

两种生态型东南景天套种对其生长和吸收土壤中 Zn 的影响

王艳红, 龙新宪, 刘洪彦, 吴启堂

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要: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),将超积累和非超积累2种生态型东南景天套种,探讨不同程度根系互作对2种生态型东南景天的生长和吸收Zn的影响。结果发现,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生物量、根系生物量以及根系Zn浓度有显著影响。当2种生态型东南景天共享1个根际土壤(无隔膜处理)时,非超积累生态型东南景天的地上部生物量显著增加,比根系完全隔开处理增加了25%左右;与另外2种根系互作处理相比,当与超积累生态型的根系采用400目尼龙筛布隔开时,非超积累生态型东南景天的根系锌含量和土壤中 NH_4COOH 提取态Zn含量显著增加,其地上部和根系生物量也显著降低。

关键词:东南景天; Zn; 套种

中图分类号:Q945.78;Q949.751.1

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2007)03-0006-05

Effects of Intercropping of Two Ecotypes of *Sedum alfredii* on Their Plant Growth and Zinc Uptake from Soils

WANG Yan-hong, LONG Xin-xian, LIU Hong-yan, WU Qi-tang

(College of Resources and Environment, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

Abstract: The non-hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance was intercropped with the Zn-hyperaccumulating ecotype to study the effect of different root interaction on their plant growth and Zn uptake by using different barrier separation, no barriers, mesh barriers, and PVC barriers. The results showed that significant differences were observed on the shoot and root biomass, and root Zn concentration in the non-hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* with different extent of rhizosphere interaction. The shoots mass of the non-hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* significantly increased by about 25% compared with the PVC treatment. Compared with the other two treatments, root Zn concentration in the non-hyperaccumulating ecotype and soil NH_4COOH extractable Zn concentration increased significantly when the roots of two hyperaccumulating ecotype were divided by mesh barrier, but shoot and root biomass of the non-hyperaccumulating ecotype decreased significantly.

Key words: *Sedum alfredii*; Zn; intercropping

东南景天 *Sedum alfredii* Hance 对土壤中高含量的 Zn 有很强的忍耐、吸收和积累能力,当生长在尾矿土壤上,其地上部 Zn 含量可高达为 4 134 ~ 5 000 mg/kg^[1]。目前国内研究主要集中在东南景天吸收和积累重金属的特点^[2-3],但对其吸收、积累和

忍耐的机制及其根系如何活化和吸收土壤 Zn 的机制仍不清楚,尤其是有关其根际特征的研究还鲜见报道。本试验通过将超积累和非超积累2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(即无隔膜、400目尼龙筛布隔开和PVC板完全隔

收稿日期:2006-07-12

作者简介:王艳红(1975—),女,硕士研究生;通讯作者:龙新宪(1975—),女,副教授,博士,E-mail:longxx@scau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(20407008)

开),探讨不同程度的根系互作对2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的土壤微生物过程。

1 材料与方法

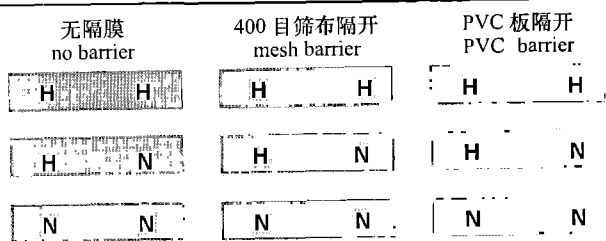
1.1 材料

供试植物:超积累生态型和非超积累生态型东南景天,分别来自浙江衢州的古老铅锌矿和浙江杭州九溪茶园地^[2],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:取自广东省乐昌县常年受铅锌矿排放的废水污染的水稻土,其基本理化性质为:pH(1 g土+2.5 mL水)7.39、有机质 22.84 g/kg、全N 2.47 g/kg、全P 7.53 g/kg、全Zn 932.73 mg/kg、水提取态Zn 0.08 mg/kg、全Cu 53.01 mg/kg、全Cd 1.71 mg/kg、全Pb 1 317 mg/kg。土壤自然风干后,过5 mm筛,将土壤分装于19.5 cm×13.0 cm×10.5 cm的长方体塑料花盆中。

1.2 盆栽试验

本试验采用双因素三水平完全随机区组设计:A因素为种植方式,即超积累生态型东南景天单种、非超积累生态型东南景天单种和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(图1)。无隔膜的每盆装土1 600 g,中间有隔膜的每盆左右各装土800 g。用去离子水从盆底部进行灌溉,使土壤保持田间持水量(w)60%~70%,平衡14 d。于2004年11月21日移苗,每盆左右两边各种4株。在试验过程中不施加任何肥料,90 d后收获,分别测定植株地上部和根系鲜、干质量及Zn浓度,并对收获后的土壤中的Zn



H:超积累生态型东南景天 hyperaccumulating ecotype *S. alfredii*,
N:非超积累生态型东南景天 non-hyperaccumulating ecotype *S. alfredii*

图1 试验设计示意图

Fig.1 Illustration of the experimental design

进行形态分级。

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,称其鲜质量。地上部收获后,立刻将根系从土壤中分离出来,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,60℃烘干至恒质量,记录其干物质量;最后磨细、过60目尼龙网筛备用。

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,再用体积比1:1的HCl溶解,过滤,定容,然后用原子吸收分光光度法测定^[4]。

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(1 g土+2.5 mL水)^[4]。

土壤中水提取态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,振荡2 h,过滤,滤液用原子吸收分光光度法测定。

土壤中NH₄COOH提取态Zn的测定:收获植物后,称取代表性新鲜土壤5 g,加入25 mL pH7.0的1.0 mol·L⁻¹NH₄COOH溶液,振荡2 h,过滤,滤液中Zn含量用原子吸收分光光度法测定。同时取土样测定含水量,土壤中NH₄COOH提取态Zn含量以干土计。数据统计采用SAS8.1软件。

2 结果与分析

2.1 套种对2种生态型东南景天生长的影响

由表1可知,当非超积累生态型东南景天单种时,不同程度的根系互作对其地上部和根系干质量

表1 两种生态型东南景天地上部和根系干质量¹⁾

Tab.1 Dry matter yields of shoots and roots of two ecotypes of *Sedum alfredii* $n=4, g \cdot \text{盆}^{-1}$

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	地上部 shoot			根系 root		
		I	II	III	I	II	III
超积累 hyper	单种	3.69 ± 0.38a	2.85 ± 0.32b	2.78 ± 0.17b	0.55 ± 0.08a	0.51 ± 0.07ab	0.46 ± 0.03b
	套种	3.52 ± 0.52a	2.69 ± 0.42a	3.08 ± 0.45a	0.61 ± 0.12a	0.50 ± 0.09a	0.52 ± 0.09a
非超积累 non-hyper	单种	4.10 ± 0.65a	3.90 ± 0.27a	3.50 ± 0.57a	0.70 ± 0.11a	0.65 ± 0.13a	0.64 ± 0.09a
	套种	4.60 ± 0.57a	2.41 ± 0.51b	3.41 ± 0.63b	0.64 ± 0.07ab	0.49 ± 0.16b	0.71 ± 0.12a

1) I:无隔膜,II:400目尼龙筛布隔开,III:根系完全隔开;相同部位同行数据后字母不同示5%水平显著差异(LSD法)

没有显著影响。然而,当2种生态型套种时,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干质量均有显著影响($P < 0.05$,其中地上部干质量以 $I > III > II$,根系干质量以 $III > I > II$ 。无论是单种还是套种,不同程度的根系互作对超积累生态型东南景天地上部和根系的干质量没有显著影响。

2.2 套种对2种生态型东南景天 Zn 含量的影响

由表2可知,超积累生态型东南景天地上部和根系 Zn 含量均比非超积累的高,超积累生态型东南景天地上部和根系 $w(Zn)$ 分别为 $(2\,441 \pm 427)$ 和 $(1\,919 \pm 330) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而非超积累生态型的地上部和根系 $w(Zn)$ 分别为 (146.4 ± 17.8) 和 $(447.4 \pm 198.1) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,前者地上部和根系 Zn 含量分别约

是后者的20和4倍。

双因素方差分析结果表明,不同的种植方式(单种或套种)、根系互作程度以及两者的交互作用对2种生态型东南景天地上部 Zn 含量均没有显著性影响($P > 0.05$)。

根系交互作用的程度、种植方式以及两者的交互作用对超积累生态型东南景天根系 Zn 含量均无显著影响($P > 0.05$)。然而,不同程度的根系交互作用对非超积累生态型根系 Zn 含量有显著影响($P < 0.05$),当2种生态型套种时,非超积累生态型的根系 Zn 含量以 $II > III > I$ (表2),如采用400目尼龙筛布隔开2种生态型东南景天的根系时(II),非超积累生态型根系 Zn 含量比根系完全隔开处理(III)增加了约20%,比单种(II)也增加了约20%。

表2 两种生态型东南景天地上部和根系 Zn 含量¹⁾

Tab. 2 Zn concentration of shoot and roots in two ecotypes e of *Sedum alfredii* $n=4$, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	地上部 shoot			根系 root		
		I	II	III	I	II	III
超积累	单种	2 655 ± 301a	2 394 ± 195a	2 462 ± 291a	2 069 ± 252a	1 854 ± 247a	2 048 ± 306a
hyper	套种	2 692 ± 394a	2 399 ± 379a	2 431 ± 428a	1 669 ± 256a	1 803 ± 249a	1 852 ± 179a
非超积累	单种	143.2 ± 14.3a	145.9 ± 8.2a	147.6 ± 17.8a	354.4 ± 44.7a	402.2a	416.6 ± 24.8a
non-hyper	套种	158.9 ± 9.7a	143.5 ± 6.9a	142.2 ± 21.8a	361.7 ± 48.6b	502.0 ± 26.9a	401.7 ± 35.7b

1) I:无隔膜,II:400目尼龙筛布隔开,III:根系完全隔开;相同部位同行数据后字母不同示5%水平显著差异(LSD法)

2.3 套种对2种生态型东南景天 Zn 积累量的影响

以地上部和根系干质量分别乘以其对应处理的体内 Zn 含量,可以计算出不同处理对2种生态型东南景天 Zn 积累量的影响。方差分析表明,根系互作程度对2种生态型东南景天地上部 Zn 积累量影响显著($P < 0.05$),而对根系锌积累则没有显著影响($P >$

0.05)。当2种生态型东南景天的根系完全互作时,虽然超积累生态型的地上部干质量和 Zn 含量没有显著增加,但其地上部 Zn 积累量却显著高于其他两个处理(表3);尤其当2种生态型东南景天共享同一个根际土壤时,非超积累生态型东南景天的地上部干质量显著增加,因而其地上部 Zn 积累量也显著增加。

表3 两种生态型东南景天地上部和根系 Zn 积累量¹⁾

Tab. 3 Zn accumulation of shoot and root in two ecotypes e of *Sedum alfredii*

$n=4$, $\text{mg} \cdot \text{盆}^{-1}$

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	地上部 shoot			根系 root		
		I	II	III	I	II	III
超积累	单种	9.76 ± 2.07a	6.46 ± 1.46b	6.29 ± 1.72b	1.13 ± 0.25a	0.93 ± 0.28a	0.91 ± 0.15a
hyper	套种	9.20 ± 1.83a	6.42 ± 1.08b	7.48 ± 1.68ab	1.05 ± 0.20a	0.93 ± 0.28a	0.97 ± 0.22a
非超积累	单种	0.65 ± 0.13a	0.42 ± 0.07b	0.51 ± 0.12ab	0.25 ± 0.09a	0.34 ± 0.11a	0.25 ± 0.10a
non-hyper	套种	0.72 ± 0.12a	0.35 ± 0.08b	0.48 ± 0.08b	0.22 ± 0.06a	0.23 ± 0.10a	0.29 ± 0.13a

1) I:无隔膜,II:400目尼龙筛布隔开,III:根系完全隔开;相同部位同行数据后字母不同示5%水平显著差异(LSD法)

2.4 套种对2种生态型东南景天富集和转运 Zn 的影响

采用根系 Zn 含量/土壤 NH_4COOH 提取态 Zn 含量(R/A)、地上部 Zn 含量/根系 Zn 含量(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2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85%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。

当与超积累生态型东南景天套种时,不同程度根系互作显著影响非超积累生态型东南景天的 R/A 、

S/R 和 T_s/T , 以 II 的 R/A 最高, 而 S/R 和 T_s/T 最低 (表 4)。这也进一步说明, 当采用 400 目尼龙筛布隔开 2 种生态型东南景天的根系时, 非超积累生态型根系吸收土壤 Zn 的能力显著增加, 但并不影响其向地上部转运 Zn 的能力, 其吸收的 Zn 主要储存在根系。同样, 不同的种植方式、不同程度的根系互作、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 没有影响 (表 4)。

表 4 不同处理对 2 种生态型东南景天吸收和转运土壤 Zn 能力的影响¹⁾
Tab. 4 Effects of different treatments on Zn uptake and translocation in two ecotypes of *Sedum alfredii*

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	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	603	1.38	0.89	494	1.30	0.87	546	1.18	0.87
hyper	套种	460	1.48	0.90	406	1.33	0.87	501	1.29	0.88
非超积累	单种	89	0.40	0.70	98	0.44	0.53	105	0.39	0.67
non-hyper	套种	98	0.44	0.76	121	0.29	0.61	99	0.35	0.64

1) I: 无隔膜, II: 400 目尼龙筛布隔开, III: 根系完全隔开; R/A : 根系 Zn 含量/ NH_4COOH 提取态 Zn 含量; S/R : 地上部 Zn 含量/根系 Zn 含量; T_s/T : 地上部 Zn 吸收总量/植株总 Zn 吸收量

2.5 土壤 pH 的变化

双因素方差分析结果表明, 不同的培养方式 (单种或套种)、根系互作程度以及两者的交互作用对土壤 pH 均没有显著影响 ($P > 0.05$)。收获植物后, 不同处理的土壤 pH 都是在 7.3 ~ 7.5 之间 (表 5), 与种植植物前 (7.39) 相比没有明显变化。

2.6 土壤中有效态 Zn 含量的变化

收获植物后, 进一步测定了土壤中的 NH_4COOH

提取态 Zn 含量, 结果 (表 6) 发现, 不同的种植方式、不同程度的根系互作对种植超积累生态型东南景天的土壤中的交换态 Zn 含量没有显著影响 ($P > 0.05$); 然而, 当 2 种生态型套种时, 种植非超积累生态型的土壤中 NH_4COOH 提取态 Zn 含量以 II > III > I, 即当 2 种生态型东南景天的根系完全互作时, 土壤中 NH_4COOH 提取态 Zn 含量显著降低 (表 6)。

表 5 收获植物后土壤 pH 的变化¹⁾
Tab. 5 Soil pH change after harvesting plants

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	n = 4		
		I	II	III
超积累 hyper	单种	7.43 ± 0.13a	7.38 ± 0.09a	7.37 ± 0.09a
	套种	7.33 ± 0.03a	7.43 ± 0.11a	7.41 ± 0.04a
非超积累 non-hyper	单种	7.33 ± 0.04a	7.37 ± 0.09a	7.32 ± 0.10a
	套种	7.33 ± 0.07a	7.33 ± 0.10a	7.37 ± 0.11a

1) I: 无隔膜, II: 400 目的尼龙筛布隔开, III: 根系完全隔开; 同行数据后不同字母表示 5% 水平显著差异 (LSD 法)

表 6 收获植物后新鲜土壤中 NH_4COOH 提取态 Zn 含量¹⁾
Tab. 6 NH_4COOH extractable Zn in fresh soils after harvesting plants

生态型 ecotype	种植方式 type of cropping	n = 4, mg · kg ⁻¹		
		I	II	III
超积累 hyper	单种	3.43 ± 0.42a	3.75 ± 0.40a	3.75 ± 0.21a
	套种	3.63 ± 0.36a	3.98 ± 0.38a	3.7 ± 0.18a
非超积累 non-hyper	单种	3.97 ± 0.25a	4.19 ± 0.26a	3.98 ± 0.34a
	套种	3.69 ± 0.37b	4.15 ± 0.09a	4.05 ± 0.26ab

1) I: 无隔膜, II: 400 目尼龙筛布隔开, III: 根系完全隔开; 同行数据后字母不同示 5% 水平显著差异 (LSD 法)

3 讨论

3.1 超积累生态型东南景天能快速地耗竭土壤中有效态 Zn 库

超积累植物具有超常的吸收、转运和积累重金

属的能力, 那么, 如果超积累植物能迅速耗竭土壤中的有效 Zn 含量, 这将促进与其共享同一个根际土壤的非金属耐性植物的生长。如 Whiting 等^[5] 的研究发现, 当超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 与非超积累植物 *Thlaspi arvense* 套种在 ZnO 污染土壤上, 且两者

的根系完全互作时, *Thlaspi arvense* 地上部的生物量增加了30%。本研究也发现, 当2种生态型东南景天的根系共享同一个根际土壤时(即无隔膜处理), 非超积累生态型地上部的生长明显受到促进, 其地上部干质量显著高于其他2种根系互作处理, 根系的干质量也显著高于400目筛布隔开处理。其原因可能在于超积累生态型东南景天有很强的吸收和向地上部转运Zn的能力, 当其与非超积累生态型东南景天共享土壤中同一个Zn库时, 土壤中的植物有效态Zn迅速地耗竭, 减缓了土壤Zn对植物的胁迫作用, 从而促进非超积累生态型东南景天的生长。

3.2 超积累生态型东南景天能活化土壤中难利用态Zn

研究者认为, 超积累植物具有很强地活化土壤中难利用态重金属的能力, 这可能是其超积累重金属的机制之一^[6-8]。例如, 在添加不同Zn化合物污染的土壤上种植 *Thlaspi caerulescens* 后, 发现在没有添加污染物的土壤中硝酸铵提取态Zn的减少量仅占2种 *Thlaspi caerulescens* 体内Zn总积累量的24%和50%, 即这2种植物体内积累的76%和50%的Zn来自于土壤中的不溶态Zn^[9], 而且在添加100 mg/kg Zn S土壤上, 土壤中硝酸铵提取态Zn仅是 *Thlaspi caerulescens* 体内积累Zn总积累量的33%, 说明有67%的Zn来自于土壤中的不溶态Zn^[10]。Knight等^[11]报道, 土壤中水溶态Zn的减少量占 *Thlaspi caerulescens* 体内总积累量的1%, 即 *Thlaspi caerulescens* 吸收和积累的Zn 99%来自土壤中非可溶性部分。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, 当其与非超积累植物共享同一个根际环境时, 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来间接地反映超积累植物对土壤中重金属的有效性的影响。本研究发现, 当2种生态型东南景天的根系采用400目尼龙筛布隔开时, 种植非超积累生态型东南景天的土壤中NH₄COOH提取态Zn含量显著增加, 非超积累生态型东南景天根系Zn含量也显著增加, 是根系完全隔开处理下根系Zn浓度的1.4倍。其原因可能在于超积累生态型的根系分泌了某些特殊物质, 这些物质透过400目尼龙筛布, 从而促进非超积累生态型根际土壤中难溶态Zn的溶解, 土壤中有效态Zn的含量增加, 从而促进了非超积累生态型的根系Zn含

量的增加, 这也间接表明超积累生态型东南景天能活化土壤中难溶态Zn。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 不同生态型的东南景天植物对锌的耐性和积累特性的差异研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 665-672.
- [3] 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: 生命科学版, 2003, 29(6): 614-620.
- [4] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [5] WHITING S N, LEAKE J R, McGRATH S P, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of cocropped *Thlaspi arvense* [J]. Environ Sci Technol, 2001, 35: 3237-3241.
- [6] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15.
- [7] 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.
- [8] McGRATH S P, SHEN Z G, ZHAO F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils [J]. Plant and Soil, 1997(188): 153-159.
- [9] WHITING S N, LEAKE J R, McGRATH S P, et al. Zinc accumulation by *Thlaspi caerulescens* from soils with different Zn availability: A pot study [J]. Plant and Soil, 2001(236): 11-18.
- [10] WHITING S N, LEAKE J R, McGRATH S P, et al. Assessment of Zn mobilization in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* by bioassay with nonaccumulator plants and soil extraction [J]. Plant and Soil, 2001(237): 147-156.
- [11] KNIGHT B, ZHAO F J, McGRATH S P, et al. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution [J]. Plant and Soil, 1997(197): 71-78.

【责任编辑 周志红】