 2.03 \text{ a}$	$480.6 \pm 4.29 \text{ a}$	$996.0 \pm 131 \text{ a}$	$790.8 \pm 42 \text{ a}$	$755.8 \pm 70 \text{ a}$
	套种	$471.7 \pm 7.64 \text{ a}$	$468.9 \pm 11.8 \text{ a}$	$472.7 \pm 6.14 \text{ a}$	$1\ 109 \pm 148 \text{ a}$	$926.5 \pm 55 \text{ ab}$	$796.3 \pm 8.31 \text{ b}$

注: 表中数据为 4 次重复的平均值 $\pm$ 标准差, 同一行相同部位不同字母表示 5% 水平显著差异(LSD 法)。

态型东南景天的 S/R 和 T_s/T 的影响达到显著或极显著水平,但对 R/A 的影响不显著(结果未列出)。当两种生态型东南景天的根系完全交互作用或采用 400 目尼龙筛布隔开时,非超积累生态型 R/A 显著增加, S/R 显著降低,原因在于其根系吸收土壤 Zn 的量显著增加,但并不影响其向地上部转运 Zn 的能力,根系吸收的 Zn 主要储存在根系(表 4)。

2.4 土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量的变化

土壤加入 ZnO 培养 10 周后, NH_4OAc 提取态 Zn 的含量为 $67.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 当收获两种生态型东南景天后, 土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 的含量均显著降低(表 5), 其原因之一在于植物的吸收带走; 其二, 虽然外源的 ZnO 加入土壤中平衡了 10 周, 各种 Zn 形态之间基本上达到了动态平衡, 但在植物根系和根际微生物的作用下, 打破了土壤中 Zn 原来的平衡, 各种形态 Zn 发生转化, 部分有效态 Zn 重新被土壤中的矿物或有机质结合, 从而导致有效态 Zn 含量降低^[16,17]。从表 5 还可发现, 种植超积累生态型东南景天的土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量低于种植非超积累生态型的土壤 ($P < 0.05$), 这主要在于超积累型生态东南景天具有很强的吸收和积累 Zn 的能力。

双因素分析表明(表 6), 对于种植两种生态型东南景天的土壤, 种植方式、根系互作程度、以及两者的交互作用对土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量均没有显著影响 ($P > 0.05$); 然而, 当两种生态型东南景天的根系完全互作或用膜隔开时, 种植非超积累生态型的土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量比其单种时有所降低,

但差异并不显著。

2.5 土壤 pH 值的变化

土壤中重金属元素的活性取决于许多因素, 如元素的化学性质、土壤 pH、氧化还原电位势和土壤水分的运动等, 其中土壤势原物学土壤 pH 是影响土壤中 Zn 的可溶性的一个重要的参数^[18]。一般情况下, 土壤 pH 升高会增加土壤颗粒对 Zn 的吸附, 因而降低了 Zn 的可利用性^[19]。本研究发现, 对于超积累生态型, 根系互作程度对土壤 pH 有显著影响 ($P < 0.01$), 而种植方式、种植方式与根系互作程度的交互作用对土壤 pH 均没有显著影响 ($P > 0.05$); 然而, 种植方式、根系互作程度以及两者的交互作用对种植非超积累生态型的土壤 pH 均没有显著影响 ($P > 0.05$)(表 6)。收获植物后, 不同处理的土壤的 pH 都是在 6.5~6.6 之间(表 7), 与种植植物前(6.51)相比没有明显变化。其原因之一可能是试验土壤样品不是真正的根际土壤, 这种简单的方法难以准确测定东南景天对土壤 pH 的影响, 要想真正探明其影响方式, 还必须采用更有效的研究方法; 其原因之二可能是土壤酸化并不是超积累生态型东南景天活化和吸收土壤 Zn 的有效机制。如 Bernal 等^[18,19]溶液培养试验发现, pH 值影响 Ni 超积累植物 *Alyssum murale* 根系释放质子和植株的生长, 当 pH 值由 7.0 降到 6.0, 经 *A. murale* 根系释放质子减少, 而萝卜(*Raphanus sativus*)根系释放质子直到 pH 值降到 5.5 才减少; 但两者根系分泌的质子数量差异很小, 不足以证明根际 pH 值降低是 *R. sativus* 溶解重金属的机制。对 *T. caerulescens* 根际 pH 的研究也得

表 4 不同根系互作条件下两种生态型东南景天吸收和转运土壤 Zn 转运能力的比较

Table 4 Zn uptake and translocation of two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance under interplanting condition

生态型	种植方式	I			II			III		
		R/A	S/R	T_s/T	R/A	S/R	T_s/T	R/A	S/R	T_s/T
超积累	单种	90.9±19.4	2.75±0.68	0.98±0.01	73.6±14.7	2.83±0.30	0.98±0.00	77.2±22.5	2.77±1.00	0.98±0.01
	套种	101±30.7	2.27±0.41	0.98±0.01	93.3±12.7	2.06±0.19	0.98±0.01	83.2±22.3	2.23±0.30	0.98±0.01
非超积累	单种	19.5±2.87	0.48±0.08	0.90±0.02	15.9±3.4	0.62±0.15	0.94±0.01	14.9±2.24	0.65±0.09	0.94±0.03
	套种	22.4±5.41	0.44±0.09	0.91±0.03	19.8±1.81	0.51±0.03	0.92±0.01	15.61±1.36	0.59±0.01	0.93±0.02

注: R/A; 根系 Zn 浓度/ NH_4OAc 提取态 Zn 浓度; S/R; 地上部 Zn 浓度/根系 Zn 浓度; T_s/T ; 地上部 Zn 吸收总量/植株总 Zn 吸收量

表 5 收获植物后土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 NH_4OAc extractable Zn concentration in soil after harvesting plants ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

生态型	种植方式	I	II	III
超积累	单种	48.51±1.35 a	48.79±3.87 a	48.14±1.81 a
	套种	47.57±2.28 a	47.70±1.90 a	47.65±3.08 a
非超积累	单种	51.04±1.52 a	50.11±1.72 a	51.97±1.29 a
	套种	49.73±1.32 a	49.12±2.13 a	53.22±0.68 a

注: 表中数据为 4 次重复的平均值±标准差, 同一行的数据不同字母表示 5% 水平显著差异 (LSD 法)。

表 6 收获植物后土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量和 pH 的双因素分析Table 6 Two-way analysis of variance of NH_4OAc extractable Zn concentration and pH in soils after harvesting plants

	超积累生态型			非超积累生态型		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
NH_4OAc 提取态 Zn 含量						
种植方式	1	0.864 300 60	0.15	1	0.324 2	0.04
根系互作程度	2	1.081 459 03	0.18	2	18.245	2.06
种植方式×根系互作程度	1	3.922 314 88	0.66	1	0.129 6	0.01
误差	67	5.948 144 6		67	8.850 5	
土壤 pH						
种植方式	1	0.015 238 10	2.66	1	0.003 809 52	0.62
根系互作程度	2	0.031 896 83	5.57**	2	0.014 404 76	2.33
种植方式×根系互作程度	1	0.015 238 10	2.66	1	0.011 009 52	1.78
误差	67			67	0.006 175 12	

注:*** $P<0.001$, ** $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

表 7 收获植物后土壤 pH 的变化

Table 7 Soil pH change after harvesting plants

处理		I	II	III
超积累生态型	单种	6.53±0.06 a	6.63 ±0.13 ab	6.49±0.04 b
	套种	6.59±0.08 a	6.52±0.07 ab	6.47±0.04 b
非超积累生态型	单种	6.64±0.09 a	6.58±0.08 ab	6.53±0.09 b
	套种	6.60±0.13 a	6.59±0.07 a	6.56±0.10 a

注:表中数据为 4 次重复的平均值±标准差,同一行的数据采用 LSD 进行多重比较,相同字母代表在 5% 水平没有显著差异。

出类似的结论^[3,20]。

3 结论

(1)当两种生态型东南景天套种时,不同程度根系互作对非超积累生态型东南景天的地上部和根系的生物量、根系 Zn 含量有显著影响。当用 400 目尼龙筛布隔开两种生态型东南景天的根系时,非超积累生态型的根系 Zn 含量显著增加,其地上部和根系生物量显著减少。这间接表明超积累生态型东南景天根系能够活化土壤中的难溶态 Zn。

(2)种植两种生态型东南景天后,土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 的含量均比种植前显著降低,以种植超积累生态型的土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量低于种植非超积累生态型。但不同的种植方式和根系互作程度对土壤中 NH_4OAc 提取态 Zn 含量没有显著影响。

(3)种植两种生态型东南景天后,土壤 pH 变化均甚微,说明根际土壤的酸化并不是东南景天超积累 Zn 的主导机制。

参考文献:

[1] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccu-

mulate metallic elements [J]. *Biorecovery*, 1989, 1:81-97.

[2] Knight B, Zhao F J, McGrath S P, et al. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution [J]. *Plant and Soil*, 1994, 197:71-78.

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

[4] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟.古老铅锌矿山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,2001,25(6):665-672.

[5] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等.东南景天(*Sedum alfredii* H)——一种新的锌超积累植物[J].科学通报,2002,47(13):1003-1007.

[6] Yang X E, Long X X, Ye Z Q, et al. Cadmium uptake and accumulation in the zinc-hyperaccumulating species *Sedum alfredii* Hance [J]. *Plant and Soil*, 2004, 259:181-189.

[7] 龙新宪,倪吾钟,叶正钱,等.超积累生态型东南景天吸收锌的特征[J].生态学报,2006,26:334-340.

[8] 龙新宪,麦少芝,林初夏.锌在两种生态型东南景天体内分布特点和对亚显微结构的影响[J].应用与环境生物学报,2005,11:536-541.

[9] 熊愈辉,杨肖娥,叶正钱,等.两种生态型东南景天锌吸收与分布特性的研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(6):614-620.

[10] Li T Q, Yang X E, He Z L. Root morphology and Zn^{2+} uptake kinetics characteristics of Zn hyperaccumulator species of *Sedum alfredii* Hance [J]. *International of Integrative plant biology*, 2005, 47 (8): 927-934.

- [11] 龙新宪,倪吾钟,叶正钱,等. 外源有机酸对两种生态型东南景天吸收和积累锌的影响[J].植物营养与肥科学报,2002, 4:467-470.
- [12] 邓金川,吴启堂,龙新宪,等. 几种有机添加剂对遏蓝菜和东南景天吸收提取 Zn 的效应[J].生态学报,2005,25(10):2562-2568.
- [13] 龙新宪,倪吾钟,叶正钱,等. 有机物料对东南景天提取土壤中锌的影响[J]. 广东微量元素科学, 2004,11:22-27.
- [14] Meerts P, Duchène P H, Gruber W, et al. Metal accumulation and competitive ability in metalicolous and non - metalicolous *Thlaspi caerulescens* fed with different Zn salts[J]. *Plant and Soil*, 2003,249:1-8.
- [15] Long X X, Wang Y H, Wei Z B, et al. Zinc uptake by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance from soils fed with zinc salts of different solubility[J]. *Natural Science Research*, 2006, 6:131-140.
- [16] 张会民,吕家珑,徐明岗,等.土壤性质对锌吸附影响的研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,36(5):114-118.
- [17] Hinsinger P. Bioavailability of trace elements as related to root-induced chemical change in the rhizosphere. In: Trace elements in the rhizosphere (Gobran G R et al eds) (M). CRC Press, 2001.25-42.
- [18] Bernal M P, McGrath S P. Effects of pH and heavy metal concentration in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* [J].*Plant and Soil*,1994, 166:83-92.
- [19]Bernal M P, McGrath S P, Miller A J, et al. Comparisons of the chemical changes in the rhizosphere of the nicker hyperaccumulator *Alyssum murale* with the non -accumulator *Raphanus sativus*[J]. *Plant and Soil*, 1994,164:251-259.
- [20]Luo Y M, Christie P, Baker A J M. Soil solution Zn and pH dynamics in non -rhizosphere soil and in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* grown in a Zn/Cd contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 161-164.