

重金属铜在甘蔗体内的吸收及对甘蔗产量和品质的影响^①

郭家文, 崔雄维, 张跃彬, 刘少春

(云南农业科学院甘蔗研究所, 云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661600)

摘要: 通过盆栽试验, 研究重金属 Cu 在甘蔗体内吸收、积累规律及对甘蔗产量和糖分的影响情况。结果表明, 根、茎、枯叶、梢头对 Cu 的积累能力总体表现为根>茎>枯叶>梢头, 甘蔗各部分器官 Cu 含量随外源投放的 Cu 浓度而增加, 呈显著的正相关。少量的 Cu 会使甘蔗明显增产, 但胁迫或过量对甘蔗的生长和生物量的影响不明显。Cu 过量对甘蔗品质的影响表现在出汁率、还原糖的增加和纤维素的降低, 适当地施 Cu 会增加甘蔗的产糖量, 但过多会减低甘蔗的产糖量。

关键词: 铜; 甘蔗; 产量; 品质

中图分类号: S565.201

土壤重金属 (Cd、Cu 和 Zn 等) 污染是影响我国持续农业和生态环境质量的一个重要原因^[1]。尽管 Cu 元素是植物生长发育所必需的微量元素之一, 但随着社会经济的发展, Cu 矿、Cu 制品生产、电镀和印染业的发展及污泥农用等原因致使某些地区环境中 Cu 含量过高对植物造成危害, 甚至会通过食物链危害人体健康^[2]。据不完全统计, 我国利用污水灌溉农田的面积为 1 000 多万 hm^2 , 其中 30% 的土壤遭受不同程度的重金属如 Cd、Hg、Pb、Cu、Zn 等的污染。此外, 我国的矿山废弃地已达 200 多万 hm^2 , 并仍以 2.5 万 hm^2 /年的速度增加^[3-4], 可见土壤重金属污染形势比较严峻。甘蔗具有生长快、生物量大、管理粗放、对生长的土壤环境要求不高等特点。目前关于甘蔗用来修复 Cu 污染的土壤还鲜见报道。本研究试验选用我国目前推广面积最大的甘蔗品种新台糖 22 号为研究材料, 在外源添加金属 Cu, 研究 Cu 在甘蔗体内的积累规律和对甘蔗产量和糖分的影响, 为指导重金属 Cu 污染土壤的植物修复提供依据

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自云南省开远市, 土壤类型为赤红壤, 其基本理化性状为 pH 5.90, 有机质 2 g/kg, 全 N 5.7 g/kg, 全 P 3.2 g/kg, 全 K 9.10 g/kg, 碱解 N 32.32 mg/kg, 速效 P 2.02 mg/kg, 速效 K 119.55 mg/kg, 有效 Mn 14.98 mg/kg, 有效 Zn 4.40 mg/kg, 有效 Cu 0.68 mg/kg, 全

Cu 含量 12.7 mg/kg。

供试甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 品种为新台糖 22 号, 亲系为新台糖 5 号×69-463, 台湾糖业研究所育成。Cu²⁺ 标准溶液 (1 000 mg/L) 购自国家钢铁材料测试中心。供试化肥: 常用化肥品种尿素、过磷酸钙、硫酸钾和分析纯试剂磷酸二氢钾。

1.2 试验设计与实施

试验于 2008—2009 年在云南省农业科学院甘蔗研究所试验基地内进行。试验共设 5 个处理: ①对照 (CK), 外源投加 Cu 0 mg/kg, 计为 0; ②外源投加 Cu 50 mg/kg, 计为 1; ③外源投加 Cu 100 mg/kg, 计为 2; ④外源投加 Cu 250 mg/kg, 计为 3; ⑤外源投加 Cu 500 mg/kg, 计为 4。外源的 Cu 以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的形式溶解在水中用来浇淋土壤, 本研究中土壤含 Cu 量均以纯 Cu 计。每处理重复 4 次。试验于 2008 年 3 月 21 日实施, 种植前对供试土壤进行晒干, 敲碎混匀, 在每个黑色塑料桶里称取 20 kg 的土壤, 同时每株种下 4 个单芽苗的甘蔗 (甘蔗种苗种植前进行温水脱毒^[5]), 浇自来水让其自然生长。试验用黑色塑料桶, 其上缘直径为 38 cm, 底面直径为 28 cm, 高 30 cm。种植至收获共计施肥 2 次, 分别在 2008 年 4 月 18 日和 7 月 3 日, 第一次施尿素 5 g/桶、过磷酸钙 10 g/桶、硫酸钾 5 g/桶, 第二次施尿素 5 g/桶和磷酸二氢钾 2.5 g/桶。2009 年 2 月 16 日对甘蔗进行收获, 甘蔗收获时分 4 部分, 分别为根系 (地下部分)、枯叶 (丧失功能的叶片)、蔗茎 (用于制糖的部分)、梢头 (有生理功能的

①基金项目: 云南省科技计划项目 (2008AB005) 和国家甘蔗产业技术体系营养与栽培研究室项目 (nycytx-024-01-14) 资助。

作者简介: 郭家文 (1979—), 男, 云南马龙人, 副研究员, 硕士研究生, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: 79jwguo@163.com

叶片+甘蔗的生长点)。把供试土壤和甘蔗根系从桶里一起倒出,用木棍敲开土壤,捞出甘蔗根系,用自来水冲净根系上附着的泥土,再用蒸馏水冲洗3次,晾干(晾至根系表面没有明显的水分),称取根系鲜重,在烘箱中105℃杀青30 min,再在70℃烘至恒重,称取干重后粉碎混匀待测。对收获的梢头和枯叶,称取鲜重后在烘箱中105℃杀青30 min,再在70℃烘至恒重,称取干重后粉碎混匀待测。对每桶收获的蔗茎,在4个重复中每桶抽取一株用于测定糖分,每桶中剩余的蔗茎称取鲜重后用菜刀破开,在烘箱中105℃杀青30 min,再在70℃烘至恒重,称取干重后粉碎混匀待测。

1.3 测定方法

土壤基本化学性质按常规分析方法测定^[6]。植物样品Cu含量的测定采用HNO₃-HClO₄消化-原子吸收吸收^[7]法:采用原子吸收分光光度法,将烘干后的植物样品磨碎,称取1 g置于100 ml三角烧瓶中,按V_{HNO₃}:V_{HCl}:V_{HClO₄}=4:4:1加入混合液适量,放置过夜,在电热板上完全消化,稀释定容,用日本岛津AA6300原子吸收分光光度计测定,以上测定均重复3次。甘蔗蔗糖分的测定采用二次旋光法,甘蔗纤维分、出汁率和蔗汁还原糖、重力纯度、筒纯度测定参照《甘蔗制糖化学管理统一分析方法》^[8]的方法。

2 结果与分析

2.1 铜在甘蔗体内积累分布特征

从表1可以看出,甘蔗根、茎、枯叶、梢头对Cu的积累能力总体表现为根>茎>枯叶>梢头。有研究认为在重金属与植物作用时,根首先接触并吸收重金属,根细胞壁中存在的大量交换位点可以吸附并固定重金属离子;同时植物根部分泌的一些有机物质也可以与Cu²⁺结合形成稳定的配位化合物,从而阻止重金属离子向茎叶运输,进而表现植物根部可以积累较多Cu的现象^[9]。4个施Cu的处理根系中的Cu含量显著高

于CK,各处理甘蔗根系中Cu含量的高低顺序依次是:处理4和处理3>处理1和处理2>CK,根系中Cu的含量与投放的Cu浓度呈显著正相关,相关系数 r 为0.9167^{*},回归方程为 $y=54.4927+0.2526.86x$ 。4个施Cu处理的甘蔗茎中Cu的含量显著高于CK,各处理甘蔗茎中Cu含量的高低顺序依次是:处理4>处理3>处理1和处理2>CK,随投放的Cu浓度的增加,甘蔗茎中的Cu含量也增加,二者含量呈极显著正相关,相关系数 r 为0.9608^{**},回归方程为 $y=22.5956+0.012033x$ 。枯叶中,随着投放的Cu浓度的增加,枯叶中的Cu含量也相应地提高,二者间达到显著水准,各处理甘蔗枯叶除处理1外,3个处理都与CK达到显著水平,随着投放的Cu浓度的增加,甘蔗枯叶中的Cu含量也增加,二者含量呈极显著正相关,相关系数 r 为0.9611^{**},回归方程为 $y=12.2416+0.028749x$ 。梢头中Cu含量有随着土壤中Cu含量增加而增高的趋势,但各处理间Cu含量差异不显著,二者含量正相关,其相关系数 r 为0.5760,可能原因在于梢头是在甘蔗成熟期才长出的新生组织,对Cu的积累时间相对较短,且土壤中的Cu可能随着时间的推移出现“老化”,老化指添加到土壤中的水溶性Cu,其可浸提性、可交换性、生物有效性和毒害随时间延长而缓慢降低的过程^[10-13]。Cu在甘蔗体内的积累量随外源添加的Cu的量增加而增多,几个施Cu的处理对Cu的总吸收量均与CK达到显著性差异,二者含量显著正相关,相关系数 r 为0.8886^{*},回归方程为 $y=16.0101+0.013648x$ 。甘蔗体内Cu含量随土壤重金属含量变化而变化,呈显著正相关。甘蔗与多种修复植物对土壤中重金属都表现出相同的特性^[14-16]。由以上研究结果可以得出,甘蔗可收获的地上部分对Cu的富集能力不强,加上甘蔗加工成食糖还要经过制糖设备的层层过滤和结晶,金属Cu最后进入食物链的可能性相对较小,甘蔗在Cu污染的土壤上种植也可能会相对安全。

表1 Cu在甘蔗体内的分配特点(干重)

Table 1 Distributive characteristics of Cu in sugarcane

处理	根系 (mg/kg)	蔗茎 (mg/kg)	枯叶 (mg/kg)	梢头 (mg/kg)	全株总吸收量 (mg)
0	30.0±2.0 c	21.6±0.5 d	10.2±0.7 d	6.0±0.4 a	13.8±2.4 c
1	65.0±4.8 b	23.5±0.5 c	13.4±3.6 cd	6.8±0.9 a	17.9±0.7 b
2	95.5±4.5 b	24.6±0.4 c	17.5±3.0 bc	7.0±1.0 a	18.3±0.6 b
3	146.5±25.6 a	26.0±0.5 b	20.3±3.2 b	6.5±0.1 a	20.2±0.7 ab
4	163.8±41.4 a	28.3±1.8 a	25.8±2.7 a	7.1±1.0 a	22.2±1.0 a

注:同一列内字母不同表示差异显著($p<0.05$),表中数据为4次重复的平均,下同。

2.2 铜对甘蔗产量和品质的影响

2.2.1 Cu 胁迫对甘蔗产量和产量构成的影响 从表 2 可以看出, Cu 胁迫对株高的抑制不明显, 相反还有促进甘蔗生长的趋势。处理 1 可收获用于制糖的茎最高, 与其他几个处理差异显著, 同时较 CK 高出 31.27%。还可以看出投放的 Cu 量在 0~50 mg/kg 内, 甘蔗的茎、枯叶、根系和全株的生物产量都随着施 Cu 含量的增加而增加。当土壤中的 Cu 含量超过 50

mg/kg, 各处理间各部位的生物产量和全株生物产量差异不显著。各施 Cu 的处理甘蔗收获指数在 0.69~0.72。还可以看出投放的 Cu 浓度小于 500 mg/kg 时对甘蔗的生物产量不但不影响, 相反还有促进的趋势, 可能原因在于甘蔗的根系属于须根系, 根的寿命较短, 老根失去功能后, 新的根系总是很快地长出替代老的根吸收水分和养分, 供给甘蔗生长需要, 从而表现出甘蔗对 Cu 污染有较高的耐性。

表 2 Cu 胁迫对甘蔗株高和各器官生物量的影响 (鲜重)

Table 2 Effects of Cu stress on sugarcane height and biomass of organs

处理	株高 (cm)	生物量 (鲜重, g)					收获指数
		茎	梢头	枯叶	根系	全株	
0	145.3 ± 10.9 a	159.9 ± 154 b	392 ± 46 a	151 ± 18 b	141 ± 16 b	228.3 ± 163 b	0.70
1	157.4 ± 20.1 a	209.9 ± 479 a	360 ± 26 a	270 ± 92 a	224 ± 57 a	295.1 ± 537 a	0.71
2	157.4 ± 1.7 a	173.5 ± 53 ab	358 ± 6 a	192 ± 12 ab	116 ± 38 b	240.1 ± 61 b	0.72
3	151.2 ± 3.6 a	157.3 ± 152 b	340 ± 14 a	193 ± 41 ab	121 ± 26 b	222.8 ± 176 b	0.71
4	150.6 ± 2.2 a	161.0 ± 198 b	345 ± 37 a	213 ± 27 ab	149 ± 17 b	231.8 ± 199 b	0.69

2.2.2 Cu胁迫对甘蔗品质的影响 从表 3 可以看出, 4 个外源添加Cu的处理出汁率都比CK高, 施Cu能够提高甘蔗的出汁率。Cu过多对蔗糖分和锤度的影响不明显。外源添加Cu对甘蔗的纤维分有降低的作用, 4 个施Cu的处理纤维分的含量都比CK低。Cu过多对甘蔗的还原糖有增加的趋势, 对筒纯度和重力纯度的影响不明显。从表 3 还可以看出, 处理 1

和处理 2 分别比CK增糖 25.8% 和 9.4%, 可见适当地增施Cu对提高甘蔗的产糖率大有好处, 但Cu过多会降低甘蔗的产糖量。有研究^[17]得出重金属污染区蔬菜的粗纤维和还原糖含量明显低于清灌区的各项指标, 这与本研究Cu过量会导致甘蔗纤维分的降低的结论相似, 但对还原糖的影响刚好相反。

表 3 Cu 胁迫对甘蔗品质和产糖量的影响

Table 3 Effects of Cu stress on sugarcane quality and sugar yield

处理	出汁率 (%)	蔗糖分 (%)	纤维分 (%)	锤度 (%)	筒纯度 (%)	重力纯度 (%)	还原糖分 (%)	产糖量 (g)
0	58.4	15.3	14.5	21.8	86.5	86.4	0.4	245.3
1	62.7	14.7	11.7	20.4	84.6	84.8	0.5	308.6
2	64.6	15.5	12.4	21.2	86.3	86.6	0.5	268.4
3	63.6	15.1	11.9	20.6	85.4	85.9	0.6	237.4
4	65.1	15.9	12.4	22.2	84.9	85.0	0.4	235.8

3 讨论

Cu在土壤中的含量超过 100 mg/kg对冬小麦^[18]、海州香薷^[19]、水花生^[20]都有明显的减产, 但在本研究中Cu含量甚至达到 500 mg/kg时, 对甘蔗的生物产量与对照相比还是差异不显著, 可见甘蔗对Cu胁迫有较好的耐性。其原因可能在于甘蔗的根系比其他作物的根系具有较强的更新能力。甘蔗的根系是不断地衰老与更新的, 以此保持旺盛的吸收能力来维持蔗株的生长

发育^[21]。Cu首先毒害的是甘蔗的根系, 导致老根丧失功能, 这时又会从蔗株的基部很快长出新根来代替老根来发挥新的作用。甘蔗具有宿根性 (新种一年可连续收获几年) 也说明甘蔗的根系具有较强的生命力。从收获时地上部的生物量是根系生物量 10 倍以上也可以看出甘蔗根系新老更替的速度非常得快。以上是研究者的一点浅见, 要真正地了解甘蔗对Cu的毒性还需要深入的研究。

甘蔗是C4作物,具有生长快、生物量大、管理粗放、耐贫瘠等特点,能够在各类逆境土壤上正常生长。甘蔗的生物量,一般蔗茎产量都能达到60 t/hm²以上,同时甘蔗收获后会留下的蔗叶在15 t/hm²以上,如果结合蔗叶还田,可以很快地培肥土壤的地力,提高土壤的生产力。甘蔗是宿根性作物,种植一年可连续多年收获,从而在种植管理成本上会比较低。甘蔗可以用来制糖或者制作酒精,如果甘蔗作为先锋作物来修复被Cu污染的土壤,用污染土壤上生产出来的甘蔗生产能源酒精供给交通工具使用,产生的重金属污染不会进入食物链危害人体健康。同时糖厂现有的设备就可以满足能源酒精生产的需要,不需另外地增加设备投资。由此可见,将来用甘蔗修复重金属污染的土壤,再用甘蔗来生产能源酒精不是不可能的。

参考文献:

- [1] 徐国明, 张桂银, 褚卓栋, 薛培英, 张桃红, 毕淑琴. 铜污染土壤上施用氮磷肥对小麦 POD 酶活性及铜吸收的影响. 土壤, 2008, 40(3): 432-436
- [2] 陈怀玉. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996: 255-256
- [3] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 吴胜春, 吴龙华, 乔显亮, 宋静. 重金属污染土壤的植物修复研究 I. 金属富集植物 *Brassicajuncea* 对铜、锌、镉、铅污染的响应. 土壤, 2000, 32(2): 71-74
- [4] 郝秀珍, 周东美. 金属尾矿砂的改良和植被重建研究进展. 土壤, 2005, 37(1): 13-19
- [5] 李文凤, 黄应昆, 范源洪, 李俊, 卢文洁, 吴正焜, 罗志明, 杨洪昌. 甘蔗宿根矮化病(RSD)温水脱菌研究. 西南农业学报, 2009, 22(2): 343-347
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [7] 谢苏婧, 谢树莲, 谢宝妹. 藻类植物中钙、镁、铁、锰、铜和锌含量分析. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(3): 615-616
- [8] 广东省甘蔗糖业食品科学研究所. 甘蔗制糖化学管理统一分析方法. 北京: 轻工业出版社, 1976
- [9] 刘素红, 刘新会, 侯娟, 迟光宇, 崔保山. 植物光谱应用于白菜铜胁迫响应研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(5): 693-699
- [10] Bruus PM, Van Gestel CAM. Toxicity of copper to the collembolan *Folsomia fimetaria* in relation to the age of soil contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 49: 54-59
- [11] Lock K, Janssen CR. Influence of ageing on copper bioavailability in soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22: 1162-1166
- [12] Lu A, Zhang S, Shan XQ. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils. *Geoderma*, 2005, 125: 225-234
- [13] Ma YB, Lombi E, Oliver IW, Nolan AL, McLaughlin MJ. Long-term aging of copper added to soils. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40: 6310-6317
- [14] Denny HJ, Wilkins DA. Zinc tolerance in *Betula* spp. Effect of external concentration of zinc on growth and uptake. *New phytologist*, 1987, 106: 517-524
- [15] Poschenrieder C, Bech J, Llugany M, Pace A, Penés E, Barceló J. Copper in plant species in a copper gradient in Catalonia (North East Spain) and their potential for phytoremediation. *Plant and Soil*, 2001, 230: 247-256
- [16] 李宁, 吴龙华, 李法云, 骆永明. 不同铜污染土壤上海州香薷生长及铜吸收动态. 土壤, 2006, 38(5): 598-601
- [17] 谢建治, 刘树庆, 刘玉柱, 高如泰. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响. 农业环境保护, 2002, 21(4): 325-327
- [18] 夏来坤, 郭天财, 朱云集, 康国章, 王晨阳. 土壤重金属铜、镉胁迫对冬小麦碳氮运转的影响. 水土保持学报, 2006: 20(1): 117-120
- [19] 田生科, 李廷轩, 彭红云, 杨肖娥, 李廷强, Ejaz. 铜胁迫对海州香薷和紫花香薷根系形态及铜富集的影响. 水土保持学报, 2005: 19(3): 97-100, 183
- [20] 黄永杰, 杨集辉, 杨红飞, 张杰, 周守标. 铜胁迫对水花生生长和土壤酶活性的影响. 土壤学报, 2009, 46(3): 494-500
- [21] 李奇伟. 现代甘蔗改良技术. 广州: 华南理工大学出版社, 2000

Cu Uptake by Sugarcane and Its Effects on Sugarcane Yield and Quality

GUO Jia-wen, CUI Xiong-wei, ZHANG Yue-bin, LIU Shao-chun

*(Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement,
Kaiyuan, Yunnan 661600, China)*

Abstract: The pot experiment was conducted to study Cu uptake and accumulation in sugarcane and its effects on sugarcane yield and sucrose. The results showed that the ability of different organs in accumulating Cu was in an order of root > stem > dead leaves > top plant. Cu contents in different organs of sugarcane showed significant positive correlations with the increase of exogenous Cu. Low content of Cu increased sugarcane yield, however, there are not obvious effects on sugarcane growth and biomass on the conditions of Cu stress or excessive Cu. The effects of excessive Cu on sugarcane quality mainly expressed in the increases of the rate of juice and reducing sugar and the decrease of fiber content, appropriate Cu fertilizer could increase sugar yield.

Key words: Copper, Sugarcane, Yield, Quality