

# 土壤铜锌复合污染条件下两种青菜的响应差异

薛 艳<sup>1,2</sup> 周东美<sup>1\*</sup> 沈振国<sup>2</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008;

2 南京农业大学生命科学院植物科学系 南京 210095)

**摘 要** 用土培试验研究了青菜的两个品种火青菜(Cu 耐性品种)和四月慢(Cu 敏感性品种)在重金属 CuZn 胁迫下的响应差异。结果表明:不论是单 Cu、单 Zn 处理还是 CuZn 复合处理,两个青菜品种的生物量、含水量和重金属含量均因所处理重金属浓度和品种的不同而表现出差异;对地上部含糖量的分析发现,Cu 耐性品种火青菜积累可溶性糖的能力显著大于 Cu 敏感性品种四月慢积累可溶性糖的能力。CuZn 复合处理较单一处理均增加两种青菜根中 CuZn 的积累,但对于地上部来说,CuZn 处理浓度不同,青菜品种不同,其影响存在差异。

**关键词** 铜; 锌; 生物量; 青菜; 糖

**中图分类号** S153

近年来随着重金属矿山的大量开采、农药化肥的使用、汽车尾气和生活污水的超标排放及污泥的不合理堆置和农用等导致了土壤重金属含量的增加<sup>[1]</sup>。土壤一旦被重金属污染以后不仅对植物生长发育产生直接影响<sup>[2,3]</sup>,而且其在植物根、茎、叶及籽粒中的大量积累,还会严重地影响农产品的品质,并且会通过食物链危及人类的健康<sup>[4]</sup>。

蔬菜是人们日常生活中不可或缺的重要副食品,它为人类提供丰富而廉价的多种维生素、纤维素和矿物质,在食物的结构中占有重要地位<sup>[5]</sup>。国外的最新研究结果认为芸苔属植物有重金属吸收和积累基因<sup>[6-8]</sup>,国内的研究也表明一些芸苔属植物如芥菜、小白菜和油菜等具有较高的吸收和积累重金属能力<sup>[9]</sup>,所以在这些植株表现出重金属毒害之前,其体内的重金属含量可能已超过食用安全标准。由于蔬菜植物多被人们直接食用,其体内重金属的超标将对人们的健康造成极大的危害。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

两个青菜(*Brassica chinensis*)品种:四月慢(Siyueman)和火青菜(Huoqingcai)。

供试土壤为黄棕壤,采自南京农业大学园艺学院菜园试验基地 0~20 cm 表土,其 Cu 的总量为 35.29 mg/kg,有效态 Cu 含量为 7.65 mg/kg。Zn 的总量为 89.71 mg/kg,有效态 Zn 含量为 31.2 mg/kg,其他土壤基本理化性质如表 1 所示。

### 1.2 试验设计

分别取风干土 1.5 kg(过 3 mm 筛)置于直径 150 mm,高 120 mm 的塑料盆里。试验土壤重金属浓度设计如下:①单 Cu 处理:Cu<sup>2+</sup>浓度为 0、25、50 和 100 mg/kg(以添加量计),分别记作 CK, Cu25, Cu50 和 Cu100;②单 Zn 处理:Zn<sup>2+</sup>浓度为 0、25、50 和 100 mg/kg(以添加量计),分别记作 CK, Zn25,

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of the tested soil

pH	有机质 (g/kg)	CEC (cmol/kg)	全 N (g/kg)	全 K (g/kg)	速效 K (mg/kg)	全 P (g/kg)	速效 P (mg/kg)
5.1	18.26	17.19	1.53	45.5	86.5	1.21	22.55

①国家重点基础发展规划项目(2002CB410808)资助。

\* 通讯作者

Zn50 和 Zn100； CuZn 交互处理：Cu 0 + Zn 0、Cu 25 mg/kg + Zn 25 mg/kg、Cu 50 mg/kg + Zn 50 mg/kg（以添加量计），分别记作 CK, Cu25Zn25 和 Cu50Zn50。

每个处理重复 6 次且分成两组，Cu、Zn 分别以 CuSO<sub>4</sub> 溶液和 ZnSO<sub>4</sub> 溶液形式加入，调节土壤含水量至最大持水量的 60%，并将其置于温室内平衡 15 天。然后每组分别播种火青菜和四月慢，使其生长 50 天后收割，分离根系与地上部，用自来水冲洗干净后再用去离子水冲洗两遍，称植株地上部鲜重，然后在 70 °C 恒温下烘至恒重，测地上部干重及地上部和根系重金属含量。

### 1.3 分析测定方法

烘干的植物样品用不锈钢磨样机磨碎，用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 混合液消煮<sup>[10]</sup>，Hitachi 180-80 火焰原子吸收分光光度计 (AAS) 测定重金属元素的含量。

土壤 pH 值的测定参照文献<sup>[10]</sup>的方法，分别称取通过 2 mm 筛的风干土样 5 g，加入 12.5 ml 水（1 : 2.5 的水土比），充分混合，用 pH 玻璃电极进行测定。

土壤养分的测定采用常规土壤分析方法<sup>[10]</sup>。其中，土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的测定采用靛酚蓝比色法；有效 P 用碳酸氢钠法，全 P 用氢氟酸-高氯酸消煮法；速效 K 采用乙酸铵提取法，全 K 用氢氟酸-高氯酸消煮法。

青菜地上部糖含量的测定：参照文献<sup>[11]</sup>的方法：取新鲜植物叶片，擦净表面污物，剪碎混匀，称取 0.10 g 左右，重复 3 次，分别放入 3 只刻度试管中，加入 10 ml 蒸馏水，塑料薄膜封口，于沸水中提取 30 min（提取 2 次），提取液过滤入 25 ml

容量瓶中，反复漂洗试管及残渣，定容至刻度。吸取样品提取液 0.5 ml 于 20 ml 刻度试管中（重复 3 次），加入蒸馏水 1.5 ml，然后依次加入 0.5 ml 蒽酮乙酸乙酯和 5 ml 浓硫酸，充分振荡，立即将试管放入沸水浴中，逐管准确保温 1 min，取出后自然冷却至室温，以空白（不加提取液）作参比，测 OD<sub>630</sub> 值。

### 1.4 数据分析

数据采用 SPSS 软件 Duncan 方法进行分析，同一列中不同字母表示它们之间存在显著性差异， $p < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 CuZn 交互处理对青菜生物量和含水量的影响

早期研究表明，青菜品种火青菜和四月慢分别为 Cu 的耐性和敏感性品种<sup>[12]</sup>。表 2 显示了 CuZn 交互处理对青菜的生物量和含水量的影响。由表 2 可见：在 CuZn 交互处理时，火青菜和四月慢的响应存在差异。在所有火青菜处理中，除 Cu100 处理的生物量与其他处理的生物量相比显著降低外，其他处理火青菜的生物量没有显著变化；含水量除了 Zn100 与对照差异显著外，其他处理的含水量变化都不显著。

四月慢的生物量在 Cu100 时与其他处理相比显著降低，在 Zn100 处理时与 Cu50Zn50 相比也有所降低；含水量为 Zn100 和 Cu100 的处理都与对照差异显著；与 Cu100 处理相比，在 Cu50Zn50 处理时，青菜的生物量与对照无显著差异。由此说明，Zn 较 Cu 对植物的毒性相对较小，同时，CuZn 复合污染并未加剧其对青菜生物量的影响。

表 2 CuZn 交互处理对青菜生物量和含水量的影响

Table 2 Effect of Cu and Zn interaction on water content and dry weight of *B. chinensis*

处理	火青菜		四月慢	
	植株干重 (g)	含水量 (%)	植株干重 (g)	含水量 (%)
CK	3.63±0.70b	90.9±0.04a	3.37±0.95bc	89.7±3.03a
Cu25	3.40±0.21b	91.9±0.59ab	3.37±0.13bc	89.2±2.07a
Cu50	3.48±0.38b	92.0±0.11ab	3.47±0.52c	90.9±1.16ab
Cu100	1.33±0.37a	92.5±1.58ab	1.45±1.09a	92.5±0.76b
Zn25	2.94±0.77b	91.8±0.34ab	3.27±0.71bc	91.2±0.47ab
Zn50	3.54±0.09b	91.8±0.32ab	4.07±0.39c	91.4±0.52ab
Zn100	3.03±0.63b	92.4±0.75b	2.05±1.44b	92.7±0.96b
Cu25Zn25	3.02±0.50b	91.7±0.87ab	3.00±0.42bc	91.8±0.67ab
Cu50Zn50	2.94±0.60b	92.2±0.03ab	2.73±0.54bc	92.7±0.44b

## 2.2 CuZn 交互处理对青菜重金属含量的影响

在所有 Cu 处理中,四月慢和火青菜地上部的 Cu 含量都随着 Cu 处理水平的增加而上升(表 3)。当处理 Cu 水平达到 25 mg/kg (不记内源 Cu) 时,

植株地上部含 Cu 量已经显著 ( $P < 0.05$ ) 高于对照植株中的含 Cu 量。当土壤处理 Cu 水平达到 100 mg/kg 时,四月慢地上部 Cu 含量明显高于火青菜地上部 Cu 含量。

表 3 CuZn 交互处理对青菜地上部和根系 Cu 含量的影响 (mg/kg)

Table 3 Cu concentrations in shoots and roots of *B. chinensis* under different treatments (mg/kg)

处理	火青菜		四月慢	
	地上部	根系	地上部	根系
CK	17.0±2.56a	25.0±8.08ab	23.0±3.29a	35.2±2.78ab
Cu25	32.2±4.75b	60.2±15.9bcd	35.8±7.51b	44.1±8.55ab
Cu50	60.3±4.2e	96.2±11.3de	64.6±10.2d	93.0±6.57e
Cu100	66.4±8.98e	198±6.40g	85.6±3.61e	158±16.4f
Zn25	15.1±0.97a	18.5±7.69a	13.0±1.15a	34.7±11.1ab
Zn50	18.0±8.69a	35.5±7.69ab	14.1±0.07a	32.0±1.99ab
Zn100	14.8±2.40a	39.6±7.26ab	19.7±8.49a	36.7±5.39ab
Cu25Zn25	37.7±0.47b	91.7±23.6de	39.1±6.02b	78.7±6.35cd
Cu50Zn50	48.2±5.27c	114±6.31e	52.4±6.23c	96.6±8.18de

根系含 Cu 量的变化趋势与地上部的变化趋势一致,即随土壤 Cu 处理水平的升高而上升。在所有 Cu 和 CuZn 复合处理中,火青菜根系的含 Cu 量均高于四月慢根系的含 Cu 量,这与地上部 Cu 含量的情况刚好相反,表明 Cu 耐性品种有更强的将 Cu 固定在根中的能力<sup>[11]</sup>。

在对照和土壤低 Cu 处理 (Cu25) 下,提高 Zn 处理水平对两个青菜品种的地上部 Cu 含量几乎没有显著影响。而在 Cu50 处理时,加入 Zn 50 mg/kg 处理 (Cu50Zn50) 则显著降低两个青菜品种的地上部 Cu 含量。

Zn 的加入对两个青菜品种根系吸收 Cu 的影响

不同,例如在 Cu 25 mg/kg 处理条件下,加入 Zn 25 mg/kg 处理 (Cu25Zn25) 显著增加了四月慢根系的 Cu 含量,而对火青菜根系的 Cu 含量没有显著影响。

植株中 Zn 的含量随着处理土壤中 Zn 水平的增加而上升(表 4)。从表 4 中可以看出,与对照相比,单 Cu 处理,Cu 的加入对植株吸 Zn 影响不大。在 Zn 处理中,Cu 的加入对四月慢的地上部含 Zn 量影响不大。而与 Zn 50 mg/kg 处理相比,Cu50Zn50 处理明显增加了火青菜地上部的 Zn 含量。但是,复合处理较单一处理时两种青菜根系中的 Zn 含量均显著增加。

表 4 CuZn 交互处理对青菜地上部和根系 Zn 含量的影响 (mg/kg)

Table 4 Zn concentrations in shoots and roots of *B. chinensis* under different treatments (mg/kg)

处理	火青菜		四月慢	
	地上部	根系	地上部	根系
CK	118±13.9ab	139±9.15a	111±9.91a	129±20.9a
Cu25	96.1±16.7a	142±3.16a	127±44.2ab	130±13.7a
Cu50	169±7.5bc	163±5.84a	180±11.6bc	151±15.5a
Cu100	169±3.1bc	164±187a	175±23.3abc	134±16.0a
Zn25	180±22.0bc	244±28.4b	190±5.88bc	226±32.5b
Zn50	326±54.7d	371±75.5c	348±41.1d	414±0.64d
Zn100	906±33.2f	755±47.1e	848±82.9e	879±44.8f
Cu25Zn25	214±28.3c	315±33.9c	218±15.1c	299±11.9c
Cu50Zn50	621±60.3e	513±27.2d	303±22.5d	477±55.9e

### 2.3 含糖量的变化

在逆境条件下如干旱、低温、重金属毒害等，植物会主动积累一些可溶性糖，降低渗透势和冰点，以适应外界环境条件的变化。图1显示了在不同Cu浓度处理条件下的含糖量变化，发现在不同Cu处理条件下，两个青菜品种地上部含糖量的变化趋势其本一致，都是先上升后下降；但火青菜上升的绝对值明显高于Cu敏感品种四月慢，且四月慢的Cu处理水平达到50 mg/kg时，含糖量显著低于Cu处理水平25 mg/kg时的含糖量；而火青菜的Cu处理水平达到50 mg/kg时，仍能主动积累较多的可溶性糖（图1），说明火青菜的抗性较四月慢高。

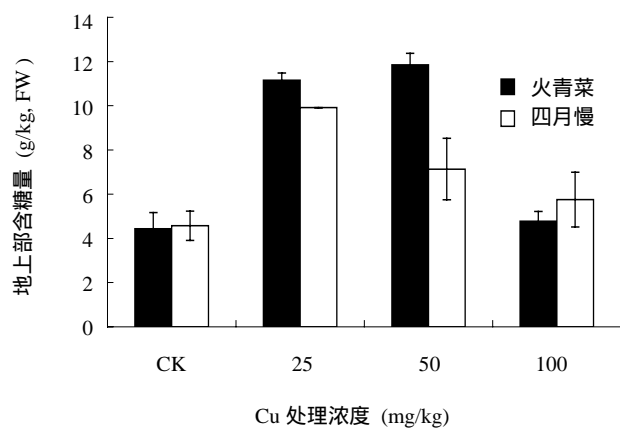


图1 不同Cu处理浓度对青菜含糖量的影响

Fig. 1 Sugar content of *B. chinensis* under different Cu treatments for 8 days

### 3 讨论

姜理英等<sup>[13]</sup>发现低剂量Cu、Zn在促进海州香薷吸收时常表现为协同效应，高剂量Cu、Zn条件下，两元素的关系较为复杂。在香薷体内，Zn能抑制Cu向地上部的运输，而Cu对Zn的运输表现为一定的促进作用。本实验的结果与之类似：在CuZn交互处理青菜的实验中，Cu的加入促进了植株对Zn的吸收（表4）。如在Zn 25 mg/kg处理时，四月慢的地上部含Zn量为190 mg/kg，而Zn 25+Cu25处理时，其Zn含量为214 mg/kg；而在Cu 50 mg/kg处理下，加入Zn 50 mg/kg处理（Cu50Zn50）则显著降低两个品种的地上部Cu含量。

土壤重金属复合污染影响到重金属在土壤及其土壤-植物界面的重金属形态和迁移能力<sup>[14, 15]</sup>。当使用100 mg/kg的Cu处理时，四月慢和火青菜生物量都显著下降（ $P < 0.05$ ），且火青菜地上部的Cu含

量低于四月慢地上部的Cu含量，而地下部情况与此相反，即火青菜根系的Cu含量高于四月慢根系的Cu含量。这一结果表明四月慢对Cu的运输能力大于火青菜对Cu的运输能力。相同浓度的Cu、Zn相比，Zn较Cu对青菜的毒性相对较小，当100 mg/kg的Zn处理时，两品种的生物量与对照相比没有显著性变化。

在逆境条件下土壤根际中的有机酸<sup>[16]</sup>和植物含糖量的变化反映了植物对外部逆境的适应能力，在Cu处理水平达到50 mg/kg时，四月慢含糖量显著低于Cu处理水平25 mg/kg时的含糖量，而火青菜仍能主动积累较多的可溶性糖。结果表明火青菜对逆境的适应能力大于四月慢对逆境的适应能力。

### 参考文献

- Sagner S, Kneer R, Wanner G, Cosson JP, Deus-Neumann B, Zenk MH. Hyperaccumulation, complexation and distribution of nickel in *Sebertia acuminata*. *Phytochemistry*, 1998, 47: 339 ~ 347
- Koeppe DE. The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plants. *Sci. Tot. Environ.*, 1977, 7: 197 ~ 206
- Hart JJ, Welch RM, Norvell WA, Sullivan LA, Kochian LV. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedling of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol.*, 1998, 116: 1413 ~ 1420
- Sugiyama M. Role of cellular antioxidants in metal-induced damage. *Cell Biol. Toxicol.*, 1994, 10: 1 ~ 22
- 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理. *土壤*, 2005, 37 (1): 32 ~ 36
- Rossi G, Figliolia A, Socciarelli S, Pennelli B. Capability of *Brassica napus* to accumulate cadmium, zinc and copper from soil. *Acta Biotechnologica*, 2002, (1-2): 133 ~ 140
- Navari-Izzo F, Quartacci MF. Phytoremediation of metals: Tolerance mechanisms against oxidative stress. *Minerva Biotec.*, 2001, 13: 73 ~ 83
- Del Rio M, Font R, Fernández-Martínez J, Domínguez J, de Haro A. Field trials of *Brassica carinata* and *Brassica juncea* in polluted soils of the Guadiamar River area. *Fresenius Environ. Bull.*, 2000, 9: 328 ~ 332
- 杨志新, 刘树庆. 土壤重金属复合污染对油菜生长的影响. *河北农业大学学报*, 2000, 23(3): 27 ~ 30
- 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国科学

- 技术出版社, 2000, 12 ~ 14
- 11 李合生主编. 生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000
- 12 Zhou DM, Xue Y, Liu XH, Hao XZ, Chen HM, Shen ZG, Si YB. Response of different cultivars of Pakchois (*Brassica chinensis* L.) to Cu toxicity. *Pedosphere*, 2005, 15 (1): 9 ~ 15
- 13 姜理英. 典型香薷属植物对铜的耐性和吸收特性及污染土壤植物修复机理研究 (博士学位论文). 杭州, 浙江大学, 2003
- 14 Zhou DM, Chen HM, Hao XZ, Wang YJ. Fractionation of heavy metals in soils as affected by soil types and metal load quantity. *Pedosphere*, 2001, 12(4): 309 ~ 320
- 15 郑春荣, 陈怀满. 复合污染对水稻生长的影响. *土壤*, 1989, 21(1): 10 ~ 14
- 16 林琦, 陈怀满. 根际环境中镉的形态转化. *土壤学报*, 1998, 35 (4): 461 ~ 467

## DIFFERENCE IN RESPONSE OF TWO CULTIVARS OF *BRASSICA CHINENSIS* TO Cu AND Zn CONTAMINATION OF SOIL

XUE Yan<sup>1,2</sup>   ZHOU Dong-mei<sup>1</sup>   SHEN Zhen-guo<sup>2</sup>

( 1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008;

2 Department of Plant Science, College of Life Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095 )

**Abstract** Responses of two cultivars of *Brassica Chinensis* to soil heavy metals Cu and Zn were investigated. The results indicate that when the soil was treated with Cu, Zn or both, the difference between the two cultivars in biomass, water content and heavy metal concentrations varied with concentrations of Cu and Zn. The sugar content in shoots of Huoqingcai was higher than that of Siyueman. When Cu and Zn coexisted, the accumulation of Cu and Zn in the roots of both cultivars of *Brassica Chinensis* increased in comparison with that in the treatment of Cu or Zn alone, but varied in the shoots between cultivars and between treatments.

**Key words** Copper, Zinc, Biomass, *Brassica Chinensis*, Sugar