

修复植物香薷堆肥对缺铜土壤上冬小麦生长和铜吸收的初步研究^①

唐明灯^{1,2}, 吴龙华¹, 李 宁^{1,3}, 骆永明^{1*}, 胡 锋², 张良兴⁴

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3 辽宁大学资源与环境科学学院, 沈阳 110036; 4 浙江省嵊州市甘霖镇政府, 浙江嵊州 312400)

摘 要: 通过堆积腐解处理生长在 Cu 污染土壤上的修复植物—海州香薷, 将其研制成堆肥, 作为基肥施用于缺 Cu 土壤, 以矫正作物缺 Cu 症状。盆栽试验研究了这种堆肥对冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 生长和 Cu 吸收的影响。结果表明, 施用海州香薷堆肥可显著提高生长在缺 Cu 土壤上的小麦的株高、生物量和籽实千粒重。与 CK 相比, 千粒重可提高 58.9%, 籽实产量提高近 1 倍; 而在这种缺 Cu 土壤上单纯施加 N、P、K 化肥, 反而降低小麦生物量和籽实千粒重。可见, 将 Cu 污染土壤上生长的修复植物海州香薷制成堆肥, 施用于缺 Cu 土壤是一种可实现修复植物资源化的有效途径。

关键词: 海州香薷; 堆肥; 小麦; 铜; 植物修复

中图分类号: S147

有机肥是养分全、后效长的全价肥料, 但其养分浓度低、肥效慢^[1], 故常常与化肥混合施用。有机肥的施用不仅能提高作物产量, 还能减少土传病害^[2-3]。有机肥包括堆肥、粪尿肥、饼肥、沼气肥、绿肥等^[4]。微量元素肥料对农业生产增产增收效果显著^[5]。其中 Cu 是生物必不可少的微量元素之一, 是机体内多种酶的组成部分, 它能提高叶绿素的浓度, 增强光合作用, 促进蛋白质的合成, 增强抗逆性, 以及对病害的抵抗力; 作物缺 Cu, 将严重影响产量^[6]。

鉴于土壤重金属污染的普遍性和严重性, 一些发达国家已纷纷制定相应的土壤修复计划。绿色修复—植物修复技术因其费用低廉、环境友好等优势而迅速发展^[7]。我国关于植物修复的报道始于上世纪 90 年代后期^[8], 此后迅速发展^[9-10]。随着植物修复的进行, 修复植物的产后处置逐渐成为人们关心的另一难题和焦点, 至今国际上尚未有很好的解决办法^[11]。

有关堆肥的研究报道很多, 但以 Cu 污染土壤

修复植物—海州香薷作为堆肥原料, 堆制含 Cu 有机肥料的研究则尚未见报道。为探索 Cu 污染土壤修复植物的处置途径, 本文将修复植物海州香薷残体进行腐熟堆制, 腐熟后施用于缺 Cu 土壤, 探索其养分效应, 以期修复植物作为生物有机肥的资源化利用, 并进而为其他重金属污染土壤修复植物的资源化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试海州香薷堆肥

采集海州香薷 (*Elsholtzia splendens* Nakai) 植物, 在 25℃ 恒温培养箱中堆腐 60 天。由于叶片容易腐烂, 而根茎难以腐熟完全, 将香薷叶和根茎分别进行堆积腐化, 得到叶堆肥 (leaf compost, 以“LC”表示) 和根茎堆肥 (stem and root compost, 以“SC”表示), 堆肥作基肥施用。LC 全量 N、P、K 和 Cu 含量分别为 36.3、1.57、24.6 g/kg 和 37.7 mg/kg; SC 全量 N、P、K 和 Cu 含量分别为 11.6、0.30、12.4 g/kg 和 69.7 mg/kg。

①基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2004AA649050)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809)、国家杰出青年基金项目 (40125005、0432005) 和中国科学院知识创新项目 (CXTD-Z2005-4) 资助。

* 通讯作者 (ymhuo@issas.ac.cn)

作者简介: 唐明灯 (1968—), 男, 湖南武冈人, 博士研究生, 主要从事土壤污染植物修复研究。E-mail: mdtang@issas.ac.cn

1.2 供试土壤

土壤采自浙江省嵊州市甘霖镇，为砂岩发育的湿润砂质新成土。取 0~20 cm 表层土壤，风干、

磨碎过 2 mm 尼龙筛，备用。其基本性质见表 1。

参考文献[12]的方法测得其土壤有效态 Cu 含量为 0.35 mg/kg。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Some physio-chemical properties of soil tested

pH 值 (1: 2.5 H ₂ O 浸提)	有机 C (g/kg)	全量 (g/kg)				有效态 (mg/kg)			
		N	P	K	Cu *	N	P	K	Cu*
5.43	6.96	0.835	0.494	29.9	7.93	107	17.9	114	0.35

* 全 Cu 含量单位为: mg/kg

1.3 供试作物

小麦对土壤 Cu 含量较为敏感，是良好的缺 Cu 指示植物^[13]。本试验所选冬小麦品种为长江中下游麦区普遍种植的扬麦 158。

1.4 试验设计与实施

试验共设 6 个处理，分别为：① 对照 (CK)，未施用堆肥或化肥；② 化肥 (F)，施加化学肥料 (尿素、磷酸二氢钙、硫酸钾)，使土壤全量 N、P、K 含量分别达 1.54、0.522 和 30.6 g/kg，且与后面的各处理具有相同的 N、P、K 水平；③ 硝酸铜处理 (Cu-N)，在处理 2 的基础上再施加硝酸铜，施 Cu 量达到 11.6 mg/kg；④ 叶堆肥处理 (Cu-L)，在缺 Cu 土中施加海州香薷叶堆肥 (LC)，相当于施 Cu 量为 8.66 mg/kg，补充 N、P、K，使与处理 ② 相同；⑤ 1 倍根茎堆肥处理 (Cu-S1)，施加海州香薷根茎堆肥，施 Cu 量达到 8.66 mg/kg，N、P、K 总量与处理 ② 同；⑥ 5 倍的根茎堆肥处理 (Cu-S2)，施加的海州香薷根茎堆肥为 Cu-S1 处理的 5 倍，施 Cu 量达到 11.6 mg/kg，N、P、K 总量与处理 ② 同。称取土壤 1.33 kg (烘干重) 及相应的肥料，混合均匀，装入塑料盆 (上缘直径 16 cm，底部直径 11 cm，高 13 cm) 中。2004 年 11 月 30 日播种，每盆播小麦种子 20 粒，去离子水灌溉，每天浇水 2 次，维持土壤含水量为最大田间持水量的 70%，试验每处理重复 4 次，随机排列。2005 年 3 月 9 日对各处理施用追肥 (每盆分别施尿素 1 g、K₂HPO₄ 0.5 g)；2005 年 4 月 25 日 (抽穗期)，采集土壤和植物样品；在小麦成熟期收割，由于各处理成熟时间有差异，2005 年 5 月 15 日收获 Cu-L 和 Cu-S2 处理的土壤和小麦；5 月 24 日收获 CK 的土壤和小麦；5 月 28 日收获 F、Cu-N 和 Cu-S1 处理的土壤和小麦。

1.5 样品采集和处理

于小麦抽穗期 (2005 年 4 月 25 日) 每盆随机

取 4 棵小麦植株，装入已编号的信封，待进一步处理；然后用不锈钢土壤取样器均匀地在每一盆中采 6 个点，取土约 150 g，放入塑料托盘，混合均匀后风干，磨碎过尼龙筛 (重金属有效态和全量分别过 10 目、100 目)，备用。

在小麦成熟期，将小麦和盆栽土壤一并从盆中取出，放入塑料托盘，分散土壤，从中取出小麦全株，尽量少带土，装入已编号的信封，待进一步处理；土壤混合均匀后，风干，磨碎过尼龙筛 (重金属有效态和全量分别过 10 目、100 目)。

将小麦全株样品先用自来水冲洗，后用去离子水冲洗干净，吸水纸吸干水分，再用不锈钢剪刀剪取 1.00 g 旗叶 (成熟期小麦全株除外)，暂存于 -80℃ 冰箱中用于测定小麦叶绿素含量；其余称量鲜重，测量株高，然后置于烘箱中 105℃ 下杀青 30 min，80℃ 下烘干至恒重，用不锈钢粉碎机粉碎 (成熟期小麦茎秆和籽实分别粉碎) 用于小麦全 Cu 含量测定。

1.6 样品测定

土壤有效态 Cu : 0.1 mol/L 盐酸浸提，火焰原子吸收分光光度计测定^[12]。

小麦秸秆及籽实中全量 Cu: 混酸 (83 % HNO₃ 和 17 % HClO₄) 消煮，火焰原子吸收分光光度计测定^[14]。

抽穗期小麦叶绿素含量: 丙酮溶液 [85% v/v 丙酮 + 15% v/v Tris (1% Tris, pH=8.0)] 研磨，丙酮溶液定容，752 型分光光度计测定其 OD₆₄₅ 和 OD₆₆₃ 值，计算叶绿素含量^[15-16]。

1.7 数据整理与统计

试验结果用 Excel 和 SPSS 10.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤有效态 Cu 含量

小麦抽穗期和成熟期土壤中有效态 Cu (HCl 可提取态) 含量见图 1。Cu-N 与 Cu-S2 两处理土壤中有有效态 Cu 含量显著高于其他 4 个处理, 这与这两处理施用的 Cu 量较高有关。相关分析表明, 小麦抽穗期与成熟期有效态 Cu 含量均与处理 Cu 浓度呈显著正相关。

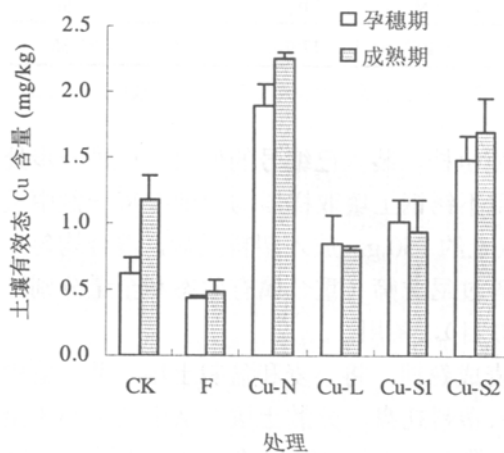


图 1 小麦抽穗期和成熟期土壤 HCl 可提取态 Cu 含量

Fig. 1 Soil HCl extractable Cu concentrations during heading and ripening stage of wheat

2.2 小麦的生长和生理指标变化

施用香薷植物堆肥的几个处理, 小麦各项生理指标均显著 ($p < 0.05$) 高于未施用香薷植物堆肥的各处理 (表 2)。Cu-L 处理比 CK 千粒重提高 58.9%, CK 的千粒重与 F、Cu-N 两处理差异显著, 并且它们抽穗期的叶绿素含量也有显著差异。

小麦在供试土壤的各处理中生长正常。与 CK 相比, 添加香薷植物堆肥处理收获的籽实量提高近 1 倍。统计分析表明, 添加香薷植物堆肥处理极显著 ($p < 0.01$) 地提高了小麦籽实产量。

Cu-N 和 Cu-S2 两处理起始 N、P、K 及 Cu 浓度一致, 但 Cu-S2 处理小麦各项指标均显著高于 Cu-N 处理, 可见施用香薷植物堆肥对植物生长具有明显的促进作用。Cu-L 和 Cu-S1 两处理起始的 N、P、K 及 Cu 浓度一致, Cu-L 处理小麦的千粒重显著高于 Cu-S1 处理, Cu-L 处理平均每盆收获的小麦比 Cu-S1 处理高 25.6%, 两者之间的差异达到极显著水平 ($p < 0.01$)。Cu-S1 和 Cu-S2 处理两处理因添加香薷植物堆肥量不同, 从而 Cu 的起始浓度不同, Cu-S2 处理小麦的千粒重和株高显著高于 Cu-S1 处理, Cu-S2 处理平均每盆收获的小麦籽实产量比 Cu-S1 处理高 21.6%, 两者之间的差异显著 ($p < 0.05$)。

表 2 小麦叶绿素 (抽穗期)、千粒重、籽实量、株高和生物量变化

Table 2 Chlorophyll content (heading), 1000-grain weight, grain yield, plant height and biomass of wheat

处理	叶绿素 a+b (mg/kg)	千粒重 (g)	籽实量 (g/盆)	株高 (cm)		植株生物量 (g/盆)	
				抽穗期	成熟期	抽穗期	成熟期
CK	3.41 ± 0.11 a	21.4 ± 2.0 b	3.28 ± 0.33c	32.9 ± 3.7 bc	35.8 ± 1.4 c	4.23 ± 0.36 b	9.45 ± 0.61 d
F	2.47 ± 0.69 b	16.4 ± 1.1 c	2.28 ± 0.30d	26.1 ± 5.5 c	37.8 ± 2.2 c	3.57 ± 0.64 bc	12.0 ± 1.0 cd
Cu-N	2.52 ± 0.70 b	16.6 ± 2.1 c	2.44 ± 0.34cd	30.6 ± 6.4 bc	36.2 ± 1.7 c	3.04 ± 0.54 c	12.4 ± 1.2 c
Cu-L	3.71 ± 0.49 a	34.0 ± 2.4 a	6.41 ± 0.40a	44.5 ± 2.3 b	44.2 ± 1.7 ab	7.59 ± 0.84 a	17.5 ± 1.4 b
Cu-S1	3.26 ± 0.65 ab	21.2 ± 2.6 b	5.10 ± 0.84b	34.9 ± 2.3 b	41.8 ± 2.6 b	6.89 ± 0.44 a	21.0 ± 1.5 a
Cu-S2	3.94 ± 0.35 a	32.0 ± 0.6 a	6.21 ± 0.85a	47.8 ± 4.6 a	46.7 ± 3.0 a	7.77 ± 1.97 a	17.9 ± 34 b

注: 表中同一列字母相同表示处理之间差异不显著 ($P > 0.05$), 下同。

2.3 小麦 Cu 含量

表 3 为小麦在抽穗期和成熟期植株及籽实 Cu 含量。抽穗期 CK 小麦植株中 Cu 含量最低, 施用硝酸铜和海州香薷堆肥的各处理植株 Cu 含量较 CK 高 39.6% ~ 150%, 并且海州香薷堆肥各处理植物 Cu 浓度与 CK 的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。统计分析显示, 抽穗期小麦叶绿素、株高、植株生物量与各处理的 Cu 含量呈正相关, 而成熟期相关

表 3 小麦植株和籽实中 Cu 含量变化 (mg/kg)

Table 3 Cu content in the plant and grain of wheat

处 理	抽穗期植株	成熟期	
		植株	籽实
CK	9.6 ± 6.5 b	7.1 ± 2.1 b	7.2 ± 2.9 a
F	13.4 ± 6.0 ab	9.1 ± 2.9 ab	7.6 ± 1.9 a
Cu-N	14.0 ± 3.9 ab	12.4 ± 3.3 a	9.7 ± 2.7 a
Cu-L	24.0 ± 2.9 a	5.7 ± 1.4 b	5.1 ± 2.4 a
Cu-S1	20.4 ± 8.3 a	6.8 ± 2.2 b	5.9 ± 2.8 a
Cu-S2	21.1 ± 3.7 a	10.2 ± 3.9 ab	8.5 ± 5.4 a

性不显著。

3 讨论

Cu 在叶绿体中的浓度相当高,对叶绿素和其他色素起稳定作用并参与植物的光合作用。Cu 是叶绿体蛋白质体兰素的组成成分,质体兰素是构成联结光合作用的两个光化系统的电子传递链的一部分。在缺 Cu 土壤上种植小麦时,小麦叶绿素含量降低,叶尖发白乃至“穗而不实”^[6,16]。叶绿素的含量高低直接影响小麦的千粒重,对小麦而言,千粒重这个性状比较稳定,能较真实地反映小麦的营养状况^[17]。经协方差分析得出,小麦叶绿素含量对千粒重产生显著影响。

Graham 等^[18]报道小麦出现缺 Cu 症状是由于土壤有效态 Cu 含量低于 1 mg/kg (0.1 mol/L HCl 浸提),小麦在苗期植株 Cu 含量低于 1 mg/kg 或在灌浆期植株 Cu 含量低于 3 mg/kg。Qin^[19]在嵊州的缺 Cu 土壤田间试验发现类似的情况,而且小麦缺 Cu 症状程度与土壤有效态 Cu 含量呈显著负相关,即在有效态 Cu 含量为 0.35 mg/kg 的缺 Cu 土壤上,小麦出现严重的缺 Cu 症状;有效态 Cu 含量为 0.55 mg/kg 的缺 Cu 土壤上,小麦的缺 Cu 症状减轻,有效态 Cu 含量为 1.08 mg/kg,小麦缺 Cu 症状不明显;缺 Cu 土壤施用 CuSO₄ 后产量的提高与土壤有效态 Cu 含量呈显著正相关,施加 CuSO₄ 增产效应极其显著。本盆栽试验结果与以上两者不一致,土壤有效态 Cu 含量尽管只有 0.35 mg/kg (0.1 mol/L HCl 浸提),但小麦没有明显的缺 Cu 症状,且施加化肥及 Cu (NO₃)₂ 后小麦籽粒不饱满,产量降低,小麦抽穗期和成熟期植株以及籽实的 Cu 含量均超过 3 mg/kg (表 3)。但同时观察到在小麦抽穗期和成熟期土壤的有效态 Cu 含量有不同程度的增加(图 1)。这可能是由于小麦根系分泌酸性物质^[20],促使 Cu 缓慢释放转化为有效态 Cu,供小麦吸收利用,抑或是供试小麦耐缺 Cu 能力与 Qin 等^[19]所选品种不同。

Qin 等^[19]田间试验中有效态 Cu 含量为 1.08 mg/kg 的小区,不仅小麦缺 Cu 症状不明显,而且施加 Cu 的处理效果不显著。本盆栽试验的 F 与 Cu-N 两处理的结果也观察到类似的情况。刘铮等^[21]较早报道过我国土壤微量元素缺乏情况,认为土壤缺 Cu 的原因是土壤含 Cu 量低及土壤的环境条件。Penney 等^[22]报道,外加 N、P 等营养会加剧冬

小麦缺 Cu,导致小麦减产。本试验结果与此相吻合。原因可能与施用尿素等化肥提高了土壤盐分浓度和改变了土壤胶体性质、促使土壤胶体聚沉以及使得土壤板结,从而影响缺 Cu 土壤矿质营养的生物有效性及小麦对水分的吸收,导致小麦养分失衡有关^[23]。

4 小结

施用香薷植物堆肥可显著提高冬小麦的株高、生物量、籽实千粒重。以来自 Cu 污染土壤修复现场、含 Cu 量较高的海州香薷为材料的植物堆肥可为农业生产增效,应用修复植物进行堆腐资源化利用的途径是可行的,同时也为 Cu 污染土壤修复植物的资源化利用这一难题的解决提供了可能的途径。

在缺 Cu 土壤上单纯施用 N、P、K 化肥,不配施有机肥,不仅不会增产,反而会降低产量。香薷植物堆肥兼有农家肥和微量元素肥料的优点,更适合施用到缺 Cu 的耕地土壤,与 N、P、K 化肥配施效果可能会更好。

参考文献:

- [1] 刘桂芬,李艳华. 合理利用有机肥的技术措施. 内蒙古农业科技. 1998 (增刊): 189-190
- [2] 李洪连,黄俊丽,袁红霞. 有机改良剂在防治植物土传病害中的应用. 植物病理学报, 2002, 32 (4): 289-295
- [3] Tilston EL, Pitt D, Fuller MP, Groenhof AC. Compost increases yield and decreases take-all severity in winter wheat. Field Crops Research, 2005, 94 (2/3): 178-188
- [4] 马镜波. 畜禽粪便无害化处理制商品有机肥及有机无机复混肥. 磷肥与复肥, 1998, 5: 49-51
- [5] 周可金,马成泽. 微肥配施对花生产量与效益的影响. 中国油料作物学报, 2003, 25 (3): 76-78
- [6] 秦遂初,骆永明,黄昌勇,吴政,竺陆春. 小麦缺铜不实与花粉淀粉积累的关系. 作物学报, 1994, 20 (4): 453-456
- [7] Baker AJM, McGrath SP, Sidoli CMD, Reeves RD. The possibility of *in-situ* heavy-metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. Resources Conservation and Recycling, 1994, 11 (1-4): 41-49
- [8] 唐世荣,黄昌勇,朱祖祥. 利用植物修复污染土壤研究进展. 环境科学进展, 1996, 4 (6): 10-16

- [9] 吴龙华, 骆永明. 铜污染土壤修复的有机调控研究 III-EDTA 和低分子量有机酸的效应. 土壤学报, 2002, 39 (5): 679-685
- [10] Weng GY, Wu LH, Wang ZQ, Luo YM, Christie P. Copper uptake by four *Elsholtzia* ecotypes supplied with varying levels of copper in solution Culture. *Environment International*, 2005, 31 (6): 880-884
- [11] Sas-Nowosielska A, Kucharski R, Malkowski E, Pogrzeba M, Kuperberg JM. Phytoextraction crop disposal—an unsolved problem. *Environmental Pollution*, 2004, 128: 373-379
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-14, 211
- [13] 黄增奎, 徐素君, 方桂鑫, 娄峰. 浙江省土壤有效态微量元素含量和微肥应用. 土壤肥料, 1995, 3: 28-32
- [14] Zhao FJ, McGrath SP, Crosland AR. Comparison of three wet digestion methods for the determination of plant sulphur by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25: 407-418
- [15] Cleon WR. *Plant Physiology Laboratory Manual*. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1974
- [16] 蒋德安. 植物生理学实验指导. 四川: 成都科技大学出版社, 1999: 22-23
- [17] 胡延吉. 两个不同适应性冬小麦品种的竞争能力. 作物学报, 2003, 29 (2): 175-180
- [18] Graham RD, Nambiar EKS. Advance in research on copper deficiency in cereals. *Australia Journal of Agriculture Research*, 1981, 32: 1009-1037
- [19] Qin SC, Luo YM, Huang CY, Wu Z, Zhu LC. Study on “Blind-Ear”-copper deficiency symptom in wheat on subtropic hill soils. *Pedosphere*, 1992, 2 (1): 85-92
- [20] Marschner H, Romheld V, Horst WJ, Martin P. Root induced changes in the rhizosphere: importance for mineral nutrition of plants. *Z. Pflanzenernachr. Bodenk.*, 1986, 149: 441-456
- [21] 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 徐俊祥, 尹楚良. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布. 土壤学报, 1982, 19 (3): 209-221
- [22] Penney DC, Solbeng ED. Proceeding of the International Symposium on the Role of Sulphur Magnesium and Micronutrients in Balanced Plant Nutrient. 1991, 273-280
- [23] 郑树亮, 黑恩成. 应用胶体化学. 上海: 华东理工大学出版社, 1996

Preliminary Study on Effect of *Elsholtzia Splendens* Compost on Plant Growth and Cu Uptake by Winter Wheat in a Cu-Deficient Upland Soil

TANG Ming-deng^{1,2}, WU Long-hua¹, LI Ning^{1,3}, LUO Yong-ming¹, HU Feng², ZHANG Liang-xing⁴

(1 *Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*

3 *College of Resources and Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036;*

4 *Government of the Ganlin Town in Shengzhou City, Zhejiang Province, Shengzhou, Zhejiang 312400, China)*

Abstract: A pot experiment was conducted to examine the effect of compost from *Elsholtzia splendens* on growth and Cu uptake of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a Cu-deficient soil. Results showed that application of the compost significantly increased plant height, biomass and 1000-grain weight. The compost increased 1000-grain weight by 58.9% and grain yield by one fold compared to those of the control. Simply amendment of chemical fertilizer to the Cu deficient soil decreased wheat 1000-grain weight and grain biomass. The results indicated that composting *Elsholtzia splendens* grown in a Cu-contaminated soil and then applying the compost to a Cu-deficient soil is a feasible and effective way.

Key words: *Elsholtzia splendens*, Compost, Winter wheat, Cu, Phytoremediation