

硫脲对花生苗期的毒理效应研究

王 文¹, 周细红¹, 廖柏寒², 李 林¹, 曾清如¹

(1.湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2.中南林业科技大学生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:通过盆栽试验,研究了硝化抑制剂硫脲对花生的生物量、叶片金属离子含量、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明,在低浓度硫脲范围内,其对花生的生长有明显的促进作用,叶片叶绿素含量较高,3种酶的活性随硫脲浓度的增加而升高,体内MDA含量随硫脲浓度的增加而降低;但当硫脲浓度达到 $5.0\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土时,对植株和根系的生长产生了明显的抑制作用,叶片叶绿素含量明显降低,3种酶的活性明显降低,体内MDA的含量显著增加,表明此时硫脲对花生产生了明显的胁迫和毒害作用。

关键词:硫脲;生物量;叶绿素;抗氧化酶;MDA

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1363-05

Phytotoxicity by Thiourea Application in the Seedling of Peanuts

WANG Wen¹, ZHOU Xi-hong¹, LIAO Bo-han², LI Lin¹, ZENG Qing-ru¹

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.The Life Science and the Technical Institute, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The effects of thiourea on the biomass, content of metal ions and chlorophyll level were studied in the leaves of peanut. Effects of thiourea on anti-oxidative system(SOD, POD, and CAT) and content of MDA in the leaves of peanuts were also investigated. Results showed that thiourea had great impact on the growth of peanuts; it could stimulate the growth of seedlings when the concentration less than $2.5\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, under this level, the content of chlorophyll in peanuts maintained at a similar level, while the activities of SOD, POD, CAT increased with the increasing concentration of thiourea and the content of MDA decreased. However, when thiourea concentration was up to $5.0\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, the phytotoxic symptom was found. The growth of seedlings was inhibited and the content of chlorophyll in peanuts decreased to $1.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{FW}$ compared to control. Simultaneously, the activities of SOD, POD, CAT and the content of MDA increased dramatically, which indicated that when thiourea arrived $5.0\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil it could induce environmental stress in the seedlings.

Keywords: thiourea; biomass; chlorophyll; anti-oxidant enzymes; MDA

在我国农业生产中,尿素占氮肥使用量的一半以上,但氮的利用率却只有30%~40%,此外,残留在土壤中的多余氮素对农作物生长和土壤环境会造成负面影响,从而造成一定的环境污染^[1-2]。为了提高尿素中氮的利用率和降低环境污染,人们通常采用添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂的方法来达到目的^[3-4],且研究发现,按一定配比同时添加这两种抑制剂比单独使用某一种抑制剂效果会更好^[4-5]。目前,国内外研制、生产和应用的长效尿素也主要是通过普通尿素生产流

程中添加一定的脲酶抑制剂和硝化抑制剂制成的。脲酶抑制剂可抑制尿素的氨化作用,而硝化抑制剂是抑制氨的亚硝化和硝化作用。

硫脲既是一种硝化抑制剂也是一种脲酶抑制剂,合理的使用硫脲,同等条件下可节省尿素用量20%,提高氮素利用率,减少氮素的损失,由此可减少运输成本,减缓农田和地下水的氮素污染^[2,6-7]。所以,合理使用硫脲,不仅具有巨大的经济效益,而且有良好的社会和生态效益。目前,国内外对硫脲作为硝化抑制剂的效果做了一些研究,发现施用一定量的硫脲能显著延缓尿素的水解,减少氮肥的损失,增加作物产量,提高氮素利用率^[8-10]。但是,施用硫脲所达到的这些结果都是在一定浓度范围内得到的,关于硫脲的最适用量也没有定论,同时,施用不同浓度硫脲对作物的胁

收稿日期:2008-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(30770389)

作者简介:王 文(1985—),女,湖南株洲人,硕士研究生,主要从事环境污染修复与环境毒理方面的研究。

E-mail:000wangwen000@163.com

责任作者:曾清如 E-mail:qrzeng@163.com

迫和毒理效应并未见报道。

本文通过在土壤中施入不同浓度的硫脲和尿素后的花生苗期实验,研究了其对花生生长、叶片叶绿素含量以及植物体内 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 等金属离子含量,并探讨了其对花生叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量的影响,以期为正确评价尿素和硫脲施用带来的环境问题以及合理使用硫脲提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试花生种子为 9760 大籽(由湖南农业大学生命科学技术学院提供),供试尿素为普通尿素,供试硫脲购自国药集团化学试剂有限公司(分析纯),供试土壤取自湖南农业大学菜园的红菜园土,为酸性红壤,测得其基本理化性状见表 1。土壤取样后经自然风干,过 10 目筛后备用。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soil

土壤类型	pH	有机质/%	CEC/ $cmol \cdot kg^{-1}$	碱解氮/ $mg \cdot kg^{-1}$	脲酶活性/ $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$
红菜园土	4.65	3.71	11.03	91	30.72

1.2 研究方法

1.2.1 浸种

挑选优良的花生种子(发芽率一致),用蒸馏水洗干净,于 25 ℃浸种催芽 48 h。挑取种粒饱满,根长度小于 1 cm 且发芽率一致的种子。

1.2.2 花生栽培

实验配备 4 种浓度储备液待用,分别为储备液 I (15 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土尿素+0 土硫脲)、储备液 II (15 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土尿素+1.0 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲)、储备液 III (15 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土尿素+2.5 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲)和储备液 IV (15 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土尿素+ 5.0 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲)。称取 140 g 供试土壤于 200 mL 容器中,分别均匀添加 35 mL 上述 4 种储备液后补充蒸馏水,使土壤田间持水量为 80%,使得肥料均匀分布于容器中,每个浓度做 3 个重复。然后将挑选出的种子 10 粒分别种入每个容器中,放入 25 ℃气候箱光照培养 2 周。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 生物量及生长测定

25 ℃培养 2 周后,将花生苗取出洗净泥沙,晾干,用钢尺量其株高和根长,并记录根重和株重。

1.3.2 金属离子含量的测定

取培养 2 周后的花生的叶,采用原子吸收法分别测定其中交换态 Mn、Zn、Cu 和 Fe 离子的含量。

1.3.3 叶绿素含量的测定

称取 0.25 g 叶于研钵中研烂后用 80%丙酮定容至 25 mL,适当稀释后分别于 645、663 nm 处测定吸光度,计算叶绿素含量^[11]。

1.3.4 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的测定

SOD 活性的测定采用氮蓝四唑染色法^[12],POD 活性的测定采用愈创木酚法^[13],CAT 活性采用紫外吸收法^[13],MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[14]。

2 结果与讨论

2.1 花生的生物量变化及生长情况

2 周后,不同浓度硫脲种植条件下花生苗的生长状况见表 2。试验发现,当硫脲浓度低于 2.5 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土时,能促进花生的生长,叶片墨绿茂盛,植株挺拔,根系发达,随着硫脲浓度的增大,植株更加挺拔和茂盛,植株开始变得粗壮,特别是茎与根连接的地方。但当硫脲浓度达到 5.0 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土时,对花生的生长产生了明显的抑制作用,植株整个变得非常的矮小粗壮,叶片显黄绿色,花生的根变得既短又粗,根毛和次生根几乎没有生长出来,不能充分吸收养分和水分,植株矮小叶片发黄,生长缓慢。

2 周后,不同浓度硫脲种植条件下花生苗的生物量情况见表 3。试验发现,花生苗在硫脲用量为 0、1.0 和 2.5 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土时,根长、根重和株高尚未表现出明显的差异性,但 1.0 和 2.5 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲处理的花生苗株高略高于空白对照,2.5 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲处理的花生苗株重则明显高于 0 和 1.0 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土硫脲处理,表明低浓度硫脲处理在一定程度上能促进花生苗的生长。当硫脲浓度达到 5.0 $mmol \cdot kg^{-1}$ 土后,其根长、株高和株重都明显降低,由于根变得粗而短,因此根重与低浓度硫脲处理的差别不大。

由上述试验结果可知,在低浓度条件下(小于 2.5

表 2 硫脲对花生生长情况的影响

Table 2 The effect of thiourea on the growth of peanut

硫脲浓度/ $mmol \cdot kg^{-1}$ 土	根系	植株
0	根系较发达,侧根多,根毛多	植株墨绿,较高大,叶片宽大
1.0	根系很发达,侧根多,根毛多	植株墨绿,高大,叶片茂盛
2.5	根系发达,侧根较多,根毛少	植株顶端开始发黄,叶片较多
5.0	根系形变,根短而粗,无侧根	植株矮、黄,叶片小,茎粗壮

表 3 硫脲对花生生物量的影响

Table 3 The effect of thiourea on biomass of peanut

硫脲浓度/ mmol·kg ⁻¹ 土	根长/ cm	根重/ g	株高/ cm	株重/ g
0	20.28±1.73b	0.32±0.08b	22.70±1.85b	2.85±0.16ab
1.0	19.89±1.32b	0.20±0.09a	26.04±2.81b	2.76±0.79b
2.5	21.41±2.35b	0.37±0.06b	23.75±1.52b	3.82±0.70c
5.0	12.11±3.23a	0.35±0.05b	10.37±1.15a	1.92±0.25a

注:不同字母表示不同处理间差异显著水平($P<0.05$)。

mmol·kg⁻¹ 土),硫脲能显著促进花生苗的生长,花生根系发达,生物量大。在茼蒿、葡萄、春小麦、水稻、玉米上的相关试验研究表明,一定浓度的硫脲与尿素配施,能够有效地抑制土壤中尿素的水解,同时能够增加作物生物量和产量^[15-17]。尿素施入土壤后,分解速度很快,施用硫脲,已经证明可以抑制土壤的硝化作用,同时增加作物产量^[1,8]。虽然施入硫脲能促进作物的生长,增加作物的生物量,但是,本研究发现,当硫脲浓度达到 5.0 mmol·kg⁻¹ 土时,花生的生长受到了明显的抑制,根变得短而粗壮,生物量明显减少,这说明了高浓度的硫脲对花生产生了明显的胁迫作用。

2.2 硫脲对花生叶片中重金属和叶绿素含量的影响

2 周后,不同硫脲浓度种植条件下花生叶片中的 Cu、Mn、Zn 和 Fe 4 种金属离子含量见表 4。试验结果表明,在 4 种不同硫脲处理条件下,花生体内的 Cu²⁺和 Zn²⁺含量变化不大,但 Mn²⁺和 Fe³⁺含量表现出明显差异,Mn²⁺浓度随硫脲浓度的升高而升高,而 Fe³⁺含量随硫脲浓度的升高而降低。

有研究表明硫脲难以被微生物降解,所以当硫脲用量较大时,由于其强还原性而导致红壤中有效 Mn 的量增加,并对栽培的作物产生伤害^[19]。在我们的花生苗期试验有所体现,花生的受害症状反映出其毒害来源于 Mn 毒,具体表现为花生苗须根的减少、根尖损伤、新根少。另外过量 Mn 会阻碍作物对 Fe 的吸收^[20]。本试验中,花生 Fe³⁺浓度随着硫脲浓度的升高而降低

表 4 硫脲对花生叶片内金属含量的影响(mg·kg⁻¹)Table 4 The effect of thiourea on metal ions content of peanut leave (mg·kg⁻¹)

项目	0 kg ⁻¹ 土	1.0 mmol· kg ⁻¹ 土	2.5 mmol· kg ⁻¹ 土	5.0 mmol· kg ⁻¹ 土
Cu	2.47±0.18a	2.40±0.12a	1.98±0.09a	2.34±0.20a
Mn	45.50±3.57a	64.97±7.03b	61.94±7.06b	81.40±7.91c
Fe	45.80±9.18b	43.88±7.96b	37.82±3.24a	34.09±6.14a
Zn	21.30±0.93a	22.98±2.30a	18.27±1.25a	22.40±2.39a

注:不同字母表示不同组间差异显著水平($P<0.05$)。

(表 4),表明高浓度硫脲种植可能导致了 Mn²⁺的积累,从而影响了花生对 Fe 的吸收。

图 1 为在各浓度硫脲情况下花生叶片中叶绿素的含量。在试验测定叶片叶绿素含量时发现,当硫脲浓度低于 2.5 mmol·kg⁻¹ 土时,叶片叶绿素含量都保持在较高水平,植株墨绿,叶片茂盛;但当硫脲浓度达到 5.0 mmol·kg⁻¹ 土时,叶片中叶绿素含量明显下降,植物叶片失绿症状明显。

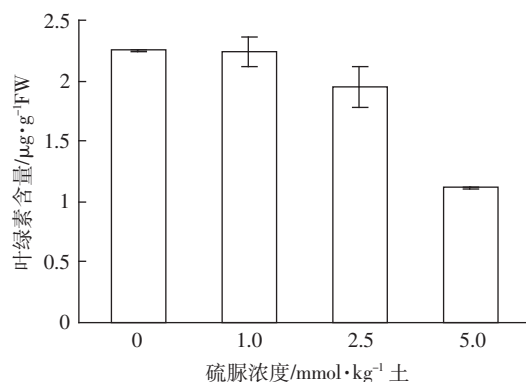


图 1 硫脲对花生植株叶绿素含量的影响

Figure 1 The effect of thiourea on chlorophyll level of peanut

Fe 虽然不是叶绿素的组成成分,但其对叶绿素的合成有重要的作用,铁氧还原蛋白作为光合链中的重要成员,直接参与了植物的光合作用,Fe 还是细胞色素氧化酶的重要成分,可见 Fe 是叶绿素形成不可缺少的金属元素,并且 Fe 在植株体内很难转移。从本研究中花生 Fe³⁺含量可以看出,花生 Fe³⁺浓度随着硫脲浓度的升高而降低,从而造成了花生叶绿素的含量随着硫脲浓度的升高而降低的结果。

2.3 硫脲对花生叶片 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量的影响

不同浓度硫脲种植条件下,花生叶片中的 3 种酶 SOD、POD、CAT 的活性及 MDA 含量见图 2~图 5。如图所示,当硫脲浓度低于 2.5 mmol·kg⁻¹ 土时,花生叶片中 SOD、POD 和 CAT 的活性都比较高,且 3 种酶的活性有随硫脲浓度的增加而升高的趋势,表明硫脲的加入导致了叶片中酶活性的提高。但是,当硫脲的浓度达到 5.0 mmol·kg⁻¹ 土时,3 种酶的活性明显下降,表明本试验中施用的高浓度的硫脲已经对花生有严重的胁迫作用,产生了相应的毒理效应,这与花生的生长状况和生物量的结果相一致。

植物在正常情况下,体内自由基维持在浓度很低的水平,不会引起伤害,但植物遭受某种环境胁迫时,体内自由基就会增多,SOD、POD 和 CAT 是植物体内

保护系统中非常重要的抗逆性酶,对植物体内自由基的清除起着重要作用,在作物抗性机理研究中,其活性的变化已广泛作为指示植物抗御逆境伤害的指标。有研究表明,当作物在一定范围内受到重金属等环境胁迫时,酶的活性随着胁迫程度的增加而升高,但在重度胁迫下,酶的活性会降低^[21-23]。本研究也发现,在低浓度硫脲种植条件下,花生叶片中 SOD、POD 和 CAT 的活性都有所升高。在低浓度硫脲条件下,花

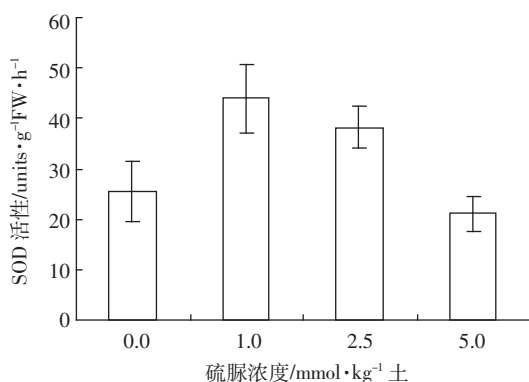


图2 硫脲对花生叶片 SOD 活性的影响

Figure 2 The effect of thiourea on SOD activities in peanut leave

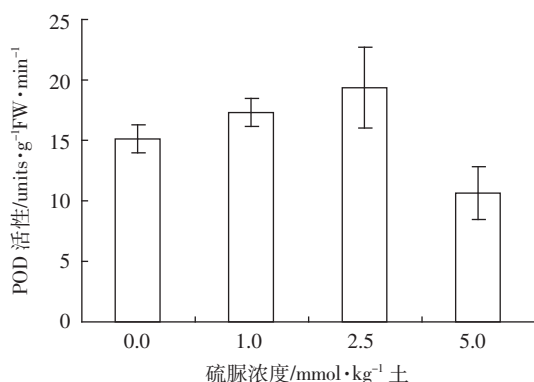


图3 硫脲对花生叶片 POD 活性的影响

Figure 3 The effect of thiourea on POD activities in peanut leave

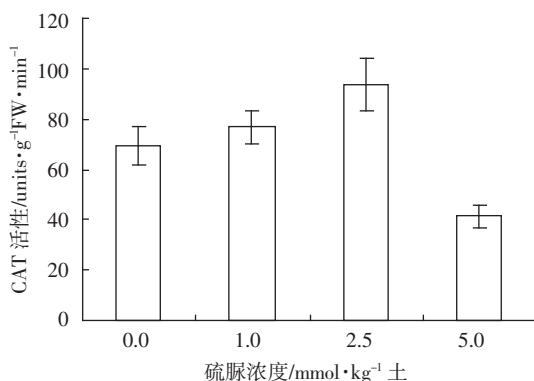


图4 硫脲对花生叶片 CAT 活性的影响

Figure 4 The effect of thiourea on CAT activities in peanut leave

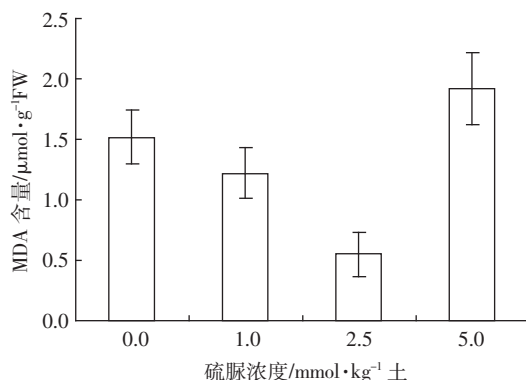


图5 硫脲对花生叶片 MDA 活性的影响

Figure 5 The effect of thiourea on MDA activities in peanut leave

生通过增加酶的活性来提高清除自由基的能力,但是当硫脲的浓度增加到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,花生体内自由基积累超过了酶的清理阈值,从而直观表现为体内酶活性的下降,并对花生的生长产生了毒害作用,这也可以从 MDA 含量的变化得到体现。

如图 5 所示,在硫脲浓度低于 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,花生叶片内 MDA 的含量随硫脲的浓度的升高而降低,当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,MDA 的含量急剧上升。MDA 水平与植物受胁迫的程度密切相关,当植物受胁迫时,质膜透性增加,其直接效果是体内的 MDA 含量明显上升。本研究中,硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时 MDA 含量明显上升,表明此时花生已经受到了明显的环境胁迫作用,此时硫脲已经对花生产生了毒害作用。

3 结论

(1)低浓度硫脲能促进花生的生长,当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土后,对花生的生长产生了明显的抑制作用。

(2)花生苗植株叶中的 Mn^{2+} 浓度随硫脲浓度的升高而升高,受害症状反映出其毒害来源于 Mn 毒,具体表现为花生苗须根的减少和根尖损伤。

(3)过量 Mn 阻碍了花生对 Fe 的吸收,使花生叶片中 Fe 含量下降,叶片表现出失绿症状,叶片叶绿素含量降低。

(4)低浓度硫脲能促进花生的 SOD、POD 和 CAT 活性增强,且其活性随着硫脲浓度的增大而升高,MDA 含量随着硫脲浓度的增大而降低。当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,3 种酶活性明显降低,且 MDA 含量显著上升,说明此时硫脲已经对花生产生了明显的毒害作用。

参考文献:

- [1] 华剑峰, 蒋倩, 施春建, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 94-99.
HUA Jian-feng, JIANG Qian, SHI Chun-jian, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 94-99.
- [2] Mosier A R, Bleken M A, Chaiwanakupt P, et al. Policy implications of human-accelerated nitrogen cycling[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 57/58: 477-516.
- [3] 徐星凯, 周礼恺, Oswald V C, 等. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 339-345.
XU Xing-kai, ZHOU Li-kai, Oswald V C, et al. Effect of urease/nitrification inhibitors on the distribution of transformed urea-N forms in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 339-345.
- [4] Gioacchini P, Nistri A, Marzadori C, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36: 129-135.
- [5] Chen L J, Boeckx P L, Zhou L K, et al. Effect of hydroquinone, dicyandiamide and encapsulated calcium carbide on urea-N uptake by spring wheat, soil mineral N content and N₂O emission[J]. *Soil Use and Management*, 1998, 14: 230-233.
- [6] 吕殿青, 同延安, 孙本华, 等. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8-15.
LV Dian-qing, TONG Yan-an, SUN Ben-hua, et al. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(1): 8-15.
- [7] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 79-83.
WANG Zhao-hui, ZONG Zhi-qiang, LI Sheng-xiu, et al. Nitrate accumulation in vegetable and its residual in vegetable fields[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 23(3): 79-83.
- [8] 孙爱文, 石元亮, 郭爱民, 等. 硫脲在农业中的研究和应用[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 377-380.
SUN Ai-wen, SHI Yuan-liang, GUO Ai-min, et al. Research and application of thiourea in agriculture[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 377-380.
- [9] Saha M P. Effect of thiourea, thiamine and ascorbic acid on growth and yield of maize[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1993, 171: 65-69.
- [10] Vidal P I, Longeer S L. Use of nitrification inhibitors, nitrapyrin and thiourea on spring sown wheat[J]. *Agriculture Tecnica*, 1988, 48(2): 137-141.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 164-165.
LI He-sheng. Experimental principle of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 164-165.
- [12] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 97-99.
ZOU Qi. Experiment instruction of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1995: 97-99.
- [13] 李宏文. 不同光照强度的紫外光对几种水生植物的过氧化氢酶(CAT)活性的影响[J]. 环境科学, 1993, 14(4): 74-77.
LI Hong-wen. The effect of different light intensity of UV on the catalase(CAT)activities of several species of aquatic[J]. *Plants Journal of Environmental Sciences*, 1993, 14(4): 74-77.
- [14] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 305-306.
TANG Zhang-cheng. Modern experiment guide of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1999: 305-306.
- [15] Kopcanova L, Bumhala L. Thiourea as a nitrification inhibitor[J]. *Ros-tlinna Vyroha*, 1988, 34(9): 969-976.
- [16] 王东辉, 梁宗锁, 党康, 等. 赤霉素、硫脲处理对黄精根状茎和须根发生的影响[J]. 西北农业学报, 2006, 15(4): 153-155.
WANG Dong-hui, LIANG Zong-suo, DANG Kang, et al. Effect of GA₃ and thiourea on newly developed rhizome and fibrous root of polygonatum sibiricum redoute[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2006, 15(4): 153-155.
- [17] 祁桂林, 陈平, 黄庆. 硫脲对水稻幼苗生长和部分生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 156-157.
QI Gui-lin, CHEN Ping, HUANG Qing. Effect of thiourea on growth and some physiological character of rice seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(1): 156-157.
- [18] 孙爱文, 石元亮, 尹宏斌, 等. 硫脲对脲酶活性和尿素氮转化的试验初报[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 156-158.
SUN Ai-wen, SHI Yuan-liang, YIN Hong-bin, et al. Effect of thiourea on urea activities and transformation of urea-N[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 156-158.
- [19] Xiong X J, Makoto H, Hirokazu T, et al. Analysis of acclimation behavior against nitrification inhibitors in activated sludge processes[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, 86(2): 207-214.
- [20] 任立民, 刘鹏. 锰毒及植物耐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 357-367.
REN Li-min, LIU Peng. Review of manganese toxicity and the mechanisms of plant tolerance[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2007, 27(1): 357-367.
- [21] 彭艳, 李洋, 杨广笑, 等. 铝胁迫对不同小麦 SOD, CAT, POD 活性和 MDA 含量的影响[J]. 生物技术, 2006, 16(3): 38-42.
PENG Yan, LI Yang, YANG Guang-xiao, et al. Effects of aluminum stress on the activities of SOD, CAT, POD and the contents of MDA in seedling of different wheat cultivars[J]. *Bio Technology*, 2006, 16(3): 38-42.
- [22] 杨涛, 李传勇, 汤惠华. 乐果对菠菜叶片 POD、SOD、CAT 活性及 MDA 含量的影响[J]. 亚热带植物科学, 2004, 33(4): 19-21.
YANG Tao, LI Chuan-yong, TANG Hui-hua. Effects of dimethoate on activities of POD, SOD, CAT and MDA content in spinach leaves[J]. *Subtropical Plant Science*, 2004, 33(4): 19-21.
- [23] 唐咏. 铅污染对辣椒幼苗生长及 SOD 和 POD 活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(1): 26-28.
TANG Yong. Effect of lead pollution on the growth and the activity of SOD and POD in hot pepper seedlings[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2001, 32(1): 26-28.