

锗对水稻的生态毒理效应及临界指标

林匡飞^{1,2}, 徐小清², 金 霞³, 倪海燕⁴, 项雅玲⁴

(1. 华东理工大学危险化学品风险评价与控制研究中心, 上海 200237; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;
3. 中国科学院武汉植物研究所, 武汉 430072; 4. 农业部环境质检中心(武汉) 430070)

摘要:土壤添加 Ge 盆栽试验研究表明, 低浓度 Ge (<4 mg/kg) 对水稻根和地上生物量、叶绿素 a 含量有促进作用, 并整体提高了作物抗氧化酶能力, 使 MDA 下降, SOD、CAT、POD、GSH-Px 活性相应提高。而高浓度 Ge (>15 mg/kg) 对水稻根和地上生物量、叶绿素 a 含量有明显的抑制作用, 对抗氧化酶系统产生胁迫效应, 使 POD 明显上升, MDA 上升, SOD、CAT 酶活性明显下降。在高浓度 Ge 胁迫下, 植物细胞中抗氧化作用酶系统的受损打破了植物细胞内活性氧产生与清除间的正常平衡状态, 积累过量的活性氧, 使活性氧产生并积累, 过量的活性氧引起膜脂过氧化程度加重, 从而对植物产生毒害。

各项生理指标与土壤 Ge 处理浓度之间相关分析表明, 土壤 Ge 浓度与地上部干重相对百分率, 根干重百分率、叶绿素 a/b、MDA、SOD、CAT 之间有显著相关性。比较胁迫效应 10% 值的临界指标 EC_{10} 值表明, 作物地上部干重抑制率和根干重抑制率作为土壤临界值制定的依据更为可靠, EC_{10} 为 7 mg/kg。

关键词: Ge 污染; 抗氧化酶系统; 生态毒理效应; 临界指标

Eco-toxicological effects of germanium stress on rice (*Oryza sativa* L.) and their critical value

LIN Kuang-Fei^{1,2}, XU Xiao-Qing², JIN Xia³, NI Hai-Yan⁴, XIANG Ya-Ling⁴ (1. Research Center of Risk Assessment and Management on Hazardous Chemicals, East China University of Science and Technology, Shanghai, 200237, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China; 3. Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China; 4. Agro-Environmental Monitoring Center of Wuhan, Minister of Agriculture, 430070, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 108~114.

Abstract: Germanium (Ge), a IV b group element, exists in soil, rocks, animals, and plants in many organic or inorganic forms. While germanium dioxide (GeO_2) is the main natural inorganic type, the organic type has three subtypes. The application of both inorganic and organic germanium is increasing in recent years. Germanium has gradually replaced silicon in modern electronic industry, especially in integrated circuit (IC) manufacturing; germanium tetrachloride ($GeCl_4$) is employed in making the optical fibres for high speed (digital corresponding) transmission of digital data.

Germanium compounds are discharged to the environment with solid wastes from the electronic industry causing potential risks to ecosystem in different levels, i. e., individual, population, community and ecosystem. Their fate and potential impacts are so far still unknown. The aim of this study was to determine the eco-toxicology effects of Ge on the growth and scavenging system of activated oxygen of rice (*Oryza sativa* L.). Soil cultures were employed to study the physiological and ecological responses of rice. Nine concentration levels of Ge (0, 2, 4, 8, 12, 15, 30, 50, 100 mg/kg) were used in the yellow-brown soil experiments. The test results showed that a low level of Ge (<4 mg/kg) added to soil enhanced rice biomass, chlorophyll a, and antioxidative enzymes activities and increased SOD, CAT, POD, GSH-Px activity, while decreased MDA content. The

基金项目:湖北省科技攻关计划引导资助项目(2001AA201C10)

收稿日期:2004-04-07; **修订日期:**2004-07-28

作者简介:林匡飞(1963~), 男, 博士, 副教授, 主要从事污染生态学和生态风险研究。E-mail: kflin@ecust.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: the Hubei Provincial Science Research Guide Project (No. 2001AA201C10)

Received date: 2004-04-07; **Accepted date:** 2004-07-28

Biography: LIN Kuang-Fei, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in pollution ecology and ecological risk assessment. E-mail: kflin@ecust.edu.cn

results also showed a high level of Ge ($>15\text{mg/kg}$) added to soil inhibited the biomass, chlorophyll a and had a stress effect on antioxidative enzyme system resulting in significantly increased POD activity, increased MDA content, and, at the same time, significantly decreased SOD and CAT. These results indicated that, under the stress of a high Ge level, the decline of antioxidative enzyme activities broke the normal balance between production and elimination of active oxygen, resulting in the accumulation of excessive active oxygen which aggravated lipid peroxidation and thereby caused toxic effects on rice. In pot experiments, the concentration of Ge in soil showed significant correlation to the physiological indexes (roots biomass, shoots biomass, chlorophyll a/b, MDA, SOD, CAT). The 10 % inhibition rate of shoots biomass, or EC_{10} , was found to be a good indicator of the critical value for Ge in soil. For this study, EC_{10} was 7 mg/kg.

Key words: germanium pollution; antioxidative enzymes; ecological effect; critical value

文章编号:1000-0933(2005)01-0108-07 中图分类号:Q142,Q945,X171 文献标识码:A

Ge 资源的开发和利用,特别是在电子工业和医学领域的广泛应用,使 Ge 的生态风险问题愈来愈受关注,据统计全球每年 Ge 产量为 30~80 t^[1]。由于 Ge 原子比 Si 传导效果好得多,现代电子工业特别是集成电路逐渐用 Ge 替代 Si, GeCl_4 作为光纤材料在高速度数字通信的今天被大量应用^[2]。电子垃圾等含 Ge 废物的增加,含 Ge 废物对水体和土壤及生态影响倍受人们关注。在亚洲和欧洲含 Ge 食品和饮料被用于抗癌药物^[3,4],然而 Ge 的生理毒性逐渐被证实^[5,6]。而高浓度 Ge 对苗期作物生长影响,对叶绿素及抗氧化酶体系的影响,国内外报道较少。在生物系统进化进程中,细胞内形成了防御活性氧毒害的保护机制,包括酶性的和非酶性的防御系统。它们在生物体抗氧化胁迫、保持机体正常的结构和功能方面起着重要作用^[7~11]。目前,有关环境胁迫对植物抗氧化体系影响的研究大多集中在干旱、涝渍、温度、强光和紫外光、盐度等方面^[9,12~17],而污染物的影响多为重金属、表面活性剂和农药^[18~47],有关土壤 Ge 污染对作物的生理生化影响的研究尚未见报道^[48,49]。本文主要通过土壤 Ge 对代表作物水稻苗期生长,叶绿素含量及 SOD, CAT, POD, MDA, GSH-Px 影响的研究,建立 Ge 对作物的生化影响及生态毒理数据库,为土壤-植物系统中新化学物质生态毒理效应的研究和资源开发应用中生态风险评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验为黄棕壤土,取自省农科院试验田,供试土壤理化性状 pH 6.46,有机质 24.11 g/kg,全氮 1.06 g/kg,全磷 1.62 g/kg,全钾 15.8 g/kg,CEC 11.23cmol(+1)/kg,碱解 N 85.2mg/kg,速效 P 55.2mg/kg,速效 K 151.2 g/kg,有效硅 142.5 mg/kg,全 Ge 0.82 mg/kg。供试作物早稻中组一号。试验用氧化锗为光谱纯,由中国有色金属研究院提供。

1.2 试验设计

盆栽试验在省农科院土肥所盆栽试验场进行,试验设计每种设 9 个浓度,Ge 处理为:CK, 2, 4, 8, 12, 15, 30, 50, 100mg/kg, 4 次重复。试验采用 $35 \times 28\text{cm}^3$ 的塑料桶装土,每盆装土 14kg,将氧化锗配制成一定浓度的溶液,然后均匀喷施在过 5mm 筛的土中,充分混匀,然后装盆,施复合肥(N:P:K 为 15:15:15)2.0g,肥料与土壤混合均匀,土壤淹水 7d 后,移栽水稻秧苗,每盆 4 穴。

1.3 分析与测试方法

水稻秧苗移栽 30 d 后,分别取各处理组同一功能区的鲜叶 0.25g,研磨匀浆,用 721A 型光光度计分别测定 440, 645, 663nm 处吸光值,计算叶绿素 a, 叶绿素 b, 叶绿素 a+b 和类胡萝卜素含量(mg/g FW)^[50]。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定,按 Giannoplitis 和 Ries 方法^[51],酶活力单位用抑制氮蓝四唑(NBT)光化还原 50% 时所需酶量表示。过氧化酶(CAT)活性测定,采用的方法,活性单位用在 20℃ 条件下 1min 内 1g 植物材料分解过氧化氢的微摩个数表示。过氧化物酶(POD)活性测定,采用愈创木酚作底物,加入 H_2O_2 后,在波长 470nm 处用 GBC-911A 紫外可见分光光度计进行时间扫描, $\Delta A/(\text{g} \cdot \text{min})$ ^[38]。丙二醛(MDA)测定,采用 Health 和 Packer 方法^[52],按 $\Delta E_{\text{mol}}(532 \sim 600\text{nm}) = 1.55 \times 10^5$ 换算,单位 nmol/g FW。谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性测定,按 Paglia DE 法^[53],以酶单位/g 鲜重(U/g)表示酶活性。

2 结果与讨论

2.1 土壤 Ge 污染对水稻生长的影响

土壤 Ge 污染对拔节期水稻的影响研究结果(图 1)表明,低浓度 Ge(2~4mg/kg)对水稻地上部生长有轻微促进作用。当土壤 Ge 浓度大于 8mg/kg 时,对水稻产生负影响,与对照相比,地上部(干重)抑制率分别为 9.16%。当土壤 Ge 浓达到 15mg/kg 时,对水稻的地上部(干重)抑制率为 37.58%。Ge 对水稻根的危害稍轻于地上部的危害(图 1),低浓度 Ge(2~4mg/kg)对根部生长有轻微促进作用。当土壤 Ge 浓度大于 8mg/kg 时,产生抑制作用,此时,与对照相比,Ge 对水稻的抑制率为 9.16%。而当土壤 Ge 浓度为 12mg/kg 时,水稻根抑制率较对照有明显差异,抑制率达 10.13%,达到极显著水平($P < 0.01$)。当土壤 Ge 浓

度为 30mg/kg 时,水稻根部(干重)抑制率达 71.82%。而当土壤 Ge 浓度为 100mg/kg 时,水稻完全死亡。Ge 与其他重金属污染一样,通过影响酶促生理活动,而对植物的光合呼吸代谢功能产生不良影响,从而对水稻生长产生抑制^[23,29,34,38,45~47]。

2.2 土壤 Ge 污染对水稻叶绿素含量的影响

重金属元素能引起植物的“黄化症”已被许多实验所证实^[21~24,28,29,34,38]。由图 2 可知,低浓度 Ge 有轻微促进作用,高浓度时产生抑制。当土壤 Ge 浓度为 15mg/kg 时,对水稻的叶绿素 a 含量有明显抑制作用,达到极显著水平($P<0.01$)。当 Ge 浓度为 50mg/kg 时,对水稻叶绿体 a 含量抑制率达到 24.28%。Ge 对叶绿素 b 影响不大。由图 2 可知,作物叶绿素 a/b 也随着土壤 Ge 浓度增高而随之下降。

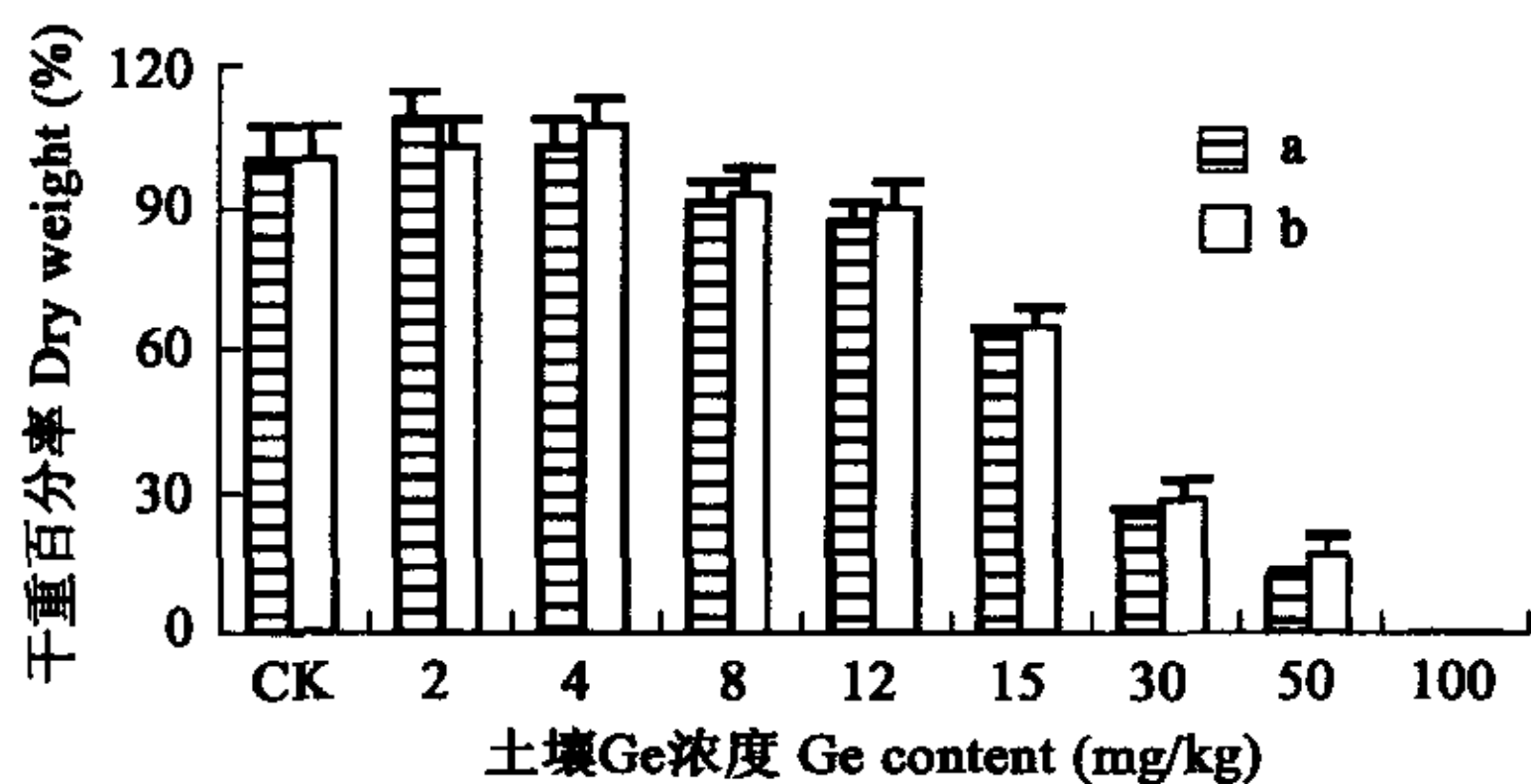


图 1 Ge 对水稻地上部生物量影响

Fig. 1 Effect of Ge added to soil on biomass of rice

a 地上部生物量 Shoots biomass; b 根部生物量 Root biomass

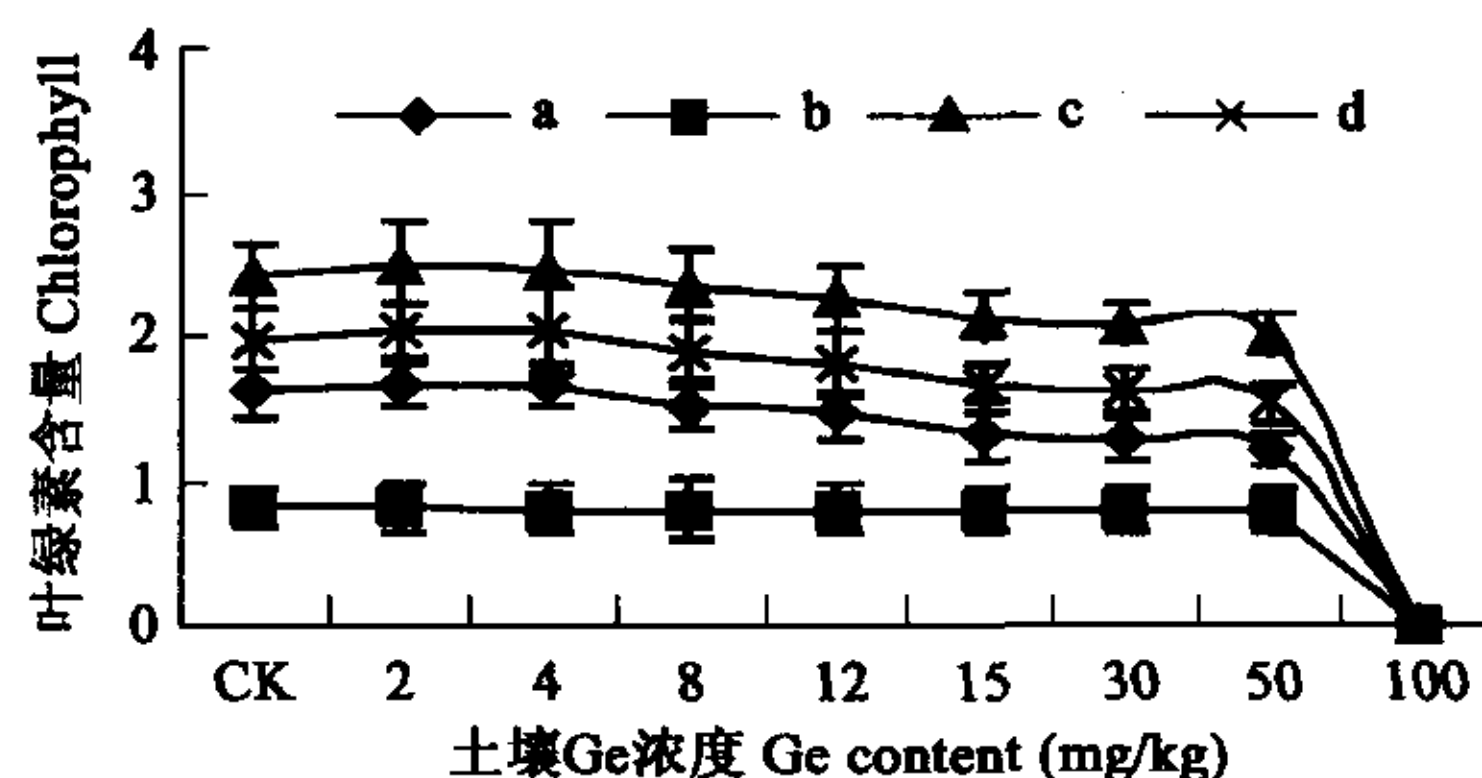


图 2 Ge 对水稻叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of Ge on chlorophyll contents of rice leaves

a 叶绿素 a Chlorophyll a; b 叶绿素 b Chlorophyll b; c 叶绿素 a+b Chlorophyll a+b; d 叶绿素 a/b Chlorophyll a/b

Ge 对水稻影响,苗期表现叶色黄一段、绿一段,及水稻叶尖、叶缘铁锈斑,都是叶绿素破坏结果。因为诱导这些黄化症的主要原因是叶绿素的合成受阻,因为植物光合作用主要靠其作用中心的叶绿素分子。叶绿素中又以叶绿素 a 为重要色素,因此叶绿素 a 含量的多少直接标志着作用生长能力的强弱。徐金森等^[48]采用水培法研究 Ge、Si 对水稻营养生长的影响表明,随着水培液 GeO_2 浓度增加,水稻叶片叶绿素含量也随之下降,两者呈显著负相关,Ge 浓度 0.02mg/L 时基本无影响,Ge 浓度大于 0.2mg/L 时产生抑制作用。许崇山等^[50]水培法研究 Ge 浓度与水稻功能叶片叶绿素含量呈显著负相关,当 Ge 浓度为 0.4mg/L 时,分蘖期叶绿素抑制率达 7.3%,孕穗期抑制率为 13.1%,乳熟期为 26.7%。这表明 Ge 对水稻叶绿素含量的影响在水稻后期较苗期大。以上研究与本文比较一致。Cd 污染后的番茄的叶绿素 a 和 b 含量均随 Cd 浓度增大而减少,a/b 值随 Cd 浓度增大而增大,表明 Cd 对番茄叶绿素 b 的影响比叶绿素 a 大^[19]。许多实验表明,作物叶绿素总和、叶绿素 a、叶绿素 b 的含量随着土壤 Cu、Pb、Cd、Hg、As 含量增加而降低^[23,24,28,29,34,38]。曾青等^[45,46]曾报道高浓度 La 对油菜叶绿素 a 有明显抑制作用,对叶绿素 b 影响不大,叶绿素 a/b 随着土壤 La 浓度增加而下降,其研究与本文比较一致。

2.3 土壤 Ge 污染对水稻叶细胞膜脂质过氧化水平的影响

环境胁迫诱发的活性氧自由基伤害生物膜过程中,最重要的脂质过氧化产物是 MDA,它是一种高活性的脂质过氧化产物,能交联脂类、核酸、糖类及蛋白质,也可使蛋白质的 SH 基氧化^[25,26]。SH 基对于维持蛋白质和细胞膜的正常构像很重要,如加外源 MDA,会导致 SH 基加快氧化,含量降低,伴随细胞质膜受损伤,电解质泄漏严重^[25]。本实验研究表明(图 3),低浓度 Ge (1~12mg/kg)胁迫下,植物体叶细胞 MDA 含量明显下降,其中 Ge 浓度 4mg/kg 时,下降最为明显,水稻 MDA 比对照下降了 20.73%。随着土壤 Ge 浓度的升高,植物体内叶细胞 MDA 含量开始上升,当土壤 Ge 浓度 15mg/kg 时,水稻叶细胞 MDA 含量比对照上升了 17.1%,达极显著水平($P<0.01$)。当土壤 Ge 浓度为 50mg/kg 时,与对照相比,水稻叶细胞 MDA 增加了 87.4%。高浓度 Ge 处理使植物体内 MDA 高度积累,其含量的增加显示膜脂过氧化水平升高,造成膜透性增大,膜结构受损伤程度加深,使植物的抗逆能力减弱。许多实验表明,随着 Cu、Pb、Cd、Hg 含量增加植物体内 MDA 高度积累,膜结构受损伤程度加深^[23,30~33,38,39],这些研究与 Ge 比较一致。

2.4 土壤 Ge 污染对水稻 SOD、CAT、POD 活性的影响

SOD、CAT、POD 共同组成植物体内一个有效的活性氧清除系统,三者协调一致的共同作用,能有效清除植物体内的自由

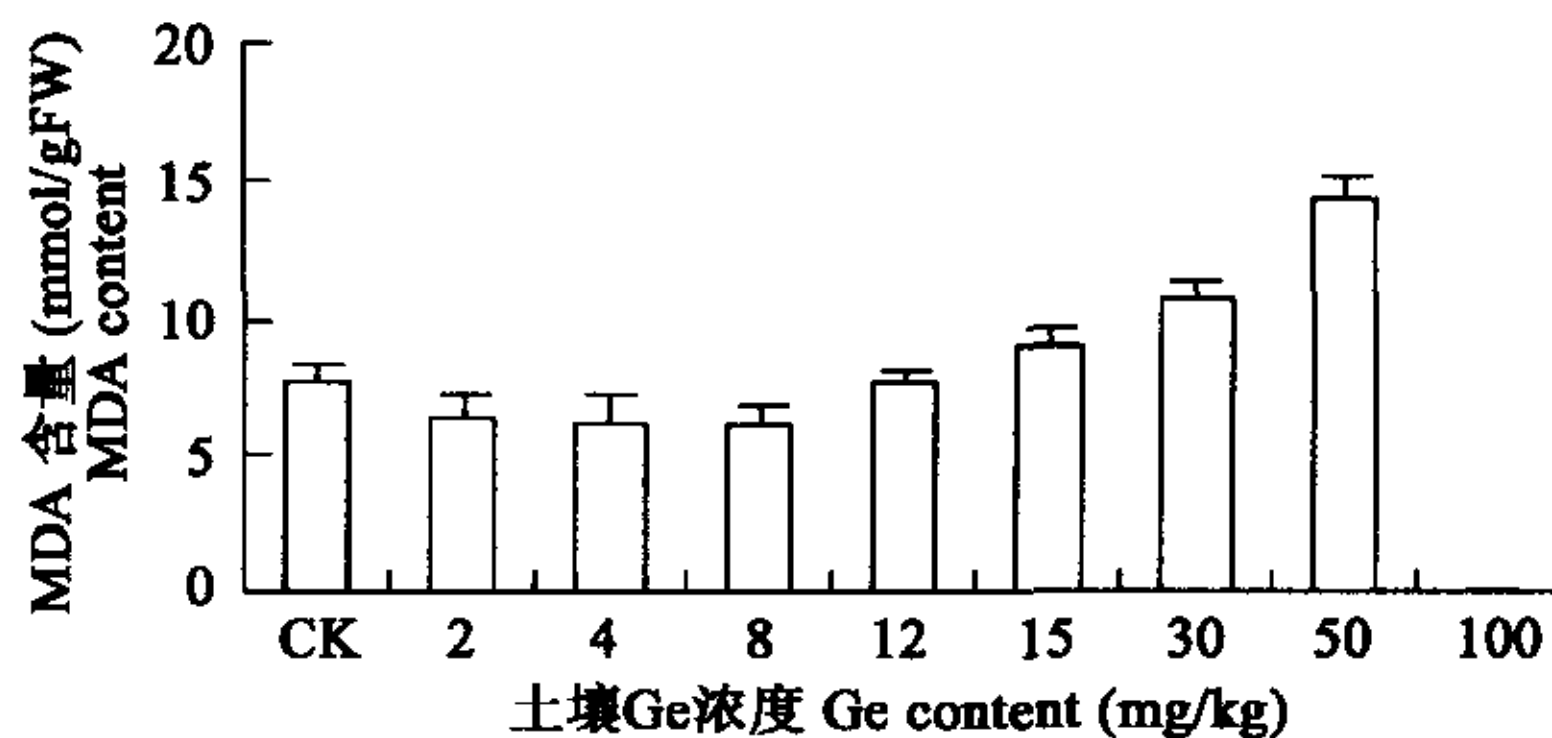


图 3 Ge 对水稻叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Fig. 3 Effect of Ge on contents of MDA in leaves of rice

基和过氧化物^[25,26,32]。过氧化氢酶在机体内的作用一般是与 SOD 协同起保护作用,将由 SOD 歧化产生的 H₂O₂ 降解为 H₂O 和 O₂,以清除 H₂O₂ 的毒害^[9,16],并通过减少 Fenton 反应和 Haber-Weiss 反应的底物 H₂O₂ 和 O₂ 限制 OH· 的生成。由图 4 可知,低浓度 Ge 对作物 SOD 活性有刺激作用。当土壤 Ge 浓度为 4mg/kg 时,水稻 SOD 活性比对照增加了 32.6%,达极显著水平。而当土壤 Ge 浓度为 8mg/kg 时,水稻 SOD 活性开始下降。当土壤 Ge 浓度为 12mg/kg 时,水稻 SOD 活性比对照下降了 12.9%,与对照相比达极显著水平($P<0.01$)。当土壤 Ge 浓度为 50mg/kg 时,水稻 SOD 活性下降了 57.56%。

由图 4 可知,Ge 污染对水稻 CAT 活性的影响比较明显。当土壤 Ge 浓度为 2mg/kg 时,CAT 上升 13.3%。当土壤 Ge 浓度为 4mg/kg 时开始下降,当土壤 Ge 浓度为 12mg/kg 时,下降明显,与对照相比有显著差异,达 13.47%。当土壤 Ge 浓度为 50mg/kg 时,下降达 48.04%。

过氧化物酶(POD)是卟啉环中含有铁的金属蛋白质,它是一种选择性分泌酶,呈现同工酶的伤诱导特性,是植物代谢的末端氧化酶之一^[7,8]。过氧化物酶能与过氧化氢形成一种化合物,在这种化合物中过氧化氢被激活,并能氧化酚和芳香胺,其作用如同氢的受体,而 H₂O₂ 被转化为 H₂O 和 O₂。而过量的过氧化氢及氰酸钠,叠氮化钠、氢氧化铵,一氧化氮等抑制 POD 活性。Wise 等^[22]研究了 POD 活性与水生植物随污染胁迫的能力之间的关系,发现 POD 在清除体内活性氧方面有重要作用。Ge 污染对作物 POD 活性的影响研究表明(图 4),随着土壤 Ge 浓度增加,水稻 POD 活性也逐渐升高,当土壤 Ge 浓度为 50mg/kg 时,水稻 POD 增高了 36%。许崇山等^[49]水培试验证实 Ge(0~0.5mg/L)胁迫水稻 POD 持续升高。徐金森等^[9,16]水培试验也证实 Ge(0~3.0mg/L)胁迫水稻 POD 持续升高,并证明,锆浓度越高,叶片过氧化物酶活性越强,越在生育后期,高浓度 Ge 引起的 POD 增加幅度越大^[49],Ge 可能促进器官衰老。许多学者研究表明,随着 Cu、Pb、Cd、Hg 含量增加植物体内 CAT 明显下降,SOD 下降不明显,POD 升高^[23,,30,31,39~41],这些研究与 Ge 比较一致。

2.5 土壤 Ge 污染对水稻谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的影响

Ge 对水稻谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的影响表现在土壤 Ge 浓度 8mg/kg 时,出现最高值,Ge 浓度大于 12mg/kg 时,又开始下降,50mg/kg 时,达到最小。Ge 污染对作物抗氧化酶系统的影响表现为 MDA 的持续升高,还表现为 POD 升高,SOD 和 CAT 下降。由图 5 可见,低浓度 Ge 促进 GSH-Px 的活性,当土壤 Ge 浓度为 8mg/kg 时,水稻 GSH-Px 活性比对照增加了 54.6%,而随着 Ge 浓度的逐渐增加,GSH-Px 逐渐下降。当土壤 Ge 浓度为 50mg/kg 时,水稻 GSH-Px 活性下降到比对照水平。

2.6 土壤 Ge 浓度与水稻生理指标的相关分析

土壤 Ge 处理浓度与作物生理生化指标相关分析表明,土壤 Ge 浓度与叶绿素 b,POD,GSH-Px 无相关性,而与地上部干重相对百分率,根干重相对百分率,叶绿素 a/b,SOD,CAT 有极显著的负相关(表 1),与 MDA 有极显著的正相关。由此可见,随着土壤 Ge 污染的增加,代表作物产量的生理指标随之下降,而抗氧化酶系统的(SOD,CAT)随之下降,MDA 随之上升。

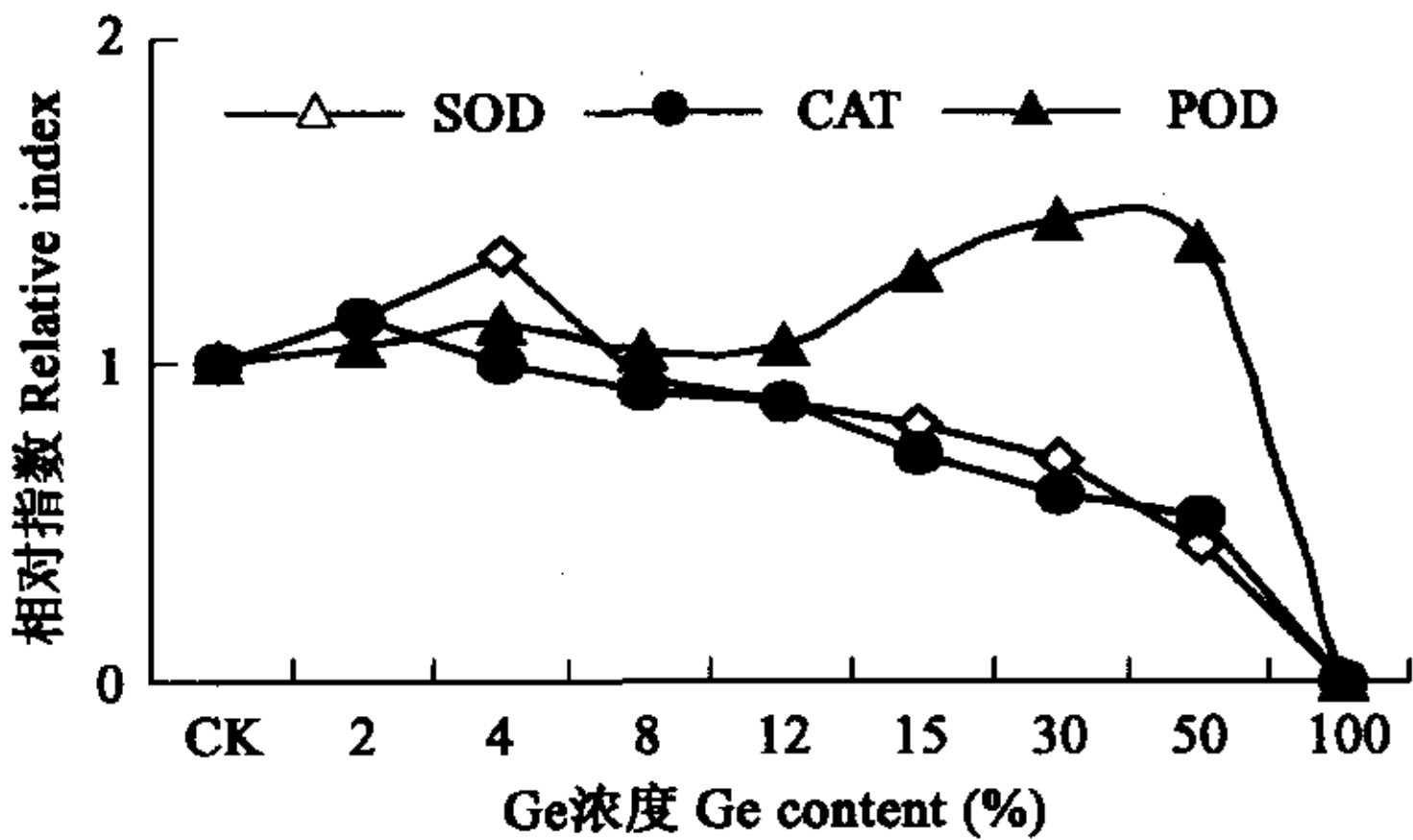


图 4 土壤 Ge 污染对水稻叶片 SOD、CAT、POD 的影响
Fig. 4 Effect of Ge added to soil on SOD, CAT and POD in leaves of rice

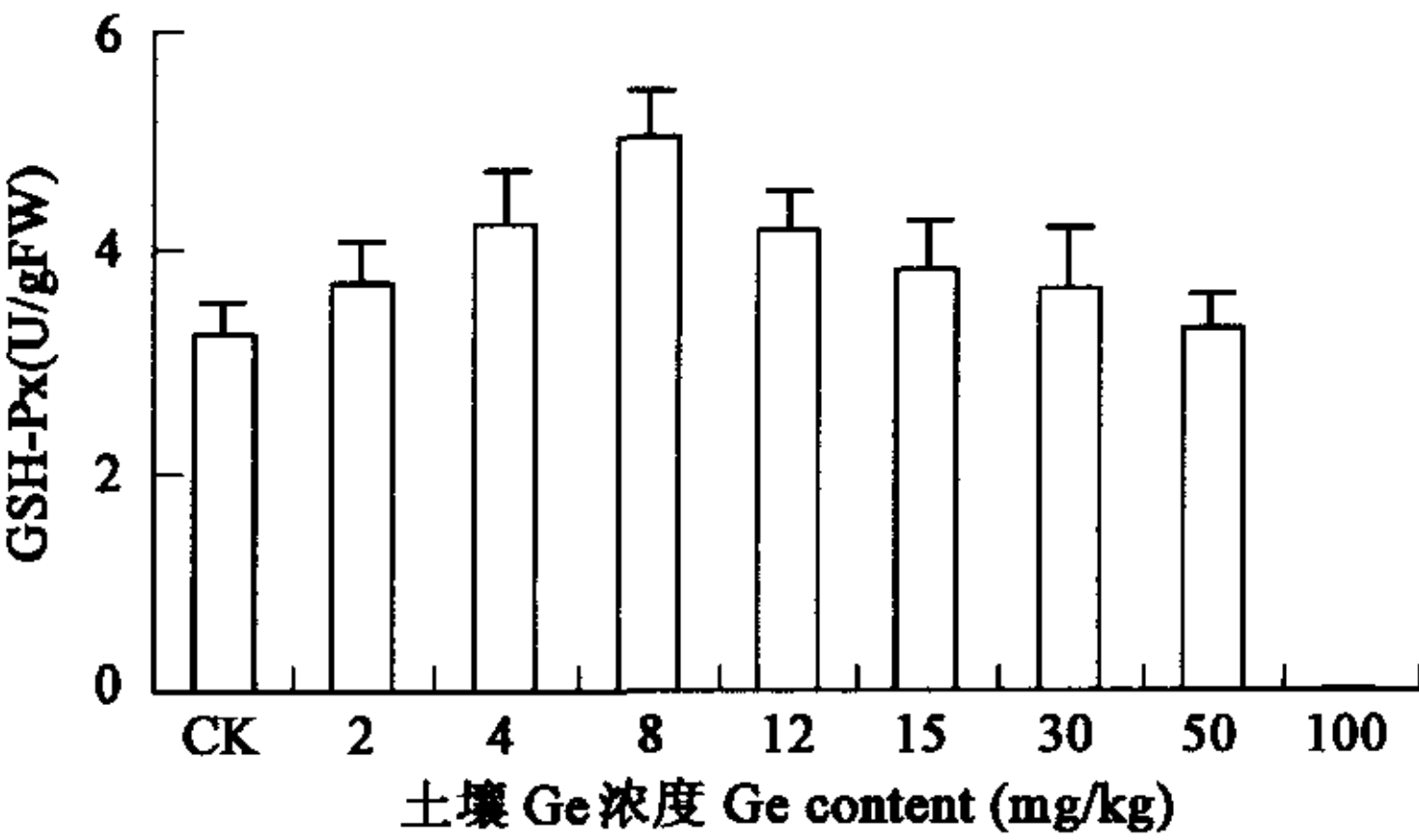


图 5 Ge 对水稻叶片 GSH-Px 活性的影响
Fig. 5 Effect of Ge on the activity of GSH-Px in leaves of rice

表 1 土壤 Ge 浓度与水稻生理指标回归方程

Table 1 The interrelation among the physiological indexes of rice and Ge concentration						
生理指标(Y) Physiological indexes		回归方程 Equation	n	r		临界值 EC ₁₀
地上部干重	Shoots biomass	Y=-2.10X+105	8	-0.96	**	7.1
根干重	Root biomass	Y=-1.99X+105	8	-0.96	**	7.8
叶绿素 a/b	Chlorophyll a/b	Y=-0.01X+1.98	8	-0.89	**	18
MDA 含量	MDA content	Y=0.16X+5.96	8	0.96	**	15
SOD 活性	SOD activity	Y=-1.25X+96	8	-0.89	**	15
CAT 活性	CAT activity	Y=-5.97X+524	8	-0.92	**	10

2.7 土壤 Ge 污染的比较污染生态学研究

应用作物苗期生理指标作为污染物临界指标制定的依据国内外开展较少,国内有学者提出用 POD 作为鉴别环境污染对植物毒性及临界含量的指标^[45,46]。此外有学者提出叶绿素含量和叶绿素 a/b 也是衡量叶片生长状况的重要指标^[24,35,45,46]。本文对各项生理指标与土壤 Ge 处理浓度之间进行了相关分析,确定了土壤 Ge 浓度与地上部干重相对百分率、根干重百分率、MDA、SOD、CAT 之间有相关性,并按抑制或增加 10% 值作为临界指标 EC_{10} 值。由此对各生理指标敏感度的比较结果表明,由图 6 和表 1 可知,水稻各生理指标土壤 Ge 临界值大小顺序为叶绿素 a/b>MDA>SOD>CAT。由此可知 CAT 为最敏感生理指标,而地上部干重抑制率与 CAT 最敏感生理指标比较更为敏感。由于各种作物本身存在差异,很难用统一的某项指标作为临界值确定的依据,而相对而言,作物地上部干重抑制率作为土壤临界值制定的依据更容易获得。试验表明,若按地上部干重抑制 10% 作为 Ge 的土壤临界指标, EC_{10} 为 7.1 mg/kg。

3 结论

土壤添加 Ge 盆栽试验研究表明,低浓度 Ge (<4 mg/kg) 对水稻根和地上生物量、叶绿素 a 含量有促进作用,并整体提高了作物抗氧化酶能力,使 MDA 下降, SOD、CAT、GSH-Px 活性相应提高。而高浓度 Ge (>15 mg/kg) 对水稻根和地上生物量、叶绿素 a 含量有明显的抑制作用,对抗氧化酶系统产生胁迫效应,使 POD 明显上升,MDA 上升, SOD、CAT 酶活性明显下降。在高浓度 Ge 胁迫下,植物细胞中抗氧化作用酶系统的受损打破了植物细胞内活性氧产生与清除间的正常平衡状态,积累过量的活性氧,过量的活性氧引起膜脂过氧化程度加重,从而对植物产生毒害。

各项生理指标与土壤 Ge 处理浓度之间相关分析表明,土壤 Ge 浓度与地上部干重相对百分率,根干重百分率、叶绿素 a/b、MDA、SOD、CAT 之间有显著相关性。比较胁迫效应 10% 值的临界指标 EC_{10} 值表明,作物地上部干重抑制率和根干重抑制率作为土壤临界值制定的依据更为可靠, EC_{10} 为 7 mg/kg。

References:

- [1] Scansetti G. Exposure to metals that have recently come into use. *Sci. Total Environ.*, 1992, **120**:85~91.
- [2] Guislain H, Laet L, Coursier A. Germanium new industrial applications. *Metallurgie*, 1982, **22**:125~131.
- [3] Legha S S, Ajani J A, Bodey G P. Phase I study of spirogermanium given daily. *J. Clin. Oncol.*, 1983, **1**(5):331~336.
- [4] Takahashi I, Fukumoto M, Inagaki N, et al. Effects of interferon and its inducers on neutrophil chemiluminescence. *Jpn. J. Cancer Chemother.*, 1984, **11**:1439~1443.
- [5] Lin C H, Chen T J, Hsieh Y L, et al. Kinetics of germanium dioxide in rats. *Toxicology*, 1999, **132**:147~153.
- [6] Matsumuro N, Izumo S, Higuchi A T, et al. Experimental germanium dioxide-induced neuropathy in rats. *Acta Neuropathol.*, 1993, **86**:547~553.
- [7] Dhinds R S. Drought stress, enzymes of glutathione metabolism, oxidation injury and protein synthesis in *Tortula ruracis*. *Plant Physiol.*, 1991, **95**:648~656.
- [8] Larson R A and Berenbaun M R. Environmental phototoxicity. *Environ. Sci. Technol.*, 1988, **22**:354~360.
- [9] Scandalios S G. Oxygen stress and superoxided dismutases. *Plant Physiol.*, 1993, **101**:7~13.
- [10] Schooner S and Krause G H. Protective systems against active oxygen species in spinach: response to cold acclimation in excess light. *Planta*, 1990, **180**:380~389.
- [11] Seel W E, Hendry G A F and lea J A. Effects of desiccation on some activated oxygen processing enzymes and antioxidants in mosses. *J. Exp. Botany*, 1992, **43**:1031~1037.
- [12] Sminoff N and Colombe S V. Drought influence the activity of enzymes of the chloroplasts hydrogen peroxide scavenging system. *J. Exp. Botany*, 1988, **39**:1097~1108.
- [13] Price A H, Atherton N M and Herdry G A F. Plants under drought-stress generate activated oxygen. *Free Radical. Res. Commun.*, 1989, **8**:61~66.
- [14] Pastori G M and Tri i V S. Antioxidative protation in a drought resistant maize strain during leaf senescence. *Physiol. Plant*, 1993, **87**:

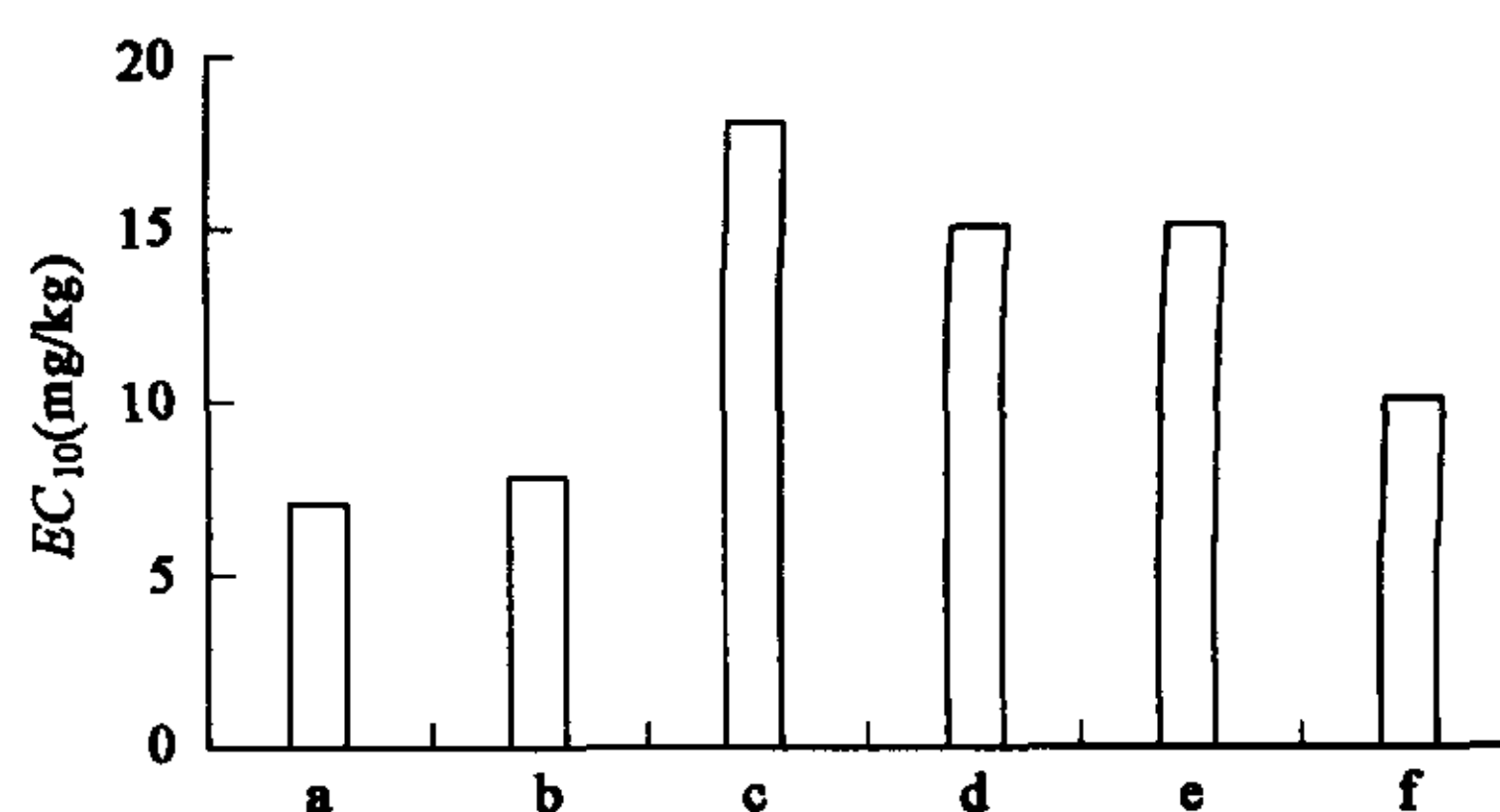


图 6 水稻生理指标土壤 Ge 临界值比较

Fig. 6 Comparison of Ge criteria for physiological indexes of rice

a. 地上部生物量 Shoots biomass, b. 根部生物量 Root biomass, c. 叶绿素 a/b Chlorophyll a/b, d. MDA 含量 MDA content, e. SOD 活性 SOD activity, f. CAT 活性 CAT activity.

227~231.

- [15] Hodgson R A J and Raison K J. Superoxide production by thylakoids during chilling and its implication in the susceptibility of plant to chilling-induced photo-inhibition. *Planta*, 1991, **183**:222~228.
- [16] Mishra N P, Mishra R K and Einghal G S. Changes in the activities of anti-oxidant enzymes during exposure of intact wheat to strong visible light at different temperatures in the presence of protein synthesis inhibitors. *Plant Physiol.*, 1993, **102**:93~98.
- [17] Li Y, Wang X L. The effect of enhanced UV-B radiation on the physiological indicator, yield and quality of wheat. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(5):504~509.
- [18] Assche F V, Clijsters H. Effects of metals on enzyme activity in plants. *Plant Cell and Environ.*, 1990, **13**: 195~206.
- [19] Gil J, Moral R, *et al.* Effects of cadmium on physiological and nutritional aspects of tomato plant 1. Chlorophyll (a and b) and carotenoids. *Fresenius Environ. Bull.*, 1995, **4**:430~435.
- [20] Giannopolitis C N and Ries S K. Superoxide dismutase 1. Occurrence in higher plant. *Plant Physiol.*, 1977(a), **59**:309~314.
- [21] Klobus G, Buczek J. Chlorophyll, content, cells and chloroplast number and cadmium distribution in Cd-treated cucumber plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1985, **7**(3):139~147.
- [22] Wise R B and Natlor A W. Chilling-enhanced photooxidation. Evidence for the role of singlet oxygen and superoxide in the breakdown of pigments and endogenous antioxidants. *Plant Physiol.*, 1987, **83**:278~285.
- [23] Chu L, Liu D Y, Wan Y B, *et al.* Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pratense*. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, **15**(1):119~122.
- [24] Lei H L, Gao F G, Yang X H. Effect of the heavy metal pollution in the sereozem on the physiological biochemical action of the crop. *Agro-environmental Protection*, 1994, **13**(1):12~17.
- [25] Elstner E F. Oxygen activation and oxygen toxicity. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1982, **33**:73~96.
- [26] Fridovich I. The biology of oxygen radicals. *Science*, 1978, **201**:875~880.
- [27] Liu D Y. Effect of sewage irrigation on wheat growth and its activate oxygen metabolism. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, **13**(10):1319~1322.
- [28] Li Y, Wang H X, Wu Y S. Effects of Cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **2**(2):147~153.
- [29] Lin S H, Chen Z L, Chen Q L, *et al.* Effect of mercury and cadmium on photosynthesis of the rice leaves. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1981, **1**(4):324~330.
- [30] Luo L X, Sun T H. Effect of cadmium-surfactant combined pollution on physiological characteristics of wheat leaf. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, **9**(1):95~100.
- [31] Luo L X, Sun T H, Jin Y H. Accumulation of superoxide radical in wheat leaves under cadmium stress. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(5):495~499.
- [32] Ma C C. Hg harm on cell membrane of rape leaf and cell endogenous protection effect. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, **9**(3):323~326.
- [33] Pang X, Wang D H, Peng A. Effect of lead stress on the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling. *Environ. Sci.*, 2001, **22**(5): 108~111.
- [34] Qin T C, Wu Y S, Wang H X. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(1):46~50.
- [35] Ren A Z, Gao Y B, Liu S. Response of some protective enzymes in *Brassica chinensis* seedlings to Pb, Cd and Cr stresses. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, **13**(4):510~512.
- [36] Vallee B I. Biochemical effects of mercury, cadmium and lead. *Annu. Rev. Biochem.*, 1972, **41**:91~98.
- [37] Wang D H, Pang X, Feng Y, *et al.* Effect of lanthanum on the activities of antioxidant enzymes in rape seedlings under lead stress. *Environ. Chem.*, 2002, **21**(4):324~328.
- [38] Wang H, Zhou W, Lin B. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(1):78~87.
- [39] Wang H B, Wang H X, Wen C H, *et al.* Some detoxication mechanisms of different wheat varieties under cadmium treatment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(4):523~528.
- [40] Yan C L, Fu S Z, Yang X K, *et al.* Effects of Pb, Hg on anti-oxidation enzymes in tobacco leaves. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(4):469~473.
- [41] Yan C L, Hong Y T, Yang X K, *et al.* Effect of Cd, Pb on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(5):488~492.

- [42] Yang J R, He J Q, Jiang W R. Effect of Cd pollution on the physiology and bio chemistry of plant. *Agro-environmental Protection*, 1995, **14**(5):193~197.
- [43] Yang J R, He J Q, Zhang G X, *et al.* Reaction of some enzyme activities in crops of different tolerance to the stress of Cd. *Chin. Environ. Sci.*, 1996, **16**(2):113~117.
- [44] Yu G Y, Wang G P, He C Q. Comparison of physiological responses to oxidative and heavy metal stress in seedlings of rice paddy, *Oryza sativa* L. *J. Environ. Sci.*, 2000, **12**(4):458~462.
- [45] Zeng Q, Zhu J G, Cheng H L, *et al.* Ecophysiological response of rice to lanthanum accumulation in red earth. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(1):17~21.
- [46] Zeng Q, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Does response of rape to La and critical concentration of La in red earth. *Environ. Sci.*, 2001, **22**(4):77~80.
- [47] Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(3):514~523.
- [48] Xu J S, Duan P C, Wang Y L, *et al.* The effect of Ge and Si on the growth and development of rice. *J. Xiamen University*, 1999, **38**(1):121~128.
- [49] Xu C S, Tang J J. Studies of ecological effect of germanium element on some physiological characteristics of the rice. *Chin. J. Ecol.*, 1998, **17**(1):1~8.
- [50] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 1949, **24**(1):1~15.
- [51] Giannopolitis C N and Ries S K. Superoxid dismutase I Occurrence in higher plant. *Plant Physiol.*, 1977(a), **59**:309~314.
- [52] Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid and peroxidation. *Archives Biochem. and Biophys.*, 1981, **125**:189~198.
- [53] Xia Y M. Analysis method for glutathione peroxidase activity in blood and tissue. *Hygiene Research*, 1987, **16**(4):29~31.

参考文献

- [17] 李元,王勋陵. 紫外辐射增加对春小麦生理、产量和品质的影响. 环境科学学报, 1998, **18**(5):504~509.
- [23] 储铃, 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. 应用生态学报, 2004, **15**(1):119~122.
- [24] 雷虎兰, 高发奎, 杨晓辉. 灰钙土重金属污染对农作物生理生化作用的影响. 农业环境保护, 1994, **13**(1):12~17.
- [27] 刘登义. 污水灌溉对小麦生长和活性氧机制的影响. 应用生态学报, 2002, **13**(10):1319~1322.
- [28] 李元, 王焕校, 吴玉树, 等. Cd、Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响. 生态学报, 1992, **2**(2):147~153.
- [29] 林舜华, 陈章龙, 陈清郎, 等. 汞镉对水稻叶片光合作用的影响. 环境科学学报, 1981, **1**(4):324~330.
- [30] 罗立新, 孙铁珩. Cd 和表面活性剂复合污染对小麦叶片若干生理性状的影响. 应用生态学报, 1998, **9**(1):95~100.
- [31] 罗立新, 孙铁珩, 靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累. 环境科学学报, 1998, **18**(5):495~499.
- [32] 马成仓. Hg 对油菜叶细胞膜的损伤及细胞的自身保护作用. 应用生态学报, 1998, **9**(3):323~326.
- [33] 庞欣, 王东红, 彭安. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响. 环境科学, 2001, **22**(5):108~111.
- [34] 秦天才, 吴玉树, 王焕校. 镉、铅及其相互作用对小白菜生理生化特性的影响. 生态学报, 1994, **14**(1):46~50.
- [35] 任安芝, 高玉堡, 刘爽. 青菜幼苗体内几种保护酶的活性对 Pb、Cd、Cr 胁迫的反应研究. 应用生态学报, 2002, **13**(4):510~512.
- [37] 王东红, 庞欣, 冯雍. Pb 胁迫下 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 对油菜抗氧化酶的影响. 环境化学, 2002, **21**(4):324~328.
- [38] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(1):78~87.
- [39] 王宏镔, 王焕校, 文传浩. 镉处理下不同小麦品种几种解毒机制探讨. 环境科学学报, 2002, **22**(4):523~528.
- [40] 严重玲, 傅舜珍, 杨先科. 土壤中 Pb、Hg 及其相互作用对烟草叶片抗氧化酶的影响. 环境科学学报, 1997, **17**(4):469~473.
- [41] 严重玲, 洪业汤, 杨先科. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响. 生态学报, 1997, **17**(5):488~492.
- [42] 杨居荣, 贺建群, 蒋婉茹. Cd 污染对植物生理生化的影响. 农业环境保护, 1995, **14**(5):193~197.
- [43] 杨居荣, 贺建群, 张国祥. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应. 中国环境科学, 1996, **16**(2):113~117.
- [45] 曾青, 朱建国, 成后龙. 红壤中镉积累对水稻的生理生态效应. 环境科学学报, 2003, **23**(1):17~21.
- [46] 曾青, 朱建国, 谢祖彬, 等. 红壤中 La 对油菜的剂量效应和临界浓度. 环境科学, 2001, **22**(4):77~80.
- [47] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展. 生态学报, 2000, **20**(3):514~523.
- [48] 徐金森, 段鹏程, 王艳丽. 锗、硅对水稻营养的影响. 厦门大学学报, 1999, **38**(1):121~128.
- [49] 许崇山, 唐建军. 锗对水稻某些生理状态的生态效应的研究. 生态学杂志, 1998, **17**(1):1~8.
- [53] 夏奔明. 血和组织中谷胱甘肽过氧化物酶活力测定方法. 卫生研究, 1987, **16**(4):29~31.