

低浓度 Cu 和 Cd 复合污染对小白菜 生理生化特性的影响

龚 宁¹, 薛长雷², 李玉平³, 杨公明⁴

(1. 西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 吉林省通化市质量技术监督局, 吉林 通化 134000;
3. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 华南农业大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510642)

摘 要: 采用盆栽试验,研究了不同质量浓度 Cu(0,25,50,100,200 mg/kg) 和 Cd(0,1.0,10.0 mg/kg) 及其复合污染对小白菜生理生化指标的影响。以不添加 Cu 和 Cd 为对照组。结果表明,小白菜外观正常,没有出现 Cd 中毒症状,但是 Cd-Cu 复合处理组小白菜的生物量、叶绿素 a、叶绿素总量、叶绿素 a/b 值都低于对照及单一处理组,Cu、Cd 复合处理对叶绿素 a 的影响程度大于叶绿素 b;复合处理组的细胞膜透性明显低于单一处理组,硝酸还原酶 (NR) 活性显著高于对照及单一处理组,过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD) 活性高于相同浓度 Cd 单一处理组。

关键词: 铜; 镉; 生理生化特性; 小白菜; 复合污染

中图分类号: S 634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008) 04-0141-07

随着工业的发展及西北和北方地区缺水现象日益严重,我国污水灌溉面积呈扩大的趋势,据有关资料,1998 年我国污水灌溉面积已达 $3.168 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。污水灌溉虽然增加了土壤有机质含量,但是由此引起的土壤、作物中重金属等有害物质积累严重影响农产品品质。由于蔬菜地多处于人类活动密集的城市周边,且因为蔬菜生长周期短,水肥需求强度大,化肥、农药投入密集,灌溉频繁,导致菜园土壤受重金属污染的情况比其它农田更为严重^[2~4]。因此,研究重金属对蔬菜生长发育的影响,对于深入探讨开发利用污水资源具有重要的实际意义。

Cd 是环境中危害较大的重金属之一,由于长期施用各种含 Cd 的 P 肥或复混肥^[5],使蔬菜地土壤中 Cd 含量常超标。Cu 是人体和动植物具有重要的生理功能、营养作用的微量营养元素之一,由于含铜化合物杀虫剂、杀菌剂的广泛应用,造成 Cu 等重金属在土壤中积累。另外,含铜饲料添加剂在畜禽养殖中的应用,往往导致畜禽粪便中 Cu 含量较高^[6],长期施用畜禽粪便,也会造成 Cu 在土壤中积累^[7,8]。

重金属 Cu 和 Cd 单一在土壤中的物理、化学行为及其植物效应已有较多研究,但在实际中,低浓度复合污染为农田中常见的污染状态,污染范围大,影响情况较为复杂,多种污染物共存,其复合作用可以

大大改变某一或某些污染物的生物活性或毒性,其对植物的毒性效应与单一污染有所不同。元素间的交互作用在不同植物、不同的生理过程、不同处理浓度时的表现也有差异,其机理有待于更深入的研究,因此研究环境中各种污染物之间的复合作用规律与机理及其与单个污染物影响的差异,具有重要的理论和实践意义。

本试验研究了我国菜园土壤常见的两种重金属元素 Cu 和 Cd,在低浓度范围内的复合污染对小白菜生理特性的影响,为探讨 Cu 和 Cd 复合污染对植物毒害的机理,为减少 Cu 和 Cd 毒害提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试植物 小白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) 又称不结球白菜、青菜、油菜,属于十字花科芸薹属芸薹种不结球白菜亚种,种子购于西北农林科技大学园艺学院,品种为四季青。

1.1.2 供试土壤 所用土壤类型为壤土,采自西北农林科技大学农艺站大田 0~20 cm 的地表土。土壤有机质含量为 15.0 g/kg, pH 值为 7.7(水:土=5:1),全氮为 1.5 g/kg,硝态氮为 46.5 μg/kg, P 为 26.3 mg/kg,速效钾为 108.3 mg/kg,全 Cd 0.053

收稿日期:2007-09-17

基金项目:广东省食品工业公共试验室开放课题支持(2006231)

作者简介:龚 宁(1971-),女,广西玉林市人,硕士,主要从事食品安全研究。E-mail: gongningen@163.com

通讯作者:杨公明,教授,博导。E-mail: ygmg@scau.edu.cn

mg/kg,全Cu 21.3 mg/kg。土壤过 1cm×1cm 筛,装盆。

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料的准备 试验采用模拟污染盆栽的方式在西北农林科技大学生命科学院自动化玻璃温室内进行。试验设CK(对照)、处理,每个处理重复 10 盆,随机排列。试验用盆为高×直径=16cm×16cm 的塑料营养钵,每盆装土 2 kg(以干土计)。各处理中 Cd 以 3CdSO₄·8H₂O 形式加入,Cu 以 CuSO₄·5H₂O 形式加入,以纯 Cd、Cu 计,Cd:1.0,10.0 mg/kg,Cu:25.0,50.0,100.0,200.0 mg/kg(土),Cu—Cd 处理分别为:Cu+Cd:25.0 mg/kg+1 mg/kg,50.0 mg/kg+1 mg/kg,100.0 mg/kg+1 mg/kg,200 mg/kg+1 mg/kg,25.0 mg/kg+10 mg/kg,50.0 mg/kg+10 mg/kg,100 mg/kg+10 mg/kg,200 mg/kg+10 mg/kg,其中以土壤中不添加 Cu 和 Cd 作为对照组。各个处理的 Cu、Cd 以溶液形式均匀喷施于土壤中,维持湿度为 60%,保湿平衡 2 周,以达到重金属离子与土壤的混合均匀。将种子消毒后,播在湿润沙盘中,待苗出整齐后,挑选长势一致的苗进行移栽,每盆 3 株,清水浇灌,常规栽培管理,生长期 40d。于采收期每个处理取 20 株小白菜相同部位的叶片混合,用蒸馏水冲洗干净后用于测定。

1.2.2 测定项目及方法 叶绿素含量测定采用丙酮提取法^[9],膜透性采用电导法^[9],硝酸还原酶活性的测定采用活体法^[9],SOD 酶活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[10],POD 酶活性的测定

采用愈创木酚法^[11],CAT 酶活性的测定采用过氧化氢法^[12]。每次测定每处理组取 3 个样,每个样测定重复 3 次,取平均值。

试验结束时,将所有小白菜根茎叶,采集,清洗干净,用滤纸吸干水分,在 60℃ 下烘干,测定生物量。

1.3 数据处理

用SPSS 软件对数据进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 Cu 对低浓度Cd 胁迫下小白菜生物量的影响

试验结果见图 1,复合处理组中 Cd 浓度越高,生物量相应越低。Cu 单一处理组中,生物量随着 Cu 浓度的升高也呈下降趋势。1 mg/kg Cd 单一处理组,小白菜地上部分的生物量为 0.57 g/株(干重),1 mg/kg Cd 与 25、50、100、200 mg/kg Cu 复合处理组中,小白菜地上部位生物量随 Cu 浓度增大呈现先下降后上升的趋势,分别为 1 mg/kg Cd 单一处理组的 91.2%、79.2%、108.8%、91.2%,地下部位的生物量分别为 1 mg/kg Cd 单一处理组的 81.2%、75.0%、97.9%、81.8%。在 10 mg/kg Cd 单一处理组,小白菜地上部位的生物量为 0.40 g/株(干重),在 10 mg/kg Cd 与 25、50、100、200 mg/kg Cu 复合处理组小白菜地上部位的生物量分别为 10 mg/kg Cd 单一处理组的 96.7%、76.9%、60.7%、74.3%。地下部位的生物量分别为 10 mg/kg Cd 单一处理组的 90.3%、50.7%、61.3%、45.9%。

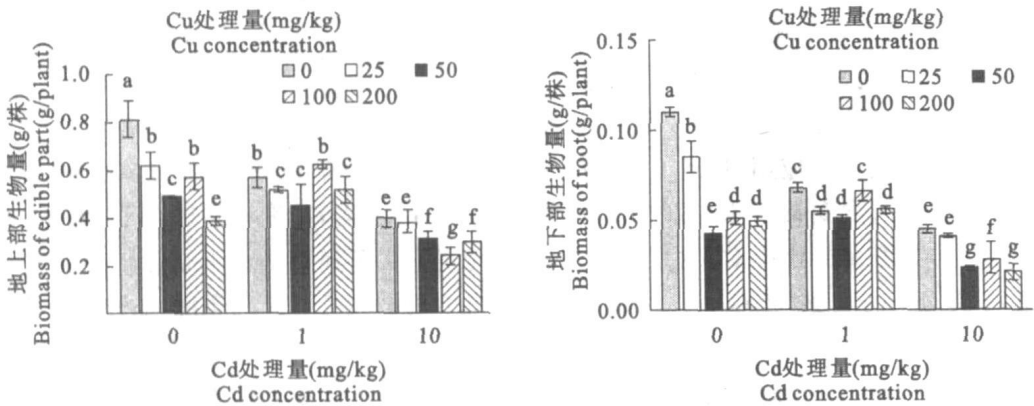


图 1 不同 Cu、Cd 处理对生物量的影响

Fig. 1 Effects of Cu, Cd treatment on biomass

试验结果表明,从整体上讲,Cu、Cd 胁迫下,小白菜的生物量大多低于对照组。但是在 1 mg/kg Cd 与 100、200 mg/kg Cu 复合处理组的地下和地上部分的生物量却高于相应浓度下的 Cu、Cd 单一处

理组,说明在该浓度下 Cu—Cd 复合处理对单一 Cu、Cd 造成的生物量下降影响有一定的缓解作用。

2.2 外源Cu 对低浓度Cd 胁迫下小白菜叶绿素含量的影响

叶绿素是绿色植物进行光合作用的主要色素,其含量在一定程度上能反映植物同化物质的能力^[13],也反映出Cu、Cd 对叶绿素的影响情况。试验结果如图 2 所示,叶绿素a 和叶绿素总量的变化趋势基本一致,Cu—Cd 复合处理组的叶绿素a 和叶绿素总量都比Cu 或Cd 单一处理组要低。对照组叶绿素a 的含量为 9.42 μg/g,叶绿素总含量为11.6 μg/g,在 1 mg/kg Cd 的单一处理组,小白菜叶片中叶绿素a 和叶绿素总量分别是对照组的 56.9%和 64.9%,Cu—Cd 复合处理组中,叶绿素a 和叶绿素总含量随加入的Cu 浓度增大而进一步降低,在 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 复合作用处

理组叶绿素a 分别是对照组的 33.3%、29.6%、18.0%、14.5%,比 1 mg/kg Cd 单一处理组降低了 41.5%、47.9%、68.3%、74.5%;叶绿素总量比对照组降低了 41.0%、53.1%、66.2%、75.2%,比 1 mg/kg Cd 单一处理组降低了 5.9%、25.2%、46.1%、60.5%。在 10 mg/kg Cd 的单一处理下,小白菜叶片中叶绿素a 是对照组的 65.8%,叶绿素总量是对照组的 70.1%,在 10 mg/kg Cd 与 25、50、100、200 mg/kg Cu 复合处理组叶绿素a 分别是对照组的 14.8%、20.9%、29.7%、18.9%,比 10 mg/kg Cd 单一处理组降低了 77.4%、68.2%、54.9%、71.2%,叶绿素总量分别比对照组降低了 75.1%、67.8%、58.0%、63.9%,比 10 mg/kg Cd 单一处理组分别降低了 68.6%、59.6%、47.1%、59.7%。

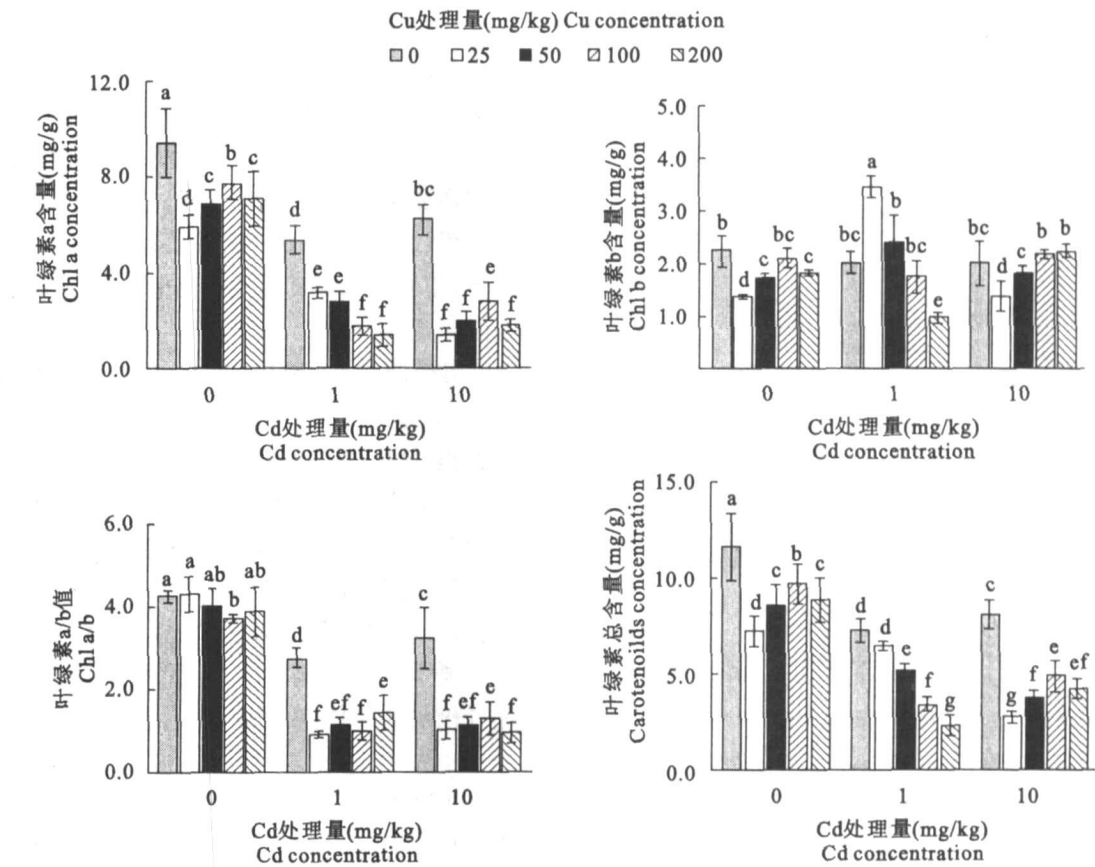


图 2 不同Cu、Cd 处理对叶绿素的影响

Fig. 2 Effects of Cu、Cd treatments on pigments in leaf

对照组叶绿素b 的含量为 2.25 μg/g, 1、10 mg/kg Cd 处理组,小白菜叶片中叶绿素b 分别是对照组的 87.8%和 88.9%,25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 复合处理组叶绿素b 分别是对照组的 152.6%、107.0%、77.8%、42.8%;25、20、100、200 mg/kg Cu 与 10 mg/kg Cd 复合处理组中叶绿素b 分别是对照组的 62.1%、80.0%、95.9%、

98.8%。

试验结果表明,各处理组小白菜叶片中叶绿素a、叶绿素总量以及叶绿素a/b 值低于对照组,说明本试验设置浓度下,Cu、Cd 单一及Cu—Cd 复合处理影响了叶绿素含量和组成。其中Cu—Cd 复合处理组的叶绿素a 及叶绿素总量低于对照组,而叶绿素b 的含量却接近或高于对照组,说明Cu—Cd 复

合作用对叶绿素 a 的影响大于叶绿素 b。在 1 mg/kg Cd 与 25、50 mg/kg Cu 复合处理组出现叶绿素 b 含量高于对照组,而叶绿素总量低于对照组的情况,其原因很可能是 Cu—Cd 复合作用破坏了叶绿素 a、b 之间的转化动态平衡过程,影响了叶绿素 a、叶绿素 b 的含量及比率。Cu、Cd 胁迫对叶绿素代谢这个动态平衡过程的影响机理可能是通过影响叶绿素合成相关的酶类,抑制叶片中叶绿素的合成^[14]。或是引起活性氧的积累,加速了叶绿素的降解,致使叶绿素含量降低^[15]。

2.3 外源 Cu 对小白菜叶片内硝酸还原酶 (NR) 活性的影响

NR 是植物氮代谢中一个极为重要的酶,进入植物体的硝态氮必须经 NR 作用还原成氨,才能形成氨基酸和蛋白质参与植物体的氮代谢过程。NR 的活性是植物还原转化硝态氮能力高低的标志,酶活性下降导致植物体内硝酸盐同化能力差,形成硝酸盐积累,使氮代谢紊乱,对植物产生毒害,同时也会降低蔬菜品质。因此研究 Cu—Cd 复合污染对 NR 活性的影响,对于探索该污染物对小白菜的影响有重要意义。

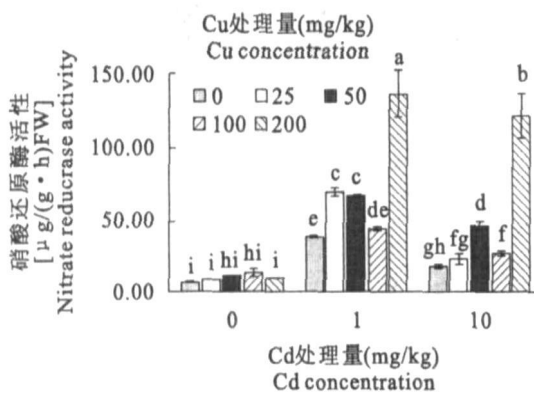


图 3 不同 Cu、Cd 处理对叶片中硝酸还原酶活性的影响

Fig. 3 Effects of Cu, Cd treatment on the activity of nitrate reductase in leaf

试验表明,对照组 NR 活性为 $7.92 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 1 mg/kg 浓度下的 Cd 对 NR 活性有明显的促进作用,小白菜叶片中 NR 活性比对照组升高了 393.8%,这一结果与李荣春接近^[19]。Cu 单一处理组, NR 活性并没有随 Cu 浓度的变化产生显著变化。当 Cd 为 1 和 10 mg/kg 时, NR 活性随 Cu 处理浓度增大而进一步增高,而且比 Cd 单一处理组高。25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 复合处理组中 NR 活性是对照组的 787.3%、751.9%、458.9%、1633.2%,是 1 mg/kg Cd 单独处理组的 179.7%、172.5%、113.2%、351.0%。在 10 mg/kg

Cd 处理下,小白菜 NR 活性比对照组高 136.7%, Cu—Cd 复合处理组, NR 活性明显升高,在 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 10 mg/kg Cd 的复合处理组, NR 活性分别是对照组的 198.6%、490.5%、239.6%、1436.1%,分别是 10 mg/kg Cd 单一处理组的 126.2%、249.5%、143.5%、649.0%。

Cd、Cu 及其复合污染显著改变了小白菜 NR 活性,直接影响到了小白菜的氮素代谢, NR 是一种含有一 SH 的黄素蛋白酶,虽然研究指出 Cd、Pb 等重金属离子能与硝酸还原酶中的一 SH 结合,占据其活性中心,从而降低其活性^[17]。但也有研究表明 Cd 对植物的影响存在着剂量效应,低浓度能够促进作物生长^[18],在本试验所设置的浓度范围之内, Cu 单一处理对 NR 活性影响不大, Cd 单一处理却增加了 NR 的活性,这说明在本试验所设置的浓度范围内, Cd 没有抑制 NR 活性,而是刺激了其提高。特别值得注意的是, 200 mg/kg Cu 分别与 1 mg/kg 和 10 mg/kg Cd 的复合处理组中小白菜叶片的 NR 活性显著高于其它处理组,这可能是由于小白菜的正常生理代谢受到影响时,刺激了抗逆蛋白的合成,导致此时与蛋白合成有关的 NR 活性增加。这种在轻微胁迫下,植物体内 NR 活性增高的情况在小麦、玉米中也有报道^[19,20]。

2.4 Cu 对低浓度 Cd 胁迫下小白菜叶片质膜相对透性的影响

细胞膜透性是评定植物对污染物反应的指标之一。人们认为大量的重金属进入植物体内并与细胞膜蛋白的 SH 或磷脂分子层的磷脂类物质反应,造成膜蛋白的磷脂结构改变,膜系统遭受破坏,透性增大,细胞内一些可溶性物质外渗,从而膜透性增大^[21,22]。电导率显著增加。电导率值越大意味着膜脂过氧化水平升高,膜透性增大,膜结构损伤程度深。

由图 4 可以看出, Cu—Cd 复合处理使叶片质膜相对透性低于相应的 Cu、Cd 单一处理的质膜相对透性。对照组小白菜叶片电解质渗出率为 17.78%, Cu 单一处理时小白菜叶片质膜相对透性单一随着 Cu 浓度的升高显著升高。在 1、10 mg/kg Cd 胁迫时电解质渗出率分别为 24.79% 和 22.2%, 1 mg/kg Cd 与 25、50、100、200 mg/kg Cu 复合处理组中,小白菜叶片的电解质渗出率值分别比单一 Cd 处理组降低了 32.6%、21.3%、23.8%、37.1%; 10 mg/kg Cd 与 25、50、100、200 mg/kg Cu 的复合处理组,小白菜叶片电解质渗出率比 Cd 单一处理组分别减少了 34.2%、6.7%、2.7%、1.9%。

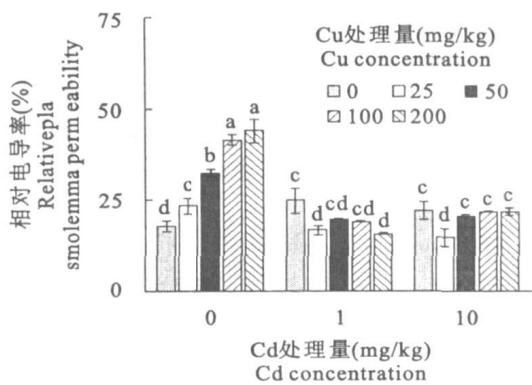


图 4 不同 Cu、Cd 处理对膜透性的影响
Fig. 4 Effects of Cu、Cd treatment on Relative plasma membrane permeability

本试验中,在 Cu、Cd 单一处理组,小白菜叶片的质膜相对透性高于对照组,但 Cu—Cd 复合处理

组质膜的透性则明显低于单一 Cu、Cd 处理,说明 Cu—Cd 复合处理比单一 Cu、Cd 处理造成的质膜伤害轻。

2.5 Cu 对低浓度 Cd 胁迫下小白菜叶片 SOD、POD 和 CAT 酶活性的影响

植物在正常的代谢过程中不断产生自由基,但内源的抗氧化保护系统可将其转变为活性较低的物质,以维持自由基产生和清除的动态平衡,使植株正常生长发育避免伤害。而当植物处于逆境胁迫时,清除自由基和活性氧的代谢系统失调,自由基浓度增大,对植物造成伤害^[23]。POD、SOD、CAT 共同组成植物体内的活性氧清除系统,三者协调一致的共同作用,在一定范围内能有效地将自由基转变为活性较低的物质,这三种酶的活性与植物的抗逆性密切相关^[21]。

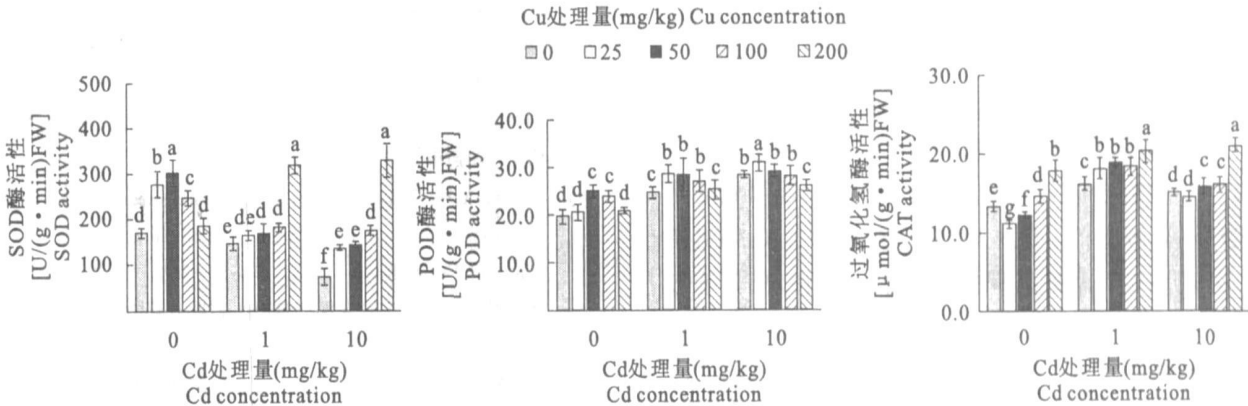


图 5 不同 Cu、Cd 处理对小白菜 SOD、POD 和 CAT 酶活性的影响
Fig. 5 Effects of Cu、Cd treatments on the activity of SOD、POD and CAT in leaf

对照组 SOD 活性为 170.4 U/(g·min) FW。在 1 和 10 mg/kg Cd 处理组,小白菜 SOD 活性分别下降了 14.7% 和 57.3%, 25、50、100、200 mg/kg Cu 单一处理各组中小白菜的 SOD 酶活性普遍高于对照组,分别为对照的 162.0%、177.2%、144.1%、109.0%,而 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 的复合处理组中,SOD 活性虽随 Cu 浓度增大而增高,却均低于对照,其活性分别是对照组的 96.6%、99.2%、107.2%、186.9%,在与 10 mg/kg Cd 的复合处理组中,SOD 活性分别是对照组的 80.2%、84.6%、101.4%、192.1%。

对照组 POD 活性为 19.6 U/(g·min) FW,Cu 单一处理组 POD 酶的活性随着 Cu 处理浓度增加而上升,在 50 mg/kg 时 POD 的活性开始降低。在 1、10 mg/kg Cd 单一处理组,小白菜 POD 活性分别比对照组升高了 25.7% 和 44.9%, 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 的复合处理组 POD 活性

比对照组增加了 45.9%、45.1%、37.7%、28.9%, 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 10 mg/kg Cd 的复合处理组,POD 活性则分别比对照组高 57.5%、48.8%、43.6%、32.5%。

对照组小白菜 CAT 活性为 13.6 U/(g·min) FW。在 1、10 mg/kg Cd 的单一处理组,CAT 活性分别比对照组升高了 21.9% 和 13.8%,在 25、50、100、200 mg/kg Cu 与 1 mg/kg Cd 的复合处理组 CAT 活性比对照组增加 36.2%、41.9%、38.9%、52.2%;25、50、100、200 mg/kg Cu 与 10 mg/kg Cd 的复合处理组,小白菜 CAT 活性也比对照组高 9.4%、19.8%、22.1%、58.4%。

在本试验中,SOD 活性较 POD、CAT 活性高出许多,说明 SOD 在 Cu 和 Cd 胁迫下发挥着重要作用。200 mg/kg Cu 和 1、10 mg/kg Cd 的复合处理组,小白菜体内 SOD 的活性迅速升高,高于 200 mg/kg Cu 和 10 mg/kg Cd 的单一处理组,说明 200

mg/kg Cu 对提高SOD 酶的活性、增强小白菜的胁迫能力有促进作用。Cu—Cd 复合处理组中,Cd 处理浓度相同时,SOD 和CAT 活性均随Cu 浓度增大而升高,POD 酶活则随着Cu 浓度增加先升高后降低。POD 酶在峰值后活性降低的原因可能是:高浓度Cu 下,酶活性受到不同程度抑制,高浓度的Cu 影响酶的结构或是产生的大量活性氧自由基超过了保护POD 酶清除范围,过量活性氧攻击保护POD 酶本身,导致其活性下降^[24]。

综上所述,25~200 mg/kg Cu 提高了1~10 mg/kg Cd 胁迫下小白菜叶片中保护酶活性,一定程度上增强了小白菜的抗逆性。

3 结论与讨论

对比Cd、Cu 复合污染和单一污染对小白菜的生理生化影响可知,重金属复合污染对植物的影响要比单一污染复杂得多。不同的生理过程其影响程度不同,不同浓度组合对不同生理指标的影响也各不相同,其对小白菜的毒害作用似乎不能简单用拮抗作用、协同作用来表达。试验结果表明,Cu—Cd 复合处理组较单一处理组NR 活性高,叶绿素含量较单一处理组低。Cu—Cd 复合处理却比Cu、Cd 单一处理更能刺激提高保护酶系统的活性,使其有效保护了小白菜的生理系统,Cu—Cd 复合处理组的细胞膜透性小于Cu、Cd 单一处理组也说明了这一点。

在试验过程中,小白菜生物量有所下降,但从外观上没有观察到萎蔫、局部坏死、褐斑等Cd 中毒的病态特征,说明本试验设置Cu 和Cd 复合处理浓度虽对小白菜的生长发育、膜系统、光合系统、抗氧化系统都产生了一定影响,干扰了小白菜的正常生理过程和代谢平衡,但其影响程度在外观上表现并不显著,这种伤害属于隐性毒害。但是Cu—Cd 复合处理是否会引起重金属Cu、Cd 在小白菜中的富集比例的提高,对食用安全的危害是否大于单一元素的影响还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 孟雷,左强.污水灌溉对冬小麦根长密度和根系吸水速率分布的影响[J].灌溉排水报,2003,22(4):25—29.
[2] 陈同斌,郑袁明,陈煌,等.北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征[J].地理研究,2005,24(2):229—235.
[3] 张民,龚子同.我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J].土壤学报,1996,33(1):85—93.

[4] 徐理超,李艳霞,苏秋红,等.阜新市农田土壤重金属含量及其分布特征[J].应用生态学报,2007,18(7):1510—1517.
[5] 曹志洪.施肥与土壤健康质量—论施肥对环境的影响[J].土壤,2003,35(6):450—455.
[6] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):822—829.
[7] Han F X, Kingery W L, Selim H M, et al. Arsenic solubility and distribution in poultry waste and long term amended soil[J]. Science of the Total Environment, 2004,20(1):51—61.
[8] L'Herroux L, Roux S L, Appriou P, et al. Behaviour of metals following intensive pig slurry applications to a natural field treatment process in Brittany (France)[J]. Environmental Pollution, 1997,(1—2):119—130.
[9] 高俊凤.植物生理学试验技术[M].西安:世界图书出版公司,2000.
[10] 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.
[11] 朱广廉,钟海文,张爱琴.植物生理学试验[M].北京:北京大学出版社,1990.
[12] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理试验[M].哈尔滨:哈尔滨工业出版社,2004.
[13] 伍泽堂.超氧自由基与叶片衰老时叶绿素破坏的关系[J].植物生理学通讯,1991,27(4):277—279.
[14] Tewari A K, Tripathy B C. Temperature stress induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat[J]. Plant Physiol, 1998,117:851—858.
[15] 郭培国,李荣华.夜间高温胁迫对水稻叶片光合机构的影响[J].植物学报,2000,42(7):673—678.
[16] 李荣春.Cd、Pb 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J].植物生态学报,2000,24(2):238—242.
[17] 王林,史衍玺.镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2005,36(1):107—112.
[18] 李元.镉、铁及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J].生态学报,1992,12(2):147—153.
[19] 郝金花,马晓丽,韩榕.He—Ne 激光对小麦幼苗增强UV—B 辐射损伤的修复研究[J].西北植物学报,2007,27(1):62—67.
[20] 刘建新,胡浩斌,赵国林.多裂骆驼蓬中生物碱类物质对玉米幼苗生长及某些生理特性的影响[J].草业学报,2007,16(1):75—80.
[21] 储玲,刘登义,王友保,等.铜污染对三叶草幼苗生长及活性氧代谢影响的研究[J].应用生态学报,2004,15(1):119—122.
[22] 王友保,刘登义.Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J].应用生态学报,2001,12(5):773—776.
[23] 李兆君,马国瑞,徐建民,等.植物适应重金属Cd 胁迫的生理及分子生物学机理[J].土壤通报,2004,35(2):234—238.
[24] 李锋民,熊治廷,胡洪营.海州香薷对铜的蓄积及铜的毒性效应[J].环境科学,2003,24(3):30—34.

Influence of combined pollution of Cu and Cd on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica campestris ssp. chinensis*

GONG Ning¹, XUE Chang lei², LI Yu ping³, YANG Gong ming^{4*}

(1. College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China ;

2. Tonghua Bureau of Quality and Technical Supervision, Tonghua, Jilin 134000, China ;

3. College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China ;

4. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract : By pot experiment the paper studied the effects of heavy metal pollution (Cu ,Cd and Cu +Cd) on the physiological and biochemical characteristics of plant (*Brassica campestris ssp. chinensis*). The test soil contains one of five levels of Cu(0, 25, 50, 100 or 200 mg /kg) and one of three levels of Cd(0, 1, 10 mg /kg) . Harvest and analysis of leaf was after 40 days . During the 40-day experiment , *Brassica campestris ssp. chinensis* survived in the soil spiked up to 10 mg /kg Cd and 200 mg /kg Cu , showing no visual heavy metal toxicity symptoms such as necrosis and whitish brown chlorosis . The biomass is negatively affected by the mixture of Cu and Cd . In the absence of Cd , the relative plasma permeability was stimulated with increasing Cu concentration , but it was first inhibited and then stimulated with increasing concentration of Cu by the presence of Cd . Cu or Cd strongly reduced the leaf contents of chlorophyll (Chl) a , and the ratio of Chl a and Chl b . The NR activities did not vary with increasing Cu concentration at Cd =0 mg /kg . However , the activities were first stimulated and then inhibited with increasing Cu concentration at Cd =1 or 10 mg /kg . The NR activities were particularly increased at the concentration of Cu =200 mg /kg . The sensibility of antioxidant enzymes to increasing Cd and Cu concentration are different to enzymes kinds . The SOD activity was first stimulated and then inhibited with increasing concentration of Cu without Cd and that was stimulated with increasing concentration of Cu at Cd =1 or 10 mg /kg . There were similar responses in POD and SOD activities , and the POD activity was stimulated with increasing concentration of Cd under same concentration of Cu . Increasing Cu concentration in soil significantly increased the activity of CAT , and at the same Cu concentration the CAT activity was inhibited with increasing concentration of Cd .

Key words : Cu ; Cd ; combined pollution ; physiological and biochemical characteristics ; *Brassica campestris ssp. chinensis*