

农艺措施对苹果幼树长期低剂量铜胁迫的影响及缓解效果分类

孙百晔¹, 阚世红², 刘春生³, 张延宗¹, 伍 钧¹

(1. 四川农业大学资源环境学院农业环境工程四川省重点实验室, 四川 雅安 625014; 2. 潍坊学院生物工程学院, 山东 潍坊 261061; 3. 山东农业大学资源环境学院, 山东 泰安 271018)

摘 要:为探讨农艺措施对铜胁迫苹果树毒害效应的缓解效果,利用长期盆栽试验(600 d),研究了棕壤上介于我国土壤环境质量二、三级标准间的低剂量铜胁迫下,钙(CaCO_3)、铁(FeSO_4)、钾(K_2SO_4)以及半腐熟鸡粪(CM)对苹果幼树生长和果实铜积累的影响。结果表明,320 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铜胁迫 600 d 导致苹果树春梢萌动迟缓,生物量、果实数量下降,果实铜含量升高($P<0.05$)。施加 CaCO_3 对铜胁迫苹果树的生长(新梢萌发和果实数量)有明显的缓解效果,并降低果实铜含量($P<0.05$),降低通过食物链危害人类健康的风险。 K_2SO_4 虽能够缓解铜胁迫对总生物量的抑制作用,却导致果实数量减少,果实铜含量增高($P<0.05$)。 FeSO_4 和 CM 对于植株生物量和果实数量没有明显的缓解作用($P>0.05$),但能降低果实铜含量($P<0.05$)。综合考虑对果树生长和人类食品安全的影响,将缓解效果分为“安全的解毒”、“安全的不解毒”、“危险的解毒”和“危险的不解毒”4类。 K_2SO_4 属于“危险的解毒”,在农用棕壤上应慎用; FeSO_4 和 CM 属“安全的不解毒”; CaCO_3 属于“安全的解毒”,具有较好的缓解毒害和降低食品安全风险的效果。

关键词:铜毒害;缓解;苹果树;钙;铁;钾;鸡粪;食品安全

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0251-07

Effects of Agronomic Measures on Long-term Toxicity of Low-dose Copper for Apple Trees and Classification of Amelioration

SUN Bai-ye¹, KAN Shi-hong², LIU Chun-sheng³, ZHANG Yan-zong¹, WU Jun¹

(1. Agro-Environmental Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2. Bioengineering Institute, Weifang University, Weifang 261061, China; 3. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: To study the amelioration effects of agronomic measures for Copper (Cu) toxicity on apple trees [*Malus pumila* Mill (OBIR-2T-47)/*M. micromalus* Makino] in brown soils, 600 d soil culture experiments were done. Cu level was 320 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (between the second and the third level of soil environmental quality standard), and calcium (CaCO_3), iron (FeSO_4), potassium (K_2SO_4), and chicken manure (CM) were applied to alleviate the toxicity. Cu treatment delayed the growth of branches, decreased plant biomass and fruit amount, and increased fruit Cu content ($P<0.05$). Compare with Cu treatment, addition of CaCO_3 lowered the delay of branch growth, increased fruit amount, and declined fruit Cu content significantly ($P<0.05$); Addition of K_2SO_4 raised plant biomass, made fruit amount decline, and increased fruit Cu concentration; FeSO_4 and CM did not show obvious amelioration on growth, just lowered fruit Cu content. Take the impact on both plant growth and food safe (fruit Cu content in the present study) into account, amelioration effect can be classified into 4 groups: “safe amelioration”, “safe non-amelioration”, “dangerous amelioration”, and “dangerous non-amelioration”. K_2SO_4 belongs to the “dangerous amelioration” class, and should be used with caution in Cu contaminated brown soils. FeSO_4 and CM belong to the “safe non-amelioration” class. And CaCO_3 belongs to “safe amelioration”, alleviating plant toxicity and lowering human health risk.

Keywords: Cu toxicity; alleviation; apple trees; Ca; Fe; K; chicken manure; food safety

收稿日期: 2009-08-27

基金项目: 四川省教育厅重点项目(08ZA073, 08ZA057); 潍坊学院自然科学理论研究项目青年项目(2008Z021)

作者简介: 孙百晔(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤重金属污染生态毒理学和海洋赤潮发生的生态学机制。E-mail: bys298@yahoo.com.cn

含铜杀菌剂、污水灌溉以及含铜污泥和厩肥的施用,导致果园土壤重金属铜积累^[1-2]。我国很多苹果园表层土壤铜含量在土壤环境质量标准规定的果园二级或三级标准值附近(二级标准依据土壤 pH 不同在 150~200 mg·kg⁻¹,三级标准为 400 mg·kg⁻¹)^[3]。然而果树作为多年生植物,长期在土壤环境质量二级标准附近的低量铜胁迫仍会对果树生长产生胁迫^[4],进而影响果园生态系统的健康和果品生产的食品安全。施肥等农艺措施会影响污染土壤重金属的生物有效性和植物毒性,可以作为缓解重金属毒害、农业产地禁产区“边生产、边修复、边监测”综合防治途径、以及农产品安全生产和农产品产地可持续发展的措施^[5]。钙和铁对铜的毒性具有拮抗作用^[6],钾是植物生长必需的大量元素、同时也是一种与增强抗逆性有关的元素^[7],生物有机肥对重金属具有螯合作用,而不同大小的有机质分子对重金属的生物毒性具有缓解和加重毒害的双重作用,其效果与有机肥种类、施用时间长度、以及土壤特性等因素有关^[8-9]。研究表明,钙、铁、有机肥能够不同程度地缓解植物铜毒害^[8,10-12],对于苹果树而言,钙和铁有缓解褐土上苹果树铜毒害的作用^[13],然而在棕壤上的效果如何,以及钾和鸡粪(在一些苹果产区有施用养殖场鸡粪的习惯)的效果如何尚不清楚。本研究针对这一问题,研究棕壤上长期低剂量铜胁迫下,铁、钙、钾以及半腐熟鸡粪对苹果幼树生长、果实产量及品质的影响,以期为重金属铜污染果园土壤的科学利用,以及果品生产食品安全的保障提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽用土为棕壤,轻粘质,pH5.5,有机质含量 8.9 g·kg⁻¹,全 Cu(HNO₃-HClO₄-HF 消煮)28.8 mg·kg⁻¹,有效 Cu(DTPA 浸提)7.37 mg·kg⁻¹。以一年生藤木一号苹果嫁接苗(砧木为八棱海棠)为试材。

1.2 试验设计

根据我国土壤环境质量标准^[3],pH<6.5 的果园土壤二级标准为 150 mg·kg⁻¹,三级标准(pH>6.5)为 400 mg·kg⁻¹。本研究设 2 个施铜(Cu)水平,以单质 Cu 计,分别为 0(对照)和 320 mg·kg⁻¹,依次用 Cu0、Cu320 表示。

在 Cu320 的基础上分别施加铁(Fe)、钙(Ca)、钾(K)和半腐熟鸡粪(CM)。施加量确定的依据是,铁参考苹果树缺铁时土壤施用硫酸亚铁的量,钙、钾和鸡粪参考正常栽培的基肥施用量,具体如下:

(1)Fe 施入量:苹果树缺铁时推荐的硫酸亚铁基肥施用量是 2~4 kg·株⁻¹^[4],约为单质铁 180~360 mg·kg⁻¹(按每株果树占地 10 m² 估算)。据此本试验 Fe 设两个水平,以单质 Fe 计,分别为 200 和 400 mg·kg⁻¹,分别用 Fe200 和 Fe400 表示。

(2)Ca 施入量:pH 为 5.0~6.0 的土壤(壤土和粘土)Ca(OH)₂ 施用量在 750~1 875 kg·hm⁻²^[15],约为单质钙 180~450 mg·kg⁻¹(按照 2 250 000 kg·hm⁻² 土壤估算)。据此设 2 个 Ca 水平,以单质 Ca 计,分别为 200 和 400 mg·kg⁻¹,分别用 Ca200 和 Ca400 表示。

(3)K 施入量:苹果栽培中钾肥的推荐基肥施用量为单质钾 2 250 kg·hm⁻²^[16],约为 0.2 g·kg⁻¹(K₂O,按照 2 250 000 kg·hm⁻² 土壤估算)。据此确定 K 的施加量(以 K₂O 计),为 0.2 g·kg⁻¹,用 K 表示。

(4)CM 施入量:苹果栽培中发酵鲜鸡粪的推荐基肥施用量为 37 500 kg·hm⁻²^[16],约为干鸡粪 5 g·kg⁻¹(按照 2 250 000 kg·hm⁻² 土壤,发酵鲜鸡粪含水量 30%估算),确定实验鸡粪的施加量为 5 g·kg⁻¹(干基),用 CM 表示。

试验设 Cu0、Cu320、Fe200、Fe400、Ca200、Ca400、K、CM 共计 8 个处理,每个处理设 7 次重复。Cu 以 CuSO₄·5H₂O 的形式,铁、钙、钾分别以 FeSO₄·7H₂O、CaCO₃ 和 K₂SO₄ 的形式,CM 以风干的半腐熟鸡粪的形式施加。同时施加肥底(N:P₂O₅:K₂O=1:1:1,按 0.1 g·kg⁻¹ N 的量施入)。与土壤充分搅拌均匀后,在田间持水量下平衡 40 d 后,进行盆栽试验。

1.3 盆栽及测定方法

选取生长一致的一年生苹果幼树,栽入 25 cm×30 cm 的盆钵中,每盆装土 17 kg,栽入 1 棵果树幼树,于 2000 年 3 月 8 日移栽,2001 年 10 月 30 日收获,总培养时间为期 600 d。试验在网室中进行,植株随机排列,生长过程中进行常规管理,保持土壤湿润,并于每年春秋两季追施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=1:1:1)。植株在自然光照下生长,培养期间的光照强度为(1 355±704)MJ·m⁻²·d⁻¹,气温为(17.4±9.8)℃。有关数据由国家气象信息中心提供。

每年春季春梢快速生长期用精确度为 0.1 cm 的尺子测量各主枝的长度,每 3 d 测量一次,前后两次测量结果之差为相应的新梢生长量。

果树在 2001 年开花结果,期间记录每株果树的果实个数。果实成熟后采摘,重蒸水洗净后,用不锈钢刀片将果皮和果肉分离,在 70℃烘干,不锈钢磨样器研磨,过 0.25 mm 筛。样品根据 Brun 等^[17]的方法,浓

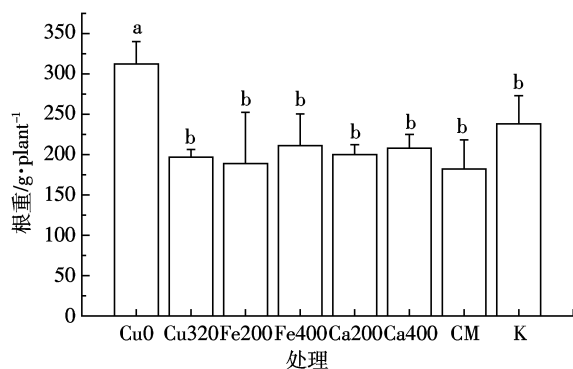
HNO₃ 消煮后,原子吸收分光光度计(AAS;WFX-IE2)测定果皮和果肉的铜含量。

果树收获后,将植株洗净,吸水纸吸干,百分之一天平称重,分别获得果树的根重、地上部重,二者之和为植株总生物量。

2 结果与分析

2.1 铁、钙、钾、鸡粪对长期铜胁迫下苹果幼树根重的影响

培养 600 d 后,苹果树的根重如图 1。结果表明,土壤施铜 320 mg·kg⁻¹ 导致根系生长受到抑制,根重显著低于正常植株(Cu0; $P < 0.05$)。Fe、Ca、CM、K 处理的根重仍显著低于正常植株,且与 Cu320 处理的没有显著差异($P > 0.05$)。说明棕壤施用 FeSO₄、CaCO₃、CM、K₂SO₄ 不能缓解铜胁迫对苹果树根系生长的抑制。



图中数据为均值±SD。不同的字母表示差异显著(LSD; $P < 0.05$),下同。

Cu0 为对照, Cu320 为施加 CuSO₄ 320 mg·kg⁻¹ (Cu) 的铜胁迫处理; Fe200 和 Fe400 表示在 Cu320 的基础上施加 FeSO₄ 200 mg·kg⁻¹ 和 400 mg·kg⁻¹ (Fe); Ca200 和 Ca400 表示在 Cu320 的基础上施加 CaCO₃ 200 mg·kg⁻¹ 和 400 mg·kg⁻¹ (Ca); CM 和 K 分别表示在 Cu320 的基础上施加半腐熟鸡粪 5 g·kg⁻¹ 和 K₂SO₄ 0.2 g·kg⁻¹ (K₂O)。下同。

图 1 FeSO₄、CaCO₃、K₂SO₄、鸡粪(CM)对长期铜胁迫下苹果树根重的影响

Figure 1 Effects of FeSO₄, CaCO₃, K₂SO₄, and chicken manure (CM) on root biomass of long-term Cu-stressed apple trees

2.2 铁、钙、钾、鸡粪对长期铜胁迫下苹果幼树总生物量的影响

由图 2 可知, Cu320 处理的藤木一号苹果树总生物量比正常植株(Cu0)显著下降($P < 0.05$), 只有 Cu0 的 67%。Fe、Ca、CM 处理的总生物量与 Cu320 处理没有显著差异($P > 0.05$), 且仍显著低于 Cu0 处理($P < 0.05$)。说明棕壤施用 FeSO₄、CaCO₃、CM 不能有效地缓解铜对苹果树总生物量的抑制作用。

K 处理的总生物量显著高于 Cu320 处理 ($P <$

0.05), 比 Cu320 处理增加 26%, 且与 Cu0 处理没有显著差异($P > 0.05$)。说明棕壤施用 K₂SO₄ 可以有效缓解铜对苹果树总生物量的抑制作用。

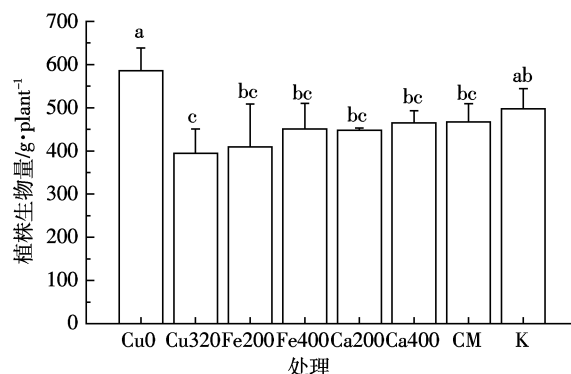


图 2 FeSO₄、CaCO₃、K₂SO₄、鸡粪(CM)对长期铜胁迫下苹果树生物量的影响

Figure 2 Effects of FeSO₄, CaCO₃, K₂SO₄, and chicken manure (CM) on plant biomass of long-term Cu-stressed apple trees

2.3 铁、钙、钾、鸡粪对长期铜胁迫下苹果新梢萌发的影响

藤木一号苹果树一般在 5 月份进入春梢快速生长期。对其新梢生长的动态监测发现, 各处理苹果树开始进入春梢快速生长期的时间被不同程度地推迟。为了量化这种延缓效应, 用进入春梢快速生长期的相对时间来表示, 即各处理进入春梢快速生长期日期距正常植株进入日期的天数。用下式计算:

$$R_d = D_{\text{treatment}} - D_{\text{control}} \quad (\text{方程 1})$$

式中: R_d 表示进入春梢快速生长期的相对时间, 单位 d; $D_{\text{treatment}}$ 和 D_{control} 分别表示处理和对照植株 (Cu0) 进入春梢快速生长期的日期。先于对照进入的 R_d 为负值, 晚于对照的为正值。 R_d 值越大, 说明其进入春梢快速生长期的时间越晚。

如图 3 所示, Cu320 处理的 R_d 值为 37 d, 且显著高于正常植株(Cu0; $P < 0.05$), 说明 320 mg·kg⁻¹ 的铜抑制了春梢生长发育, 进入春梢快速生长期的时间比正常植株延迟 37 d。Fe、K、CM 处理的 R_d 值与 Cu320 处理的没有明显的差异($P > 0.05$), 说明在棕壤上 FeSO₄、K₂SO₄、CM 不能有效地缓解铜胁迫对春季新梢生长的抑制作用。另外值得一提的是, Fe200 处理的 R_d 值非但没有降低, 反而显著增加($P < 0.05$), 进入春梢快速生长期的时间比 Cu320 处理延迟 16 d, 说明棕壤上 200 mg·kg⁻¹ (Fe) 的 FeSO₄ 不但没有缓解铜对春梢生长的胁迫, 反而使之加剧。

Ca 处理的 R_d 值均显著低于 Cu320 处理的 ($P <$

0.05),但并未达到正常植株(Cu0)水平($P<0.05$),Ca200 和 Ca400 处理分别仍比 Cu0 推迟 6 和 12 d。说明在棕壤上 CaCO_3 能够缓解铜胁迫对春梢生长的抑制,但是不能完全解除。

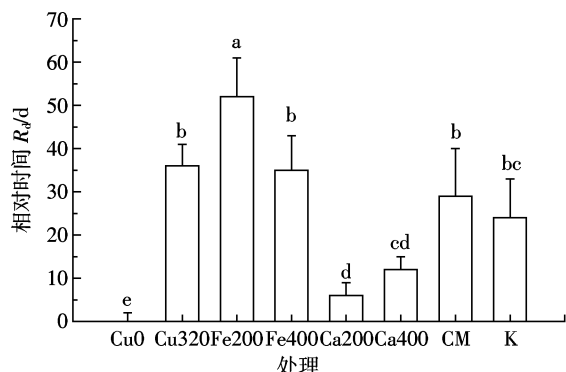


图3 FeSO_4 、 CaCO_3 、 K_2SO_4 、鸡粪(CM)对长期铜胁迫下苹果树进入春梢快速生长期相对时间的影响

Figure 3 Effects of FeSO_4 , CaCO_3 , K_2SO_4 , and chicken manure (CM) on relative starting date of branch rapid growth of long-term Cu-stressed apple trees

2.4 铁、钙、钾、鸡粪对长期铜胁迫下苹果幼树果实数量的影响

单株果树的果实数量如图4。结果表明,Cu320处理果树的果实数量低于正常植株(Cu0),仅有Cu0处理的50%左右。说明 $320\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铜会导致苹果座果数量减少,可能会影响苹果的产量。

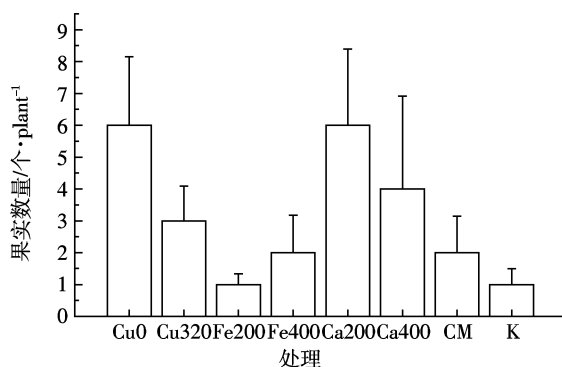
Ca处理的单株果实数量高于Cu320处理,其中以Ca200效果最好,达到正常植株水平。说明在棕壤上 CaCO_3 能够缓解铜对苹果树座果数量的抑制,恰当的施加量甚至可以解除抑制。

Fe、K、CM处理的单株果实数量均低于Cu320,其中Fe200和K只有Cu320处理的30%左右。说明在棕壤上这3种物质非但不能缓解铜胁迫对苹果树果实数量的抑制,甚至会加剧其抑制效应。

2.5 铁、钙、钾、鸡粪对长期铜胁迫下苹果幼树果实铜含量的影响

苹果果实的果皮(外果皮)和果肉(中果皮)铜含量如图5。结果表明,Cu320处理果皮和果肉铜含量均比Cu0显著升高($P<0.05$),分别约是Cu0处理的4倍和3倍。说明铜胁迫导致铜在苹果果实中积累,具有通过食物链威胁人体健康的潜在风险。

Fe、CM处理果皮和果肉铜含量均显著低于Cu320处理($P<0.05$),但未达到Cu0水平,说明这两种物质能够有效降低铜胁迫引起的果实中铜的积累,



图中误差棒为SE。

图4 FeSO_4 、 CaCO_3 、 K_2SO_4 、鸡粪(CM)对长期铜胁迫下苹果树果实数量的影响

Figure 4 Effects of FeSO_4 , CaCO_3 , K_2SO_4 , and chicken manure (CM) on fruit amount of long-term Cu-stressed apple trees

但不能完全消除。

Ca处理果皮和果肉铜含量也均显著低于Cu320处理,而且Ca200处理果皮铜含量和Ca400处理的果肉铜含量达到Cu0水平($P>0.05$)。说明 CaCO_3 能够更好地抑制铜胁迫造成的果实铜积累,而且恰当的施

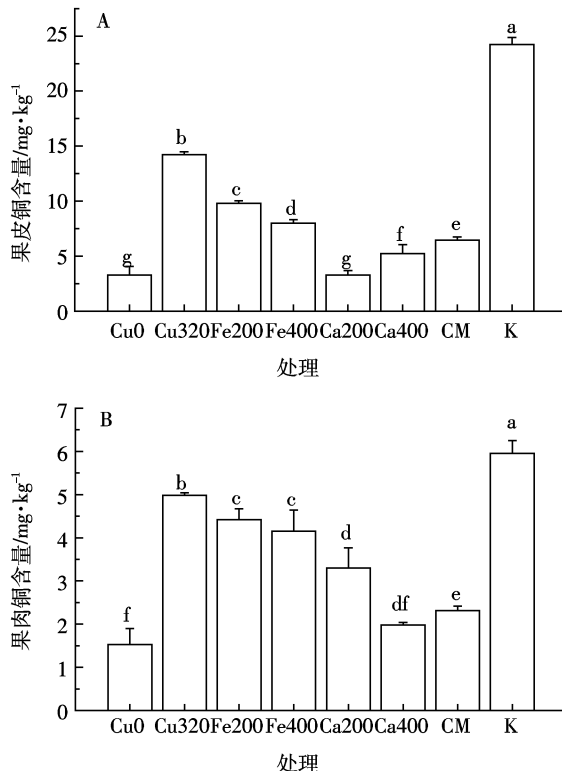


图5 FeSO_4 、 CaCO_3 、 K_2SO_4 、鸡粪(CM)对

长期铜胁迫下苹果果皮(A)和果肉(B)铜含量的影响

Figure 5 Effects of FeSO_4 , CaCO_3 , K_2SO_4 , and chicken manure (CM) on fruit pericarp(A) and mesocarp(B) Cu content of long-term Cu-stressed apple trees

入量会达到消除危害的效果。

K 处理果皮和果肉的铜含量不仅没有降低,反而分别比 Cu320 处理增高约 70%和 19%($P<0.05$)。说明 K_2SO_4 非但不能降低,反而会增加铜污染导致的果实铜积累,增加通过食物链危害人体健康的风险。

3 讨论

3.1 缓解效果比较

钙是植物生长必需的大量元素,与铜之间有拮抗作用,而且作为第二信使与钙调蛋白(CaM)结合参与信号转导过程,参与植物对逆境的应答反应^[18]。同时,施加 $CaCO_3$ 往往由于提高土壤 pH 降低了铜的生物有效性而缓解对植物的毒害^[19]。施加 $CaCO_3$ 能够显著增加铜污染土壤上水稻的生物量,并降低籽粒铜含量^[8];能缓解土壤铜毒害对粗皮柠檬(rough lemon; *Citrus jambhiri*)植株生物量的抑制^[10],但是不能缓解对印度酸桔(cleopatra mandarin; *Citrus reticulata*)生物量的抑制;本研究中 Ca 虽然对藤木一号苹果树生物量没有显著缓解效果,但是显著缓解了铜对新梢萌发的延缓和对果实数量的抑制。同一种物质缓解效果在不同植物种类上的差异可能与植物的生理特性差异有关。

铁是多种酶的辅基,并参与叶绿素的合成。铁和铜之间具有拮抗作用。水培试验发现,铁能够降低铜对菠菜根长和生物量的抑制^[2]。在褐土上的盆栽试验发现,铁能部分缓解铜对红富士苹果树生物量的抑制,虽不能完全消除毒害,但解毒效果好于 $CaCO_3$ ^[13]。然而本研究是在棕壤上进行,铁对苹果树生物量没有明显的缓解效果,而且效果不及 $CaCO_3$ 。这种差异可能与土壤性质的差异有关。与棕壤相比,褐土的钙含量水平高,土壤 pH 高,铁的生物有效性较低,所以在褐土上施加铁往往有效,且解毒效果好于钙;而与褐土相比,棕壤的钙含量水平较低,土壤 pH 低,铁的生物有效性较高,所以在棕壤上钙的解毒效果好于铁。

同时,缓解效果还受缓解物质施入量的影响。 $CaCO_3$ 和猪粪不同的施加量对水稻生物量和籽粒产量的重金属毒害缓解效果均存在差异^[8]。本研究中 $FeSO_4$ 和 $CaCO_3$ 不同的施入量表现出不同的效果, Fe_{200} 甚至加剧铜对春梢生长的抑制作用;在增加果实数量和降低果皮铜含量方面, Ca_{200} 的效果好于 Ca_{400} ($P<0.05$),而在降低果肉铜含量方面, Ca_{400} 的效果好于 Ca_{200} ($P<0.05$)。所以,在实践应用中应该根据植物、土壤及投加物质的特性,确定缓解物质种类和适宜的施加量,而关于施加剂量与“解毒”效应的

关系尚需进一步深入研究。

土壤中有有机质对重金属具有螯合作用,但由于分子大小不同的有机质对重金属生物有效性具有决然不同的影响。大分子有机质不易被生物吸收而将重金属固定在土壤中,小分子有机质易被植物吸收反而增强环境重金属的生物毒性^[20-21],所以有机肥具有缓解和加重毒害的双重作用,其效果与有机肥种类,施用时间以及土壤特性等因素有关^[9]。研究发现猪粪能够显著增加铜污染土壤上水稻的生物量和产量,并能有效降低籽粒铜含量^[8],泥炭土能够完全解除铜对菠菜的毒害作用^[22]。本研究表明,在棕壤上鸡粪对苹果树生长(生物量,果实数量)的缓解作用不明显,但能够有效降低果实铜含量,降低对人体健康的风险。

K 是植物生长必需的大量元素,同时能够提高植物的抗逆性。Alam 等^[7]的研究发现, K 通过离子拮抗作用,能够缓解 Mn 对大麦的胁迫。本研究中 K 能够有效缓解 Cu 对苹果树生物量的抑制,与 Alam 等^[7]的研究结果一致。但是 Alam 等^[7]并没有研究 K 对籽粒重金属含量的影响,而本研究却发现 K 导致果实重金属含量进一步增加。

3.2 缓解效果分类

$CaCO_3$ 、 $FeSO_4$ 、 K_2SO_4 、鸡粪是农艺措施中常用的肥料或土壤改良物料,就缓解苹果树铜毒害而言,它们在棕壤上的效果存在差异。其中, $CaCO_3$ 对生长(新梢萌发和果实数量)有明显的缓解效果,并且能够明显降低果实铜含量,从而降低重金属铜通过食物链对人体健康的威胁,提高果品品质和食品安全。 K_2SO_4 虽能够明显缓解铜胁迫对营养生长(植株总生物量)的抑制作用,却导致果实数量减少,特别是导致果实铜含量增高。 $FeSO_4$ 和 CM 对生长(植株生物量、果实数量)没有明显的缓解作用,但能降低果实铜含量。

对于农业用地来讲,结合农艺措施对污染土壤进行修复或安全使用,不仅要考虑对作物生长的解毒效果,还要考虑对农产品食品安全(如本研究中的果实铜含量)的影响。如果综合考虑这两方面的因素,可以把缓解效果分为 4 类(表 1):

(1)安全的解毒:全部或部分地缓解污染物胁迫对作物生长(包括营养生长和生殖生长)的抑制,且能够降低食用器官(如果实、籽粒)的污染物含量,不会通过食物链对人类健康造成威胁。

(2)安全的不解毒:不能缓解(甚至加剧)污染物对生长的抑制,但能够降低食用器官污染物含量。

(3)危险的解毒:全部或部分缓解对生长的抑制,

表 1 农业用地上修复物质对污染物毒害效应的缓解效果分类

Table 1 Classification of amelioration of contaminant toxicity on plant on cropland

	能否缓解污染物胁迫对作物生长 (包括营养生长和生殖生长)的抑制	能否降低污染物胁迫下食用器官 (如果实)的污染物含量	作为农业用地污染土壤“边生产、边修复” 综合防治措施的应用价值
安全的解毒	能	能	好
安全的不解毒	不能	能	一般
危险的解毒	能	不能降低,或导致升高	无(应该指出,在非农业用地上具有应用价值)
危险的不解毒	不能	不能降低,或导致升高	无

但不能降低(甚至增加)食用器官污染物含量。

(4)危险的不解毒:不能缓解(甚至加剧)对生长的抑制,也不能降低(甚至增加)食用器官污染物含量。

这 4 种解毒类型的划分,具有重要的实践指导意义,尤其是对于结合施用化学物料、有机肥料等农艺措施缓解农业用地的重金属毒害,对农业产地禁产区“边生产、边修复、边监测”综合防治途径的探索,以及对农产品的安全生产和产地的可持续发展具有重要的价值。本研究中,CaCO₃ 属于“安全的解毒”;FeSO₄ 和 CM 属于“安全的不解毒”;而 K₂SO₄ 属于“危险的解毒”。进一步讲,在选择农用地修复措施时,应该选择“安全的解毒”物质,如本研究中的 CaCO₃,而不能选择“危险的解毒”物质,如本研究中的 K₂SO₄。

4 结论

320 mg·kg⁻¹ 铜胁迫 600 d 导致苹果树生物量、果实数量显著下降,果实铜含量显著升高。在 320 mg·kg⁻¹ 铜处理的基础上,施加 CaCO₃、FeSO₄ 和半腐熟鸡粪对生物量均无显著缓解效果,但能够显著降低果实铜含量,CaCO₃ 还能够显著增加果实数量;施加 K₂SO₄ 虽能够明显缓解铜胁迫对生物量的抑制作用,却导致果实铜含量显著升高。综合考虑对作物生长和食品安全的影响,将缓解效果分为“安全的解毒”、“安全的不解毒”、“危险的解毒”、“危险的不解毒”。在棕壤上缓解苹果树铜毒害时,K₂SO₄ 属于“危险的解毒”,应当慎用;FeSO₄ 和 CM 属“安全的不解毒”;CaCO₃ 属于“安全的解毒”,具有较好的缓解毒害和降低食品安全风险的效果。

参考文献:

[1] Li W, Zhang M, Shu H. Distribution and fractionation of copper in soils of apple orchards[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2005, 12(3): 168–172.

[2] Tiller K G, Merry R H. Copper pollution of agricultural soils[C]//*Copper in Soils and Plants*. J F Loneragan, Robson A D, Graham R D, Editors. Sydney: Academic Press, 1984: 119–137.

[3] GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].

GB 15618—1995. Environmental quality standard for soils[S].

[4] 阙世红, 孙百晔, 刘春生. 棕壤中长期低剂量铜胁迫对苹果幼树的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 38–42.

KAN S H, SUN B Y, LIU C S. Toxic effects of long-term low-dose copper (Cu) stress on apple trees in brown soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 38–42.

[5] 唐世荣, 高尚宾, 丁永祯, 等. 我国农业环境研究中值得关注的几个科学问题[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 1–7.

TANG S R, GAO S B, DING Y Z, et al. Some scientific issues concerning the agro-environmental research in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 1–7.

[6] Vardaka E, Cook C M, Lanaras T. Interelemental relationships in the soil and plant tissue and photosynthesis of field-cultivated wheat growing in naturally enriched copper soils[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(4): 441–453.

[7] Alam S, Akiha F, Kamei S, et al. Mechanism of potassium alleviation of manganese phytotoxicity in barley[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(5): 889–901.

[8] Li P, Wang X, Zhang T, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4): 449–455.

[9] 王玉军, 窦森, 李业东, 等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 913–917.

WANG Y J, DOU S, LI Y D, et al. Speciation change of heavy metals during composting process of chicken manure[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 913–917.

[10] Alva A K, Graham J H, Tucker D P H. Role of calcium in amelioration of copper phytotoxicity for citrus[J]. *Soil Science*, 1993, 155: 211.

[11] Kinraide T B, Pedler J F, Parker D R. Relative effectiveness of calcium and magnesium in the alleviation of rhizotoxicity in wheat induced by copper, zinc, aluminum, sodium, and low pH[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1): 201–208.

[12] Ouzounidou G, Ilias I, Tranopoulou H, et al. Amelioration of copper toxicity by iron on spinach physiology[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21: 2089–2102.

[13] 常红岩. 土壤铜过量对苹果树生长、代谢及营养元素吸收的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2000.

CHANG H Y. Effect of excessive copper in soil on growth, metabolism and nutritional elements uptake of apple trees[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2000.

[14] 姜远茂, 彭福田, 巨晓棠. 果树施肥新技术[M]. 北京: 中国农业出版

- 社, 2002:224.
- JIANG Y M, PENG F T, JU X T. New techniques of fruit tree fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002:224.
- [15] 孙 羲. 植物营养原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997:358.
- SUN X. Principle of plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997:358.
- [16] 凌 巧. 红富士苹果优化施肥技术[EBOL]//哈尔滨: 中国化肥网, 2008-09-02 [2009-08-25]. <http://www.fert.cn/news/2008/9/2/2008921683920758.shtml>
- LING Q. Optimal fertilization techniques of Hong Fushi apple tree [EBOL]//Haerbin: China Fertilizer Net, 2008-09-02 [2009-08-25]. <http://www.fert.cn/news/2008/9/2/2008921683920758.shtml>
- [17] Brun L A, Maillet J, Hinsinger P, et al. Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils[J]. *Environ Pollut*, 2001, 111(2):293-302.
- [18] 谢玉明, 易干军, 张秋明. 钙在果树生理代谢中的作用[J]. 果树学报, 2003, 20(5):369-373.
- XIE Y M, YI G J, ZHANG Q M. Effects of calcium in physiology and metabolism of fruit crops[J]. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(5):369-373.
- [19] Albasel N, Cottenie A. Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime, and chelates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(2):386-390.
- [20] Inaba S, Takenaka C. Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability of copper for lettuce sprouts[J]. *Environment International*, 2005, 31(4):603-608.
- [21] Walker D J, Clemente R, Roig A, et al. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(2):303-312.
- [22] Mathur S P, Belanger A, Sanderson R B, et al. The influence of variations in soil copper on the yield and nutrition of spinach grown in microplots on two organic soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1984, 15(6):695-706.