

外源铜添加对西兰花铜吸收和积累的影响

陈剑, 齐文, 何玲玲, 檀国印, 项玉英 (浙江省台州市农业科学研究院, 浙江临海 317000)

摘要 采用大棚土培盆栽试验研究 4 个不同品种西兰花对 Cu 的吸收富集规律。结果表明, 随着土壤中添加 Cu 浓度的提高, 西兰花花球和根部中的 Cu 含量均呈上升趋势; 不同浓度处理下, 花球中的 Cu 含量高于根部; 4 个品种西兰花花球的 Cu 含量与其在土壤中的含量均呈线性正相关; 4 个品种对 Cu 吸收能力表现为“耐寒优秀”>“台绿 1 号”>“浙青 95”>“海绿”。综合而言, 西兰花是对 Cu 吸收富集能力较弱的作物, 在铜污染区可以作为低积累的蔬菜品种进行推广种植。

关键词 西兰花; Cu; 盆栽试验; 富集系数

中图分类号 S63 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)20-0046-02

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.20.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Exogenous Copper on the Absorption and Accumulation of Copper in Broccoli

CHEN Jian, QI Wen, HE Ling-ling et al (Taizhou Academy of Agricultural Sciences, Linhai, Zhejiang 317000)

Abstract The absorption and enrichment of Cu in 4 different broccoli cultivars were studied by greenhouse soil culture pot experiment. The results showed that with the increase of Cu concentration in soil, Cu content in broccoli bulb and root showed an increasing trend. Cu content in flower bulb was higher than that in root under different concentrations. The Cu content of four varieties of broccoli flower bulb was linearly and positively correlated with its content in soil. The order of Cu absorption capacity of the four cultivars was "excellent cold tolerance" >, "Tailü No.1" >, "Zheqing 95" > "Hailü". In general, broccoli was a crop with weak Cu absorption and enrichment ability, and it can be promoted and planted as a vegetable variety with low accumulation in the copper pollution zone.

Key words Broccoli; Cu; Pot experiment; Enrichment coefficient

铜是植物生长必需的微量元素, 但过量的铜会对植物造成严重的危害。土壤铜污染的主要来源均与人类活动有关, 如矿山的开发、工业三废、城市垃圾、污泥、污水和含铜农药的使用等^[1-3]。我国主要城市的土壤均存在不同程度的铜污染^[4], 环境介质中高浓度的铜污染可以造成蔬菜中铜的积累, 从而通过食物链转移威胁人体的健康^[5]。目前, 我国关于外源铜胁迫对常见蔬菜及农作物的毒害效应已有大量研究^[6-9], 但针对蔬菜对铜吸收规律的研究较少。西兰花作为浙江省特色蔬菜, 主要分布在台州、杭州、宁波等地区, 是我国在国际市场上比较有竞争力的蔬菜品种, 也是当地农民致富创收的重要来源, 其质量安全不仅影响到国内居民的身体健康, 还影响到我国在国际市场的公众形象^[10]。关于重金属铜在西兰花体内的吸收、积累以及分配规律的研究尚未见报道。笔者采用大棚盆栽试验研究不同品种的西兰花对土壤中铜的吸收分配规律, 旨在为铜污染地区的西兰花种植提供参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料 参试西兰花共有 4 个品种, 分别为“海绿”“浙青 95”“耐寒优秀”和“台绿 1 号”, 以“台绿 1 号”为对照品种。供试重金属试剂为 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。供试盆栽大小一致, 底部密封。供试土壤采自台州市农业科学院天台基地附近的水稻土, 土壤中重金属 Cu 本底值为 11.35 mg/kg, 符合《土壤环境质量(重金属)标准》中适合于农田土壤环境的二级指标。

1.2 试验设计 试验在台州市农业科学研究院天台基地塑料大棚内进行, 供试土壤经晒干、敲细、去杂、充分拌匀后装

盆备用, 每盆装干土 15 kg; 将 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 试剂按照浓度梯度(表 1)配制成溶液, 均匀喷洒在土壤中, 搅拌均匀后将土壤重新装盆, 每个处理设平行试验 4 盆, 西兰花采用穴盘育苗后于 9 月底移栽。待西兰花达到采摘标准后, 采集各株花球及地下根系部分, 分别测定其重金属含量。

表 1 重金属 Cu 浓度梯度

Table 1 Heavy metal Cu concentration gradient mg/kg

级别 Gradient	浓度 Concentration	级别 Gradient	浓度 Concentration
1	本底(小于 100)	4	400
2	200	5	500
3	300		

1.3 数据分析 土壤和植株中的 Cu 测定方法参照国家标准进行; 试验所得数据使用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19 软件进行处理和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度处理下西兰花不同部位的 Cu 含量 由表 2 可知, 参试各品种西兰花花球及根部中的 Cu 含量均随着土壤中添加 Cu 浓度的升高而升高; 在不同浓度处理下, 参试各品种花球中的 Cu 含量高于根部; 各参试西兰花品种对 Cu 的吸收能力存在一定差异, 其中“耐寒优秀”强于对照品种“台绿 1 号”, “海绿”与“浙青 95”对 Cu 的吸收能力弱于“台绿 1 号”; 在 5 级浓度处理下, 各品种花球中的 Cu 含量仍处于较低水平, 可以推断西兰花属于对 Cu 吸收富集能力较弱的作物, 在铜污染区可以作为低积累的蔬菜品种进行推广种植。

2.2 西兰花花球的 Cu 含量与土壤中添加的 Cu 浓度的相关性 根据各参试品种西兰花花球中的 Cu 含量, 可以得出西兰花花球对土壤中 Cu 的吸收富集方程(x, y 分别为土壤、西兰花花球中 Cu 的含量), 部分花球样品中的 Cu 含量由于未

作者简介 陈剑(1985—), 男, 浙江临海人, 农艺师, 硕士, 从事农产品安全、植保方面的研究。

收稿日期 2019-03-26

达到最低检出限值,根据(HJ/T 166—2004)的相关规定,按照1/2最低检出浓度值进行统计处理。由表3可知,各参试品种西兰花的花球对土壤中Cu的吸收富集规律均符合线性

回归方程,其决定系数分别为0.828 1、0.881 7、0.832 5和0.814 2,说明4个参试西兰花品种花球中的Cu含量均受土壤中Cu浓度的影响较大。

表2 西兰花各部位在不同梯度处理下的Cu含量

Table 2 Cu content of different parts of broccoli under different gradient treatments

mg/kg

级别 Level	耐寒优秀 Excellent cold resistance		海绿 Hailü		浙青 95 Zheqing 95		台绿 1 号 Tailü No.1		平均值 Average	
	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root
	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1.743 b	1.580 b	1.288 a	1.258 a	1.590 ab	1.128 a	1.720 ab	1.355 a	1.585	1.330
3	1.750 a	1.737 b	1.438 a	1.353 a	1.613 a	1.298 a	1.753 a	1.470 ab	1.639	1.464
4	1.990 b	1.910 b	1.483 a	1.363 a	1.813 b	1.333 a	1.763 b	1.683 a	1.762	1.572
5	2.067 b	1.945 b	1.657 a	1.370 a	1.887 ab	1.585 a	2.097 b	1.887 a	1.927	1.697

注:“—”表示未检出,Cu 检出限为 1.00 mg/kg,不同小写字母表示各品种间在 0.05 水平差异显著

Note:“—” means no detection,and the detection limit of Cu is 1.00 mg/kg.Different lowercase letters mean significant differences between varieties at the level of 0.05

表3 不同品种西兰花花球与土壤中Cu浓度的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between different varieties of broccoli flower bulb and Cu concentration in soil

品种 Varieties	回归方程 Regression equation	R^2	P
耐寒优秀 Excellent cold resistance	$y=0.003 1x+0.741 0$	0.828 1	0.031 96
海绿 Hailü	$y=0.002 3x+0.637 1$	0.881 7	0.017 93
浙青 95 Zheqing 95	$y=0.002 7x+0.710 7$	0.832 5	0.030 69
台绿 1 号 Tailü No.1	$y=0.003 0x+0.733 7$	0.814 2	0.036 11

2.3 西兰花不同部位对Cu的富集能力 由于蔬菜中重金属含量受到土壤重金属含量的影响,因此可用富集系数来衡量蔬菜吸收重金属元素能力的强弱。富集系数是指蔬菜中

某污染物含量占土壤中该污染物含量的百分率。富集系数越大,表明作物越易从土壤中吸收该元素,即该元素的迁移性越强^[11]。由表4可知,参试的4个西兰花品种花球及根部对Cu的富集系数均随着土壤中Cu浓度的升高而降低;花球部位对Cu的富集能力强于根部,说明Cu元素在西兰花体内运输能力较强;在不同浓度处理下,参试品种对Cu的富集系数差异不大。

富集系数在0.5~1.5时,表示该部位重金属含量与土壤中该重金属的含量属同一水平;富集系数小于0.5时,表示该部位重金属含量较土壤中该重金属的含量相对贫化,即低于土壤中相应重金属含量的水平^[12]。西兰花2个部位对Cu的富集系数均小于0.5,说明西兰花对Cu的吸收富集能力较弱。

表4 西兰花不同部位对Cu的富集系数

Table 4 Enrichment coefficients of Cu in different parts of broccoli

级别 Level	耐寒优秀 Excellent cold resistance		海绿 Hailü		浙青 95 Zheqing 95		台绿 1 号 Tailü No.1	
	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root	花球 Flower bulb	根部 Root
	CK	0.044 05	0.044 05	0.044 05	0.044 05	0.044 05	0.044 05	0.044 05
2	0.008 72	0.007 90	0.006 44	0.006 29	0.007 95	0.005 64	0.008 60	0.006 78
3	0.005 83	0.005 79	0.004 79	0.004 51	0.005 38	0.004 33	0.005 84	0.004 90
4	0.004 98	0.004 78	0.003 71	0.003 41	0.004 53	0.003 33	0.004 41	0.004 21
5	0.004 13	0.003 89	0.003 31	0.002 74	0.003 77	0.003 17	0.004 19	0.003 77

3 结论与讨论

该研究中参试的4个西兰花品种花球和根部中的Cu含量均随着土壤中添加Cu浓度的增加而增加;花球中的Cu含量在不同浓度处理下均高于根部,说明Cu元素在西兰花体内运输能力较强;花球中的Cu含量与土壤中添加的Cu浓度呈较强的正相关关系,这与檀国印等^[13]和黄永东等^[14]关于蔬菜对重金属的吸收积累研究结果基本相似。

参试的4个西兰花品种对Cu元素的吸收能力有一定差异,吸收能力从大到小依次为“耐寒优秀”“台绿1号”“浙青95”“海绿”;在5级浓度处理下,各品种花球中的Cu含量仍处于较低水平,且花球和根部对Cu的富集系数在不同浓度处理下均小于0.5,可以推断西兰花属于对Cu吸收富集能力

较弱的作物,在铜污染区可以作为低积累的蔬菜品种进行推广种植。

参考文献

- [1] 彭红云,杨尚娥.香蕈植物修复铜污染土壤的研究进展[J].水土保持学报,2005,19(5):195-199.
- [2] 黄长干,邱业先.江西德兴铜矿“铜污染”状况调查及植物修复研究[J].土壤通报,2005,36(6):991-992.
- [3] 张孝飞,林玉锁,俞飞,等.城市典型工业区土壤重金属污染状况研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(4):512-515.
- [4] 杨苏才,曾静静,王胜利,等.兰州市表层土壤Cu、Zn、Pb污染评价及成因分析[J].干旱区资源与环境,2004,18(8):28-31.
- [5] 倪吾钟,马海燕,余慎,等.土壤-植物系统的铜污染及其生态健康效应[J].广东微量元素科学,2003,10(1):1-5.
- [6] 李晓晶,李德生,李海茹,等.外源铜胁迫对木本蔬菜生长及品质的影响研究[J].环境污染与防治,2013,35(4):38-42.

(下转第53页)

- Region, Southwest China [J]. Aquatic botany, 2016, 133: 28-37.
- [2] XIE L L, HE X L, WANG K, et al. Spatial dynamics of dark septate endophytes in the roots and rhizospheres of *Hedysarum scoparium* in northwest China and the influence of edaphic variables [J]. Fungal ecology, 2017, 26: 135-143.
- [3] ROTHEN C, MIRANDA V, ARANDA-RICKERT A, et al. Characterization of dark septate endophyte fungi associated with cultivated soybean at two growth stages [J]. Applied soil ecology, 2017, 120: 62-69.
- [4] 邓勋, 宋小双, 尹大川, 等. 深色有隔内生真菌提高宿主植物抗逆性的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 10-11, 17.
- [5] JUMPPONEN A, MATTSON K G, TRAPPE J M. Mycorrhizal functioning of *Phialocephala fortinii* with *Pinus contorta* on glacier forefront soil: Interactions with soil nitrogen and organic matter [J]. Mycorrhiza, 1998, 7(5): 261-265.
- [6] UPSON R, READ D J, NEWSHAM K K. Nitrogen form influences the response of *Deschampsia antarctica* to dark septate root endophytes [J]. Mycorrhiza, 2009, 20(1): 1-11.
- [7] BAN Y H, XU Z Y, YANG Y R, et al. Effect of dark septate endophytic fungus *Gaeumannomyces cylindrosporus* on plant growth, photosynthesis and Pb tolerance of maize (*Zea mays* L.) [J]. Pedosphere, 2017, 27(2): 283-292.
- [8] 农倩, 张雯龙, 蓝桃菊, 等. 一株抗香蕉枯萎病 DSE 菌株的筛选鉴定及抗病机理初探 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(3): 559-564.
- [9] BARROW J R, AALTONEN R E. Evaluation of the internal colonization of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. roots by dark septate fungi and the influence of host physiological activity [J]. Mycorrhiza, 2001, 11(4): 199-205.
- [10] ŠRAJ-KRŽIĆ N, PONGRAC P, KLEMENC M, et al. Mycorrhizal colonisation in plants from intermittent aquatic habitats [J]. Aquatic botany, 2006, 85: 331-336.
- [11] DOLINAR N, REGVAR M, ABRAM D, et al. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonization in an intermittent wetland [J]. Hydrobiologia, 2016, 774(1): 69-80.
- [12] STEVENS K J, WELLNER M R, ACEVEDO M F. Dark septate endophyte and arbuscular mycorrhizal status of vegetation colonizing a bottomland hardwood forest after a 100 year flood [J]. Aquatic botany, 2010, 92: 105-111.
- [13] 李芳芳. 白洋淀湿地植物 AM 真菌和 DSE 物种多样性及 DSE 重金属抗性研究 [D]. 保定: 河北大学, 2017.
- [14] YAZDI S E, PRINSL O G, HEYMAN H M, et al. Metabolomic analysis on anti-HIV activity of selected *Helichrysum species* [J]. South African journal of botany, 2017, 109: 376.
- [15] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Trans Br Mycol Soc, 1970, 55(1): 158-161.
- [16] 高俊凤. 植物生理学试验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 431-457.
- [17] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理生化试验技术与原理 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 91-95.
- [18] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 316-342.
- [19] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [20] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 258-260.
- [21] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes [J]. Methods in enzymology, 1987, 148: 350-382.
- [22] SHERAMETI I, SHAHOLLARI B, VENUS Y, et al. The endophytic fungus *Piriformospora indica* stimulates the expression of nitrate reductase and the starch-degrading enzyme glucan-water dikinase in tobacco and *Arabidopsis* roots through a homeodomain transcription factor that binds to a conserved motif in their promoters [J]. Journal of biological chemistry, 2005, 280(28): 26241-26247.
- [23] VARMA A, VERMA S, SUDHA X, et al. *Piriformospora indica*, a cultivable plant-growth-promoting root endophyte [J]. Applied environmental microbiology, 1999, 65(6): 2741-2744.
- [24] WALLER F, ACHATZ B, BALTRUSCHAT H, et al. The endophytic fungus *Piriformospora indica* reprograms barley to salt-stress tolerance, disease resistance, and higher yield [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2005, 102(38): 13386-13391.
- [25] PARENT C, CAPELLI N, BERGER A, et al. An overview of plant responses to soil waterlogging [J]. Plant stress, 2008, 2(1): 20-27.
- [26] STEFFENS D, HUTSCH B W, ESCHHOLZ T, et al. Water logging may inhibit plant growth primarily by nutrient deficiency rather than nutrient toxicity [J]. Plant soil and environment, 2005, 51(12): 545-552.
- [27] BAILEY-SERRES J, VOESENEK L. Flooding stress: acclimations and genetic diversity [J]. Plant Biol, 2008, 59: 313-339.
- [28] XU X W, WANG H H, QI X H, et al. Waterlogging-induced increase in fermentation and related gene expression in the root of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Scientia horticulturae, 2014, 179: 388-395.
- [29] TAN S D, ZHU M Y, ZHANG Q F. Physiological responses of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) to submergence [J]. Acta physiologiae plantarum, 2010, 32(1): 133-140.
- [30] YU T, NASSUTH A, PETERSON R L. Characterization of the interaction between the dark septate fungus *Phialocephala fortinii* and *Asparagus officinalis* roots [J]. Canadian journal of microbiology, 2001, 47(8): 741-753.
- [31] SAIRAM R K, KUMUTHA D, EZHILMATHI K, et al. Waterlogging induced oxidative stress and antioxidant enzyme activities in pigeon pea [J]. Biologia plantarum, 2009, 53(3): 493-504.
- [32] HOSSAIN Z, LÓPEZ-CLIMENT M F, ARBONA V, et al. Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage [J]. Journal of plant physiology, 2009, 166(13): 1391-1404.
- [33] WANG B X, SEILER J R, MEI C S. A microbial endophyte enhanced growth of switchgrass under two drought cycles improving leaf level physiology and leaf development [J]. Environmental and experimental botany, 2016, 122: 100-108.
- [34] ANSARI A, RAZMJOO J, KARIMMOJENI H. Mycorrhizal colonization and seed treatment with salicylic acid to improve physiological traits and tolerance of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) plants grown under drought stress [J]. Acta Physiol Plant, 2016, 38(2): 1-10.
- [35] 胡桂馨, 王代军, 刘荣堂. 干旱胁迫下内生真菌对高羊茅保护酶活性的影响 [J]. 草原与草坪, 2001(1): 28-31.
- [36] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3 种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价 [J]. 林业科学, 2011, 47(6): 48-55.

(上接第 47 页)

- [7] 林碧英, 谢秋梅, 林义章, 等. 铜胁迫对苋菜叶片叶绿素 a 荧光诱导动力学的影响 [J]. 热带作物学报, 2011, 32(3): 383-388.
- [8] 徐磊, 林义章. 铜胁迫对小白菜品质相关指标的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(14): 161-163.
- [9] 贾彦博, 屠海云, 朱顺达, 等. 外源铜添加对蔬菜铜吸收和积累的影响 [J]. 中国园艺文摘, 2008(6): 39-41.
- [10] 孙彩霞, 戚亚梅, 杨桂玲, 等. 西兰花出口的技术性贸易措施分析 [J]. 农产品质量与安全, 2013(1): 55-57.
- [11] 夏星辉, 陈静生. 土壤中重金属污染治理方法研究进展 [J]. 环境科学, 1997, 18(3): 72-76.
- [12] 曹帅, 王文建, 权春梅, 等. 芍药不同药用部位重金属吸收富集特征研究 [J]. 皖西学院学报, 2015, 31(5): 126-129, 143.
- [13] 檀国印, 陈剑, 朱良其, 等. 茭白浙茭 2 号、八月茭对重金属铅镉汞的吸收规律 [J]. 浙江农业科学, 2017, 58(5): 784-786.
- [14] 黄永东, 黄永川, 于官平, 等. 蔬菜对重金属元素的吸收和积累研究进展 [J]. 长江蔬菜, 2011(10): 1-6.