

不同铜浓度的猪粪对玉米光合特性的影响

高凤仙¹, 杨仁斌², 田科雄¹, 钟元春¹

(1. 湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要:采用盆栽试验研究了不同铜浓度的猪粪对玉米光合特性的影响。试验组猪粪为猪饲料基础日粮添加铜 250 mg·kg⁻¹ 排出的粪, 设 100、200、300 g·盆⁻¹ 3 个试验组, 对照组猪粪为猪饲料基础日粮排出的粪, 300 g·盆⁻¹。移栽 3 叶期玉米后 10、20、30、40 d 测定玉米叶片的光合作用参数。结果表明, 玉米移栽后 10 d, 随着施用猪粪含铜浓度的增大, 玉米叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、光合色素含量也随着升高, 但随着时间的延长, 施用 200 g·盆⁻¹、300 g·盆⁻¹ 含铜猪粪组玉米叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、光合色素含量显著低于对照组。玉米移栽后期高铜浓度猪粪抑制玉米光合作用参数。

关键词:猪粪; 铜; 光合特性; 玉米

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1033-05

Effects of Copper in Pig Feces on Photosynthetic Characteristics of Maize

GAO Feng-xian¹, YANG Ren-bin², TIAN Ke-xiong¹, ZHONG Yuan-chun¹

(1. College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of different levels of copper in pig feces on photosynthetic characteristics of maize. The pig feces in the treatment group were collected from those pigs fed with basal dietary supplement 250 mg·kg⁻¹ Cu, and three different amounts, 100 g, 200 g, 300 g, were added into each treatment, while, the pig feces in the control group were from those only fed with basal dietary, and 300 g was used in each pot. The photosynthetic parameters were tested at 3 leaves stage of maize after transplanting 10, 20, 30 and 40 days respectively. The results showed that net photosynthetic rate of leaves, stomatic conductance of leaves, intercellular CO₂ concentration of leaves, transpiration rate of leaves, the content of chlorophyll and carotenoid in leaves of maize increased with the increasing of copper in pig feces after 10 days transplanting. With time passing on, the net photosynthetic rate of leaves, stomatic conductance of leaves, intercellular CO₂ concentration of leaves, transpiration rate of leaves and the content of chlorophyll and carotenoid in leaves of groups with 200 g·pot⁻¹ and 300 g·pot⁻¹ copper in pig feces were obviously lower than those of the control at the anaphase of maize. Photosynthetic parameters were restrained by high level of copper in pig feces.

Keywords: pig feces; copper; photosynthetic characteristics; maize

近年来由于畜牧业的发展, 各种添加剂大量使用, 特别是矿物质铜添加剂使用更盛, 大量研究表明, 高铜能够促进仔猪增重、降低腹泻率、提高饲料利用率、增强机体免疫力以及抗断奶应激等^[1]。但猪对铜的吸收率低, 大量铜从粪中排出, 虽然铜是植物生长必需的 7 种微量元素之一, 参与植物的光合作用等许多过程, 在植物的生长发育过程中起着重要的作用^[2], 但

铜也是具有潜在毒性的元素, 是作物和土壤的主要污染物。环境中过量的铜会对植物产生伤害, 铜污染物可通过对植物光合色素的破坏或抑制其合成而影响光合作用, 产生毒性^[3-5]。这不仅影响植物的生长发育, 还会通过食物链对人类的健康带来严重威胁^[6]。关于矿区铜污染研究较多, 但多集中在麦、稻等作物上, 而铜对玉米生长状况的影响报道较少, 同时有机肥料中铜含量过多对作物的影响未见报道。

本研究通过盆栽试验探讨了猪饲料中添加来自硫酸铜铜源, 添加铜剂量为 250 mg·kg⁻¹ 饲料, 通过猪消化后排出粪便, 测定猪粪中不同浓度铜处理下玉米

收稿日期: 2007-08-28

基金项目: 湖南省自然基金项目 (04JJ6006); 湖南省教育厅基金项目 (07C352)

作者简介: 高凤仙(1964—), 女, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 从事农业生态方面的研究。E-mail: gaofx1964@163.com

苗期光合特性的变化,探讨猪粪中不同铜浓度对玉米苗期光合作用的影响,为揭示猪粪中铜对玉米生长的影响提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试土壤和猪粪

供试土壤为湖南农业大学实验农场菜园土,其基本性质为:有机质 1.98%,全氮 0.13%,碱解氮 122.4 mg·kg⁻¹,速效磷 103.9 mg·kg⁻¹。猪粪有两种,试验猪粪取自猪饲喂基础日粮添加 250 mg·kg⁻¹ 铜(硫酸铜)排出的粪,对照猪粪取自猪饲喂基础日粮排出的粪,两种猪粪经 3 个月发酵、干燥,过 1 mm 筛,其他成分一致,铜含量不同,试验猪粪含铜 1 274.87 mg·kg⁻¹,对照猪粪含铜 35.12 mg·kg⁻¹。

1.1.2 供试材料

供试材料为湘农 15 号玉米,由湖南农业大学玉米研究所提供,为大小一致的三叶期玉米苗。

1.2 方法

1.2.1 盆栽试验

盆钵高 20 cm、盆口直径 18 cm,每盆装土 2.7 kg。试验设 4 个处理组,每处理 6 盆,每盆 2 株,具体设计及分组见表 1。为了使试验条件一致,每盆猪粪量都是 300 g,只是铜浓度不同。栽培时间为 2007 年 5—6 月。试验安排在湖南农业大学园艺学院花圃实验基地进行。

表 1 试验设计

Table 1 The experimental design

	试验 1 组	试验 2 组	试验 3 组	对照组(CK)
试验猪粪/g·盆 ⁻¹	100	200	300	0
对照猪粪/g·盆 ⁻¹	200	100	0	300
猪粪合计/g·盆 ⁻¹	300	300	300	300

1.2.2 测定方法

测定时期:分别在玉米苗移栽后 10、20、30、40 d 测定玉米植株顶端第 2 完全展开叶的光合作用参数。净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度的测定:采用 LI-6400 便携式光合作用系统测定,红蓝光源,光通量密度设为 800 μmol·m⁻²·s⁻¹,每次每处理定点挂牌测定 6 株(每盆 1 株),测定时间为上午 8:30~10:00。

光合色素含量采用比色法测定:称取剪碎的新鲜植物叶片各 0.1 g,转入 25 mL 容量瓶中,再加入 80%

的丙酮定容至刻度。将其放入暗室中浸提(浸提过程中摇动 2~3 次)24 h 之后,把叶绿体色素提取液倒入光径 1 cm 的比色杯内,以 80%丙酮为空白对照,在 721 型分光光度计上分别以 663、646 和 470 nm 波长进行比色,然后计算其含量^[7]。

1.2.3 统计分析

所有数据均采用 SAS(8.0)软件中 ANOVA 模型,依单因子完全随机设计对各项数据进行方差分析,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同铜浓度的猪粪对玉米叶片净光合速率的影响

光合速率是反映叶片光合作用暗反应阶段 CO₂ 同化水平的一个生理指标。光合速率大,表明植物光合作用的水平高,反之亦然。不同铜浓度的猪粪对叶片净光合速率的影响结果见图 1。玉米移栽后 10 d,叶片净光合速率试验组平均比对照组提高约 66%,对照组间数值相近。玉米移栽后 20 d,叶片净光合速率试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组约是对照组的 2.4 倍,试验猪粪 200 g·盆⁻¹ 组也接近对照组的 2 倍。玉米移栽后 30 d,叶片净光合速率试验猪粪组与对照组无显著差异。玉米移栽后 40 d,叶片净光合速率以试验猪粪 100 g·盆⁻¹ 组 and 对照组最高,试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组最低。从结果显示,试验前期,施用高铜浓度猪粪都可提高叶片净光合速率,玉米移栽后 40 d,试验猪粪 100 g·盆⁻¹ 组和对照组叶片净光合速率无显著差异,随施用猪粪含铜浓度的增加,叶片净光合速率随之下降,特别是猪粪中铜浓度越高,叶片净光合速率下降越快。说明试验后期,猪粪中高浓度铜已影响到玉米的光合速率。

2.2 不同铜浓度的猪粪对玉米叶片气孔导度的影响

一般情况下,逆境条件(重金属、盐害、高温等)使叶片气孔导度下降,导致光合速率降低。不同铜浓度

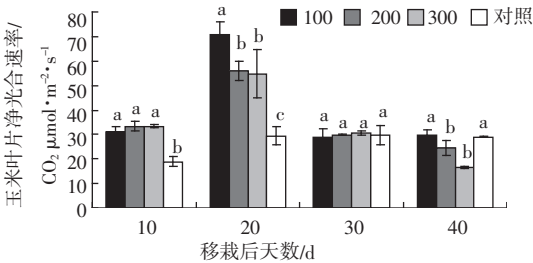


图 1 不同铜浓度猪粪对玉米光合速率的影响

Figure 1 Effects of different levels of copper in pig feces on net photosynthetic rate of leaves

的猪粪对叶片气孔导度的影响结果见图 2。玉米移栽后 10 d, 叶片气孔导度试验组显著高于对照组。玉米移栽后 20 d, 叶片气孔导度试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组显著降低, 试验猪粪 200 g·盆⁻¹ 组, 100 g·盆⁻¹ 组显著升高。玉米移栽后 30 d, 各组间叶片气孔导度差异不显著。玉米移栽后 40 d, 叶片气孔导度对照组显著高于试验组。结果显示, 在试验期, 试验组玉米叶片气孔导度呈先升后降的趋势。在试验前 20 d, 叶片气孔导度试验猪粪 200 g·盆⁻¹ 组、100 g·盆⁻¹ 组比对照组显著升高, 林试验 30 d 起跟对照组比开始下降。但试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组叶片气孔导度在移栽 10 d 时比对照组显著升高, 从移栽 20 d 起就开始下降, 可能是气孔导度对高浓度铜更敏感的缘故。

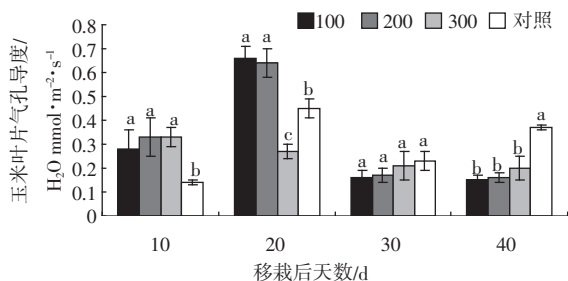


图 2 不同铜浓度猪粪对叶片气孔导度的影响

Figure 2 Effects of different levels of copper in pig feces on stomatic conductance of leaves

2.3 不同铜浓度的猪粪对玉米叶片胞间 CO₂ 浓度的影响

不同铜浓度的猪粪对玉米叶片胞间 CO₂ 浓度的影响结果见图 3。玉米移栽后 10 d, 叶片胞间 CO₂ 浓度试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组比对照组提高约 40%, 试验猪粪 200 g·盆⁻¹ 组比对照组也提高约 30%。玉米移栽后 20 d, 叶片胞间 CO₂ 浓度试验猪粪 200 g·盆⁻¹ 组比对照组提高约 15%, 试验猪粪 100 g·盆⁻¹ 组与对照组相当, 但试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组显著低于对照组。玉米移栽后 30 d, 叶片胞间 CO₂ 浓度对照组显著高于试验组, 以试验猪粪 300 g·盆⁻¹ 组最低。玉米移栽后 40 d, 叶片胞间 CO₂ 浓度对照组显著高于试验组, 试验组中随猪粪铜浓度的升高叶片胞间 CO₂ 浓度随之降低。试验后期, 猪粪中铜已抑制玉米叶片胞间 CO₂ 浓度, 铜浓度越高, 抑制越严重。叶片胞间 CO₂ 浓度下降越快, 说明猪粪中高浓度铜使叶片气孔导度下降, 不利于叶片光合作用的反应底物 CO₂ 进入到光合细胞, 从而降低其光合速率。

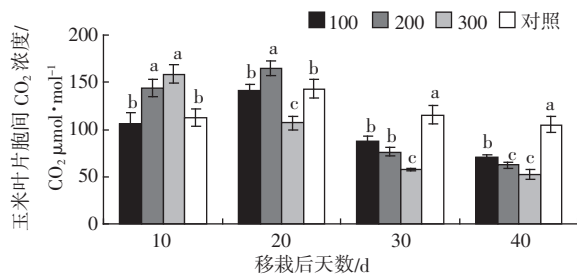


图 3 不同铜浓度猪粪对叶片胞间 CO₂ 浓度的影响

Figure 3 Effects of different levels of copper in pig feces on intercellular CO₂ concentration of leaves

2.4 不同铜浓度的猪粪对玉米叶片蒸腾速率的影响

不同铜浓度的猪粪对玉米叶片蒸腾速率的影响结果见图 4。玉米移栽后 10 d, 玉米叶片蒸腾速率试验组显著高于对照组, 且试验组随猪粪中含铜浓度的增加, 玉米叶片蒸腾速率随着升高。玉米移栽后 20 d, 玉米叶片蒸腾速率各组间差异不显著。试验后 20 d, 试验组显著低于对照组。从结果看, 试验前期, 施用高浓度铜的猪粪能提高玉米叶片蒸腾速率, 但在试验后期, 施用高浓度铜的猪粪叶片蒸腾速率与对照组比呈显著下降。因为蒸腾拉力是玉米吸收水分、吸收矿质及其体内养分运输的动力, 有利于光合产物的积累。蒸腾速率下降, 不利于作物生长。

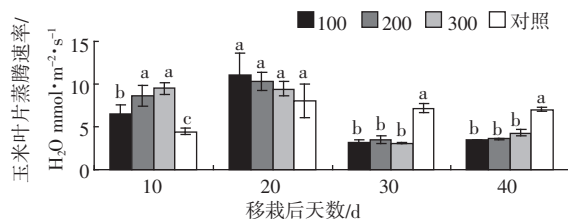


图 4 不同铜浓度猪粪对叶片蒸腾速率的影响

Figure 4 Effects of different levels of copper in pig feces on transpiration rate of leaves

2.5 不同铜浓度的猪粪对玉米叶片光合色素含量的影响

不同铜浓度的猪粪对玉米叶片光合色素含量的影响见图 5、图 6 和图 7。结果显示, 玉米移栽后 10 d, 随着施用猪粪铜浓度的升高, 叶绿素 a、叶绿素 b 含量比对照组都有不同程度的上升, 且含铜浓度越大, 叶绿素含量上升越快。从玉米移栽后 20 d 起, 玉米叶片叶绿素 a、b 含量试验 1 组和对照组间无显著差异, 试验 2 组和试验 3 组与对照组比开始下降, 特别是施用高铜浓度的猪粪时叶绿素含量下降尤为明显。类胡萝卜素的变化与叶绿素变化趋势基本一致。由此可见, 不同浓度的铜对玉米叶片光合色素含量的影响不同, 与不同铜浓度猪粪对玉米光合作用的影响变化趋势基本相一致。

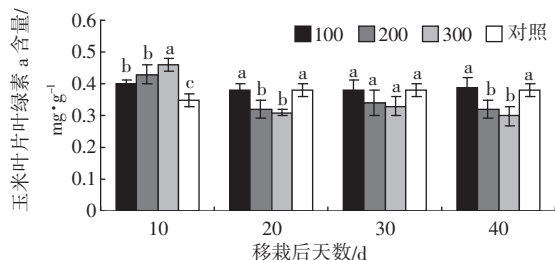


图 5 不同铜浓度猪粪对玉米叶片叶绿素 a 含量的影响

Figure 5 Effects of different levels of copper in pig feces on the content of chlorophyll a in leaves of maize

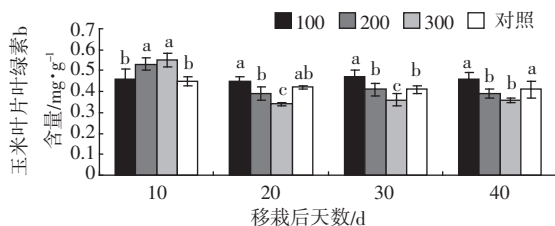


图 6 不同铜浓度猪粪对玉米叶片叶绿素 b 含量的影响

Figure 6 Effects of different levels of copper in pig feces on the content of chlorophyll b in leaves of maize

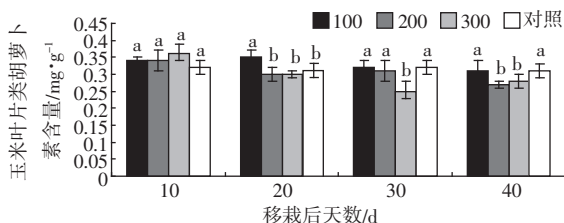


图 7 不同铜浓度猪粪对玉米叶片类胡萝卜素含量的影响

Figure 7 Effects of different levels of copper in pig feces on the content of carotenoid in leaves of maize

3 讨论与结论

铜是植物进行光合作用不可缺少的一种矿质元素。如三叶草绿叶中全铜含量的 75%集中于叶绿体内,供铜不足时叶绿体中的铜含量显著下降,对 CO_2 的吸收大大降低,光合作用明显减弱^[9]。铜在光合作用中所起的作用,首先与质体蓝素 (plactocyanin, pc) 有关,铜是叶绿体内质体蓝素的组分^[9],而且叶绿体内 50% 以上的铜结合于质体蓝素^[10]。现已明确,质体蓝素是 PS II (光系统 II) 的一种重要组分,在光合作用的光反应阶段起着重要作用。质体蓝素作为光合链的一种电子传递体,通过铜的化合价变化而起传递电子的作用,从而使光合作用原初反应时由光能转变成电能进一步变为活跃化学能,为 CO_2 的还原提供能量与还原力。这是本次试验玉米移栽初期施用高浓度铜的猪粪后光合作用比对照组增强的原因。由于南方土壤铜含量少,适当施

用可刺激作物增加光合能力,但随着施用猪粪铜浓度的增加和时间的延长,可能铜在根系和茎叶的累积,导致与前期出现相反的现象,进入叶绿体的重金属沉积在类囊体上,与其膜上蛋白结合,破坏叶绿体酶系统,因而阻碍了叶绿体的合成,使基粒垛叠减少,这就使叶绿体捕获光能的能力大为降低,从而降低了光合速率^[11]。光合作用对 Cu 毒很敏感,高 Cu 使 *Silene com-pacta*^[12]和 *Phaseolus vulgaris*^[13]量子产额下降,这可能与它改变了类囊体膜的膜脂和光合色素的组成,尤其是天线色素复合体的结构有关。高 Cu 供应显著降低 *Alyssum montanum* 的可变荧光并阻抑 PSII 的电子传递,显示 Cu 对光合作用的抑制位点在 PSII 的氧化侧端,使原初电子受体的还原效率下降,这可能与电子供体和受体结构受损有关^[14]。铜对光合作用的抑制还与其抑制 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(RuBPCase)和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPCase)的活性有关^[15]。

光合色素是玉米光合作用的基础物质,因而叶片中光合色素质量分数的高低是反映玉米叶片光合能力的一个重要指标。本试验显示,当玉米在移栽前期,随着施用猪粪含铜浓度的升高,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量与对照组比都有不同程度的上升,但在移栽后期,随着施用猪粪含铜浓度的升高,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素与对照组比都有所下降,特别是施用高铜浓度的猪粪时,叶绿素下降尤为明显。由此可见,不同浓度的铜对玉米的影响不同,与猪粪中铜浓度对光合作用的影响变化趋势基本一致。这与储玲等^[16]发现低浓度 Cu 对三叶草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素的合成有刺激作用,高浓度 Cu 对它们合成有抑制作用相一致。在低浓度 Cu 处理中光合色素含量稍微增加,其原因是:Cu 为植物叶绿体中质体蓝素的组成成分,参与光合作用电子传递过程,而且又是叶绿素形成过程中某些酶的活化剂^[17],故适量的 Cu 弥补了质体蓝素所需,并激发了酶的活性,促进了植物光合作用。但随着 Cu 浓度的增加,由于大量 Cu 进入植物体内,使叶绿体酶活性比例失调,致使叶绿素分解加快,铜胁迫下的玉米幼苗首先表现在叶绿素含量的下降,因为在逆境条件下,活性氧在细胞中增加,必然使更多的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 等扩散到叶绿体内,从而参与了对叶绿素的降解^[18]。同时, Cu 还可能与叶绿体蛋白质的 -SH 结合或取代其中 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} ,致使叶绿素蛋白中心离子组成发生变化并失活^[16-19]。过量 Cu 参与植物摄取 Fe 竞争,使 Fe 缺乏而引起叶绿素合成受阻^[20]。许多研究表明,

叶绿素含量与光合作用有正相关的关系,即在一定范围内,随着叶绿素含量的增加,光合强度也在增加;反之,叶绿素含量的降低势必也会导致光合强度的降低^[21],这一点与本研究结果一致。因此,饲料中添加过高剂量铜,造成猪粪中铜的浓缩,导致玉米光合作用受抑制,值得关注。至于猪粪中铜浓度过高对其他作物光合特性的影响规律有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵昕红,李德发,田福刚,等.高锌和高铜对仔猪生长性能、免疫功能 and 抗氧化酶的影响[J].中国农业大学学报,1999,4(1):91-96.
ZHAO Xinhong, LI Defa, TIAN Fugang, et al. Effect of high level of zinc and copper on piglet growth performance, immune response and blood antioxidative enzyme activities in blood [J]. *Journal of China Agricultural University*, 1999, 4(1):91-96.
- [2] 胡筑兵,陈亚华,王桂萍,等.铜胁迫对玉米幼苗生长、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性的影响[J].植物学通报,2006,23(2):129-137.
HU Zhu-bing, CHEN Ya-hua, WANG Gui-ping, et al. Effects of Copper Stress on growth, chlorophyll fluoresce parameters and antioxidant enzyme activities of zeamays seedlings [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2006, 23(2):129-137.
- [3] 姜理英,石伟勇,杨肖娥,等.铜矿区超量积累 Cu 植物的研究[J].应用生态学报,2002,13(7):806-906.
JIANG Li-ying, SHI Wei-yong, YANG Xiao-e, et al. Cu hyperaccumulators in mining area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):806-906.
- [4] Teisseire H, Couderchet M, Vemet G. Phytotoxicity of diuron alone and in combination with copper of folpet on duck weed *Lemna minor*[J]. *Environm Pollution*, 1999, 106:39-45.
- [5] De vos C H, Schat H, Vcoijs R, et al. Copper-induced damage to permeability barrier in roots of silene cucubabus[J]. *Plant Physiol*, 1989, 135:164-169.
- [6] 王 狄,李锋民,熊治廷.铜的植物毒性与植物蓄积的关系 [J]. 土壤与环境,2000,9(2):146-148.
WANG Di, LI Feng-min, XIONG Zhi-ting. Relationship between Copper's Toxicity and Phytoaccumulation [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2):146-148.
- [7] 萧浪涛,王三根.植物生理学实验技术 [M]. 北京:中国农业出版社,2005.
XIAO Lang-tao, WANG San-gen. Experiment technique of plant physiology [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2005.
- [8] 郑爱珍,白 蒿,于海秋,等.铜对马铃薯叶片光合特性的影响[J].农业与技术,1999,19(3):12-14.
ZHENG Ai-zhen, BAI Hao, YU Hai-qiu, et al. Effect of copper on photosynthetic characters in leaves of potato [J]. *Agriculture & Technology*, 1999, 19(3):12-14.
- [9] Katoch S, Jakamiya A. A new leaf copper protein plastocyanin-a natural Hill Oxidant [J]. *Nature*, 1961, 189:605-666.
- [10] 白宝璋,姜润田.铜对马铃薯生物效应的研究 [J]. 吉林农业科学,

- 1994, 1:54-57.
BAI Bao-zhang, JIANG Run-tian. Biological effect of copper on potato[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 1994, 1:54-57.
- [11] 杨丹慧.重金属离子对高等植物光合膜结构与功能的影响[J].植物学通报,1991,8(3):26-29.
YANG Dan-hui. The effects of heavy metals on the structure and function of photosynthetic membranes in higher plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1991, 8(3):26-29.
- [12] Mocquot B, Vangronsveld J, Clijsters H. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzymes activities [J]. *Plant and Soil*, 1996, 182:287-300.
- [13] Ouzounidou G, Moustakas M, Lannoye R. Chlorophyll fluorescence and photoacoustic characteristics in relationship to changes in chlorophyll and Ca + content of a Cu - tolerant *Silene compacta* ecotype under Cu treatment [J]. *Physiol Plant*, 1995, 93:551-557.
- [14] Ouzounidou G. Root growth and pigment composition in relationship to element up take in *Silene compacta* plants treated with copper [J]. *Plant Nutr*, 1994, 17(6):933-943.
- [15] 田生科,李廷轩,杨肖娥,等.植物对铜的吸收运输及毒害机理研究进展[J].土壤通报,2006,37(2):387-395.
TIAN Sheng-ke, LI Ting-xuan, YANG Xiao-e, et al. Mechanisms of copper uptake, transportation and detoxification in plants [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2):387-395.
- [16] 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.
CHU Ling, LIU Deng-yi, WANG You-bao, et al. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pratense*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):119-122.
- [17] 马广岳,施国新,徐勤松,等. Cr^{6+} 、 Cr^{3+} 胁迫对黑藻生理生化影响的比较研究[J].广西植物,2004,24(2):161-165.
MA Guang-yue, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Comparative studies of toxic effect of Cr^{6+} , Cr^{3+} stress on the physiological and biochemical characteristics of *Hydrilla verticillata* [J]. *Guihaia*, 2004, 24(2):161-165.
- [18] Huf A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogenperoxide[J]. *Phytochemistry*, 1982, 21:261-265.
- [19] 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.
WANG You-bao, LIU Deng-yi. Effect of Cu, As and their combination pollution on eco-physiological index of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5):773-776.
- [20] 张开明,黄苏珍,原海燕,等.铜污染的植物毒害、抗性机理及其植物修复[J].江苏环境科技,2005,18(1):4-7.
ZHANG Kai-ming, HUANG Su-zhen, YUAN Hai-yan, et al. Progress in copper toxicity of plant resistance mechanism and phytoremediation [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2005, 18(1):4-7.
- [21] 秦天才,阮 捷,王腊娇.镉对植物光合作用的影响[J].环境科学与技术,2000,9:33-36.
QIN Tian-cai, RUAN Jie, WANG La-jiao. Effect of Cd on the plant photosynthesis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 9:33-36.