

Fe²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ 对植物生理特性影响的比较分析

雷 桅^{1,2}, 王双明^{1*}, 孙 敏^{2*}

(1. 西南科技大学 生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南大学 生命科学学院
三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘 要: 以浸水处理为对照系统分析了 Fe²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 等金属离子对植物胁迫损伤相关的 7 个生理指标, 并应用数理统计学和生物化学的相关原理和方法从氧自由基伤害的角度比较分析了这三种离子处理对植物生理特性的影响。结果表明, 不同离子处理由于对植物造成的胁迫损伤不同, 因而它们对植物生理特性的影响效应也有明显差异, 并且这种差异与其所处理的离子胁迫性质间存在显著的关联性。

关键词: Fe²⁺; Cu²⁺; Zn²⁺; 氧自由基; 生理效应

中图分类号: Q945.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2007)05-0770-05

Comparative analysis on effect of Fe²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ to physiological characteristics of plant

LEI Wei^{1,2}, WANG Shuang-Ming^{1*}, SUN Min^{2*}

(1. College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: This paper studied on seven physiological indices, which had correlation with stress effect of Fe²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ to plant when the treatment of soaking in water as control. Meanwhile, the principle and method of biochemistry and biostatistics were applied. The effect of three ions treatments to plant physiological characteristics was analyzed according to damage of oxygen free radicals. The results were as follows: the effect of physiological characteristics had evidently difference because different ion treatments had different stress damage. And the difference had marked correlation with ion stress character treated.

Key words: Fe²⁺; Cu²⁺; Zn²⁺; oxygen free radicals; physiological effect

植物细胞通过多种途径产生各种氧自由基和非自由基类活性氧(包括过氧化氢(H₂O₂)和单线态氧(¹O₂)等), 特别是在植物衰老劣变和逆境胁迫过程中, 这些活性氧产生并积累, 浓度超过了伤害“阈值”, 即打破了活性氧产生与清除的动态平衡, 突破了植物体内完善的抗氧化防御系统, 使得细胞的正常代谢不能进行, 进而导致蛋白质、核酸、脂类结构的氧化损伤, 尤其是膜脂中的不饱和双链脂肪酸最易受自由基的攻击而发生过氧化作用。这一过氧化过程又产生新的自由基, 从而促进膜脂质过氧化, 膜的结构和

功能受到破坏, 表现在膜透性增大和离子泄漏加强, 最终诱发植物生理病变, 甚至死亡(杨淑慎等, 2001)。

在 Fe²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 三种胁迫下, Fe²⁺ 是典型 Fenton 反应(Fe²⁺ + H₂O₂ → OH⁻ + ·OH + Fe³⁺)的参与者和 Harber-Weiss 反应(O₂⁻ + H₂O₂ $\xrightarrow{Fe^{2+}}$ O₂ + OH⁻ + ·OH)的催化剂(赵保路, 2002), 且植物体内确有可能存在一些条件驱动 Fenton 反应促进 ·OH 的形成(蒋明义, 1996), 因而 Fe²⁺ 对 ·OH 驱动效应是三个处理中最强烈的。Cu²⁺ 虽可通过 AsA-Cu²⁺-H₂O₂ 体系来产生 ·OH(洪全等, 2004), 同时 Cu²⁺

收稿日期: 2006-02-27 修回日期: 2006-12-30

基金项目: 教育部重点实验室开放基金(三峡库区生态环境)[Supported by the Open Foundation for Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region of Education Ministry]

作者简介: 雷桅(1982-), 湖北武汉人, 男, 硕士研究生, 主要从事植物生物学与生物技术研究, (E-mail) leiwei2006@126.com。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: jwscm@swu.edu.cn, wangshuangming@swust.edu.cn)

又可发挥与 Fe³⁺ 类似的作用,这说明它比 Fe²⁺ 更能直接地将 O₂⁻ 转化为 ·OH, 而且能更有效地通过反应(O₂⁻ + O₂⁻ + 2H⁺ $\xrightarrow{\text{Cu}^{2+}}$ H₂O₂ + O₂) 将 O₂⁻ 转化为 H₂O₂, 故被认为是 Fenton 反应的潜在参与者和催化的外源驱动力(陈吉书, 2002)。虽然它高价的氧化态使其驱动性不会很强, 然而 Cu²⁺ 又是毒性很强的重金属, 重金属胁迫能导致大量活性氧自由基的产生(杨仕勇等, 2004)。因此 Cu²⁺ 胁迫也会对植物体造成显著氧化损伤。Zn²⁺ 虽然尚未被认同是氧自由基生成的天然驱动力, 它也不是变价的过渡金属元素, 其 d 轨道的电子已趋于稳定, 只能失去最外层的 2 个 s 电子。但作为邻近 Cu²⁺ 的 IB 族元素, 其化学性质也应该与邻周期元素相似, 尤其是在氧化还原性方面。事实上, 也有试验依据证明 Zn²⁺ 对氧自由基驱动的影响(蒋明义, 1996)。

本文以浸水处理作对照对 Fe²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 等金属离子胁迫下与植物逆境损伤相关的 7 个生理生化指标进行了较系统的探讨, 并应用数理统计学和生物化学的相关原理和方法从氧自由基伤害的角度比较分析了这三种离子处理对植物生理生化特性的影响。结果表明: 不同离子处理由于对植物造成的胁迫损伤不同, 因而它们对植物生理生化特性的影响效应也有明显差异, 并且这种差异与其所受处理的离子胁迫性质之间存在显著的相关性。

1 材料与方 法

1.1 仪器

7200 型可见分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司), 754 型紫外可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司), T6 新世纪紫外可见分光光度计(北京普析通用公司), 摇床, 万分之一电子天平, 高速离心机, 光照培养箱, DDS-11A 型电导率仪。

1.2 供试材料

供试果桑 (*Moraceae alba*) 栽培于西南科技大学设施农业温室旁, 取其同一生长位置、同一受光部位、较为成熟、无伤害、无病变的叶片。

1.3 浸叶处理

将采取的果桑叶 16 片用缓水流洗涤净并烘干, 再打孔(Φ0.8 cm)制成叶圆片后随机混合, 然后平均分成 20 份, 分别浸入含有 0.03% 吐温-80 的下列溶液的锥形瓶中: 1-1: H₂O; 1-2: 10 mmol/L H₂O₂ + 10 mmol/L FeSO₄; 1-3: 10 mmol/L H₂O₂

+ 10 mmol/L CuSO₄; 1-4: 10 mmol/L H₂O₂ + 10 mmol/L ZnSO₄。封口后置于摇床上振荡培养 42 h, 光/暗周期为 21 h 光照/21 h 黑暗。

浸叶处理的样品均分为 2 份, 一份将 DMSO 加入各处理溶液中, 使其终浓度为 5%, 用于 ·OH 的测定, 此项各处理用 1 瓶; 另一份直接用于其它生理指标的测定, 此项各处理用 4 瓶。

1.4 测定方法

(1) 质膜相对透性(RPMP)的测定用电导率法(陈建勋等, 2002); (2) 丙二醛(MDA)含量的测定用硫代巴比妥酸(TBA)比色法(陈建勋等, 2002); (3) 叶绿素(Chla, Chlb)含量用直接浸提法测定(苏正淑等, 1989); (4) 花色苷(anthocyanin)、类黄酮(flavonoids)和总酚(toatal-phenols)含量的测定按林植芳、李双顺等的方法(林植芳等, 1988)。上述每个指标的测定均在同一条件下进行, 每个处理重复测定 3 次以上。数据处理和统计分析用 Excel 2000 和 SPSS 11.5 软件进行。

2 结果与分析

从本试验所设计的 4 个处理梯度化地比较分析了质膜相对透性(RPMP)、膜脂过氧化程度(MDA)、叶绿素 a 和叶绿素 b 及叶绿素 a/b, 用最小显著极差法(LSR)对各处理间差异显著性做新复极差测验见表 1。

2.1 三种胁迫下各处理间质膜相对透性及膜脂过氧化的比较分析

当植物处于各种逆境条件下, 细胞内自由基产生与清除之间的平衡会遭到破坏, 使自由基增多。自由基首先攻击膜中不饱和脂肪酸, 使它产生过氧化反应, 造成膜的结构损伤, 进而是功能破坏, 因此表现为膜透性增大, 离子泄漏增多(郑荣良, 1992)。

膜脂氢过氧化物是很活泼的, 它会继续分解, 主要是双键断裂氧化, 生成低级氧化产物如丙二醛(MDA)等。MDA 是膜质氧化降解的典型产物, 它能与蛋白质、氨基酸残基或核酸反应生成 Schiff 碱, 降低膜的稳定性, 促进膜的渗漏(陆定志等, 1997)。液泡内蛋白质水解酶和有机酸因功能丧失而释放出来, 进一步加快对膜的破坏, 质膜相对透性也进一步增大。

正如相关性检验所得到的结论: 质膜相对透性与脂质过氧化(用 MDA 生成量表示)呈显著正相关, 一般说来, 后者肯定会导致前者的增大, 但前者

的增大却不一定完全由后者引起。

就各处理对质膜相对透性的影响而言。从表 1

表 1 三种金属离子对植物胁迫损伤相关的 4 个生理生化指标的比较
Table 1 LSR comparison of four physiological-biochemical indices related to plant's oxidative injury under the stress of treatment of Fe^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+}

处理 Treatment	RPMP		MDA		Chla		Chlb		Chla/b	
	LSR	\bar{X}	LSR	\bar{X}	LSR	\bar{X}	LSR	\bar{X}	LSR	\bar{X}
Fe^{2+}	79.41	a A	12.8326	a AB	3.2390	a A	0.4567	d D	7.1075	a A
Cu^{2+}	52.32	b A	16.7902	a A	0.4083	b B	3.7568	a A	0.1087	b B
Zn^{2+}	44.58	b A	2.4033	b C	2.5318	a A	1.7672	b B	1.4326	b B
H_2O	7.33	c B	4.7449	b BC	2.2560	a A	1.0793	c C	2.0988	b B

注: 大写字母表示 1% 显著水平, 小写字母表示 5% 显著水平。

Note: Capital and small letter indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

可看出, Fe^{2+} 处理与其它 3 个处理间的差异达到极显著水平, 且 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 处理与水处理间的差异也达极显著水平, 而且可判断出 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫所造成的质膜相对透性均高于浸水处理, 可见, 这三种处理产生更强烈的逆境、更大量的氧自由基, 也就对质膜结构造成了更大的破坏, 进而表现为其相对透性的增大。这其中又由于 Fe^{2+} 是 $\cdot OH$ 的主要驱动剂, 而 $\cdot OH$ 是已知的最强氧化剂(王镜岩等, 2002), 故而就会造成相对最强的损害。

就各处理对膜脂过氧化的影响而言。从表 1 可发现, Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 处理与 Zn^{2+} 处理间的差异都达到极显著水平, 而 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 处理与浸水处理间的差异分别达显著和极显著水平, 这似乎说明 Fe^{2+} 对膜脂的过氧化效应不及 Cu^{2+} 强烈。但与 RPMP 不同的是 Zn^{2+} 处理与浸水处理间的差异不显著, 这一点也正好说明了 Zn^{2+} 驱动氧自由基产生的能力比 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 弱, 同时也进一步说明充足的水分有助于细胞的生存(郑荣梁, 1992)。

2.2 三种胁迫下各处理间叶绿素 a 和叶绿素 b 的比较分析

Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫下产生的氧自由基虽然能够对光合电子传递链起直接的调节作用, 并减轻光抑制损伤, 但过多的自由基对机体是有害的(Noctor, 1998)。 $\cdot OH$ 几乎能与所有的化合物起快速的反应, 且与 $\cdot OH$ 产生部位接近的分子将首先受到破坏(Asada, 1992)。 O_2^- 也使膜质过氧化, 使膜结构破坏, 掩埋在类囊体内的 Chl-蛋白复合体因此而暴露出来, 叶绿素便被光氧化所降解(McRea 等, 1983)。但与此同时, 为防止氧自由基对光合系统的破坏, 叶绿体内有大量的抗氧化酶(如 POD、SOD(McRea 等, 1983))和小分子抗氧化剂(如 GSH、CAR 等)。因此, 叶绿素事实上是一种对氧自由基很敏感的物质。

就各处理对叶绿素 a 的影响而言。从表 1 可看出, Cu^{2+} 处理与其它 3 个处理间的差异达到极显著水平, 由各处理间的变化趋势可判断出 Cu^{2+} 的电氧化过程所造成的叶绿素 a 含量均低于浸水处理, 而 Fe^{2+} 和 Zn^{2+} 处理的叶绿素 a 含量与浸水处理处于同一水平。而由表 1 显示的各处理间的变化趋势判断出 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的电氧化过程所造成的叶绿素 b 含量均极显著高于浸水处理, 只是 Fe^{2+} 处理的叶绿素 b 含量极显著低于浸水处理。可见, Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 3 种处理对叶绿素的影响是有差别的, 故有必要再考察一下叶绿素 a/b(Chl a/b)的比较情况。

从表 1 可看出, Fe^{2+} 处理对叶绿素 a/b 的影响极显著高于其它 3 个处理, 而 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的电氧化过程所造成的叶绿素 a/b 值与浸水处理间差异不显著。可见, Fe^{2+} 对叶绿素的破坏作用是所有处理中最小的, 而重金属是最强的。

叶绿体本身拥有一套完善的自由基清除体系, 也分为酶促系统和非酶促系统(Akscger 等, 1993)。后者包括抗坏血酸、谷胱甘肽、生育酚和类胡萝卜素等(Foyer 等, 1994; 王忠, 2000)。此外, 还存在其特有的依赖叶黄素循环的非辐射能量耗散(NPQ), 这些都将是极大地减弱 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 胁迫对叶绿素的伤害。

对 Fe^{2+} 处理而言, 其对叶绿素的破坏力很小, 甚至还能提高叶片叶绿素的含量(孙赛初等, 1985)。Fe 虽然不是叶绿素的组成成份, 但在叶绿素的形成过程中是不可缺少的, 它又是植物体内铁氧还原蛋白、细胞色素及许多氧化酶的重要组成部分, 并在光合作用、呼吸作用中起着电子传递的作用(李保印等, 2004)。因此, 铁含量不足不仅影响光合作用, 还会抑制呼吸作用, 影响 ATP 的形成, Fe 还是磷酸蔗糖酶的活化剂, 植物缺 Fe 时, 蔗糖合成减少, 抵御环境胁迫的能力下降(孙赛初等, 1985)。

再来看 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 这两种重金属离子,其对叶绿素的损伤非常严重。叶片叶绿素降低是植物受重金属毒害后出现的普遍现象(周启星等,1995)。原因之一可能是重金属离子被植物吸收后,细胞内的重金属离子作用于叶绿素生物合成途径的几种酶(原叶绿素酯还原酶、 δ 氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的肽链中富含 SH 的部分,改变了它们的正常构型,抑制了酶的活性和阻碍了叶绿素的合成(蒋明义,1994)。原因之二可能是重金属胁迫条件下活性氧,特别是活性氧的终转化物——强反应性的 $\cdot\text{OH}$ 所致。

2.3 三种胁迫下各处理间花色素苷、类黄酮和总酚的比较分析

花色素苷、类黄酮和总酚这三种植物体内的次生代谢物所代表的是一类能高效清除自由基且多存在于胞外介质中的植物体内源抗氧化剂。其中,严格地界定下花色素苷应是类黄酮的一种,但因其植物显色方面的特殊功效而通常单列。花色素苷的抗氧化能力还是在近来才得到各界重视的,有试验证明 SOD 含量的轻微上升与下降都与光诱导花色素苷的产生有联系(Tusda 等,1996),更有甚者证明所有膜系统中经诱导产生的花色素苷均能清除自由基,抑制脂质过氧化(Torel 等,1986)。

其次,就类黄酮而言。在离体条件下,类黄酮通过清除 O_2^- 和 $\cdot\text{OH}$ 抑制起始阶段的脂类过氧化作用。类黄酮通过给过氧化基团提供氢原子以产生类黄酮自由基进而终止自由基链式反应(中国科学院上海药物研究所,1983)。类黄酮自由基反过来又和自由基团发生反应终止传递链。除了具有抗过氧化的性质,一些类黄酮作为金属离子螯合剂,抑制自由基主要产生源的 Fenton 系统,从而增强植物体的抗逆性(Morel 等,1993)。

最后,总酚含量与植物抗氧化性的关系其实是近些年才逐渐引起重视的,有研究证实,果蔬抗氧化活性的强弱与果蔬所含的酚类物质和总酚含量有一定的关联性(田迪英等,

浓度过高则有害,因为此时它们会对与蛋白质、离子通道、生物膜等组成细胞代谢过程的生物配体上正常的金属结合位点发生竞争(杨频等,2002),进而引发一系列酶促或非酶促级联反应,导致细胞正常代谢的阻断甚至毒害,其中一个不可避免的结果就是活性氧的大量发生。另外,离子本身所造成的离子强度、电离势能和电场磁场等能量效应都会很大程度上影响细胞的生理学特性,而氧化胁迫及其生理反应似乎就是一个能量转化过程。

通过对本试验结果的观察和分析,一方面显示 Zn^{2+} 这个化学和物理性质都比较稳定的离子在其过量时也会对植物体产生不容忽视的损伤,同时表明 Zn^{2+} 也可能是一种外源氧自由基生成反应的驱动剂;另一方面论证了不同形式和不同能量大小的化学氧化对植物生理生化的影响效应是不同的,并且这种影响在不同的生理指标上也反映不一。即是说明植物体的各项生理特性对各类化学氧化胁迫的敏感性是有差别的,这就显示在研究植物氧化胁迫时应仔细区分不同生理指标与不同氧化胁迫类型和强度之间的关联性。

致谢:感谢向珣朝老师对英文摘要部分的撰写提供帮助!

参考文献:

- 王忠. 2000. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社:87
中国科学院上海药物研究所. 1983. 中草药有效成分提取与分离[M]. 上海:上海科学技术出版社:7
王镜岩,朱圣庚,徐长法. 2002. 生物化学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社:9-98
陈吉书. 2002. 无机化学[M]. 南京:南京大学出版社:267
陆定志,傅家瑞,宋松泉. 1997. 植物衰老及其调控[M]. 北京:中国农业出版社:18-34
陈建勋,王晓峰. 2002. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社:120-121
郑荣梁. 1992. 自由基生物学[M]. 北京:高等教育出版社:269
杨频,高飞. 2002. 生物无机化学原理[M]. 北京:科学出版社:295
赵南明,周海梦. 2000. 生物物理学[M]. 北京:高等教育出版社:174
赵保路. 2002. 氧自由基和天然抗氧化剂[M]. 修订版. 北京:科学出版社:11-16
Alscher R G, Hess J L (eds.). 1993. Antioxidants in Higher Plants[M]. CRC. Press, Boca Raton, FL
Asada D. 1992. Production and scavenging of active oxygen in chloroplasts[M]//Molecular Biology of Free Radical Scavenging systems. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press:173-192
Foyer C H, Lelandais M, Kunert K J. 1994. Photooxidative stress in plants[J]. *Physiol Plant*, 92:696-717

3 小结

就 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 三种金属离子驱动的氧自由基胁迫而言,这些微量金属离子虽然对于细胞发挥正常功能必不可少,如细胞黏附、配体结合、离子输运和膜的兴奋等(赵南明等,2000),但若它们的

- Hong Q(洪全), Wang Y(王榆), Wang LJ(王力军), et al. 2004. The methods of research free radical in the domai of biochemistry, pharmacy and dynamic(自由基研究在生物、药学及动力学中的应用)[J]. *J Chongqing Univ* (重庆大学学报), 27(2):73-78
- Jiang MY(蒋明义). 1996. Oxidative stress and antioxidation induced by water deficiency in plant(水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的氧化作用)[J]. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), 32(2):144-150
- Jiang MY(蒋明义), Yang WY(杨文英), Xu J(徐江), et al. 1994. Active oxygen damage effect of chlorophyll degradation in rice seedlings under osmotic stress(渗透胁迫下水稻幼苗中叶绿素降解的活性氧损伤作用)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 36(4):289-295
- Li BY(李保印), Zhou XM(周秀梅), Qi AG(齐安国), et al. 2004. Effects of EDTA-Fe on the performance of *Festuca arundinacea*(EDTA-Fe对高羊茅草坪的效果)[J]. *Grassland and Turf* (草原与草坪), 104(1):56-57
- Lin ZF(林植芳), Li SS(李双顺), Zhang DL(张东林), et al. 1988. The changes of pigments, phenolics contents and activities of polyphenol oxidase and phenylalanine ammonia-lyase in pericarp of postharvest litchi fruit(采后荔枝果皮色素、总酚及有关酶活性的变化)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 30(1):40-45
- Ma ZQ(马志卿), Feng JT(冯俊涛), Jiang ZL(江志利), et al. 2004. The effect of terpinen-4-ol on endogenous enzymes of protective system in housefly(*Musca domestica* L.) (松油烯-4-醇对家蝇超氧化物歧化酶、过氧化氢酶及过氧化物酶的影响)[J]. *Chin J Pesticide Sci* (农药学报), 6(2):53-56
- McRea D G. 1983. Thompson J E, Planta[J]. 158:185-193
- Morel I, Lescoat G M, Cogrel P, et al. 1993. Antioxidant and ironchelating activities of the flavonoids catechin, quercetin and diosmetin on iron-loaded rat hepatocyte cultures[J]. *Biochem Pharmacol*, 45:13-19
- Noctor G. 1998. Ascorbate and glutathione; keeping active oxygen under control. *Ann. Rev. Plant Physiol*[J]. *Plant Biol*, 49:249-279
- Sun SC(孙赛初), Wang HX(王焕校), Li QR(李启任). 1985. Preliminary studies on physiological changes and injury mechanism aquatic vascular plants treated with Cadmium(水生维管束植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探)[J]. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 11(2):113-121
- Tian DY(田迪英), Yang RH(杨荣华). 2004. Studies on the relation of total phenols content to the antioxidant activity of fruits and vegetables(果蔬抗氧化活性与总酚含量相关性研究)[J]. *Chemical World* (化学世界), (2):70-75
- Torel J, Cillard J, Cillard P. 1986. Antioxidant activity of flavonoids and reactivity with peroxy radical[J]. *Phytochemistry*, 25:383-38
- Tusda T, Shiga K, Ohshima K, et al. 1996. Inhibition of lipid peroxidation and the active oxygen radical scavenging effect of anthocyanin pigments isolated from *Phaseolus vulgaris* L[J]. *Biochem Pharmacol*, 52:1 033-1 039
- Vaughn K C, Lax A R, Duke S O, et al. 1988. Polyphenol oxidase; the chloroplast oxidase with no established function[J]. *Physiol Plant*, 72:659
- Yang SS(杨淑慎), Gao JF(高俊凤). 2001. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence(活性氧、自由基与植物的衰老)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), 21(2):215-220
- Yang SY(杨世勇), Wang F(王方), Xie JC(谢建春). 2004. Plant toxicity of heavy metals and the tolerant mechanism of plants(重金属对植物的毒害及植物的耐性机制)[J]. *J Anhui Normal Univ(Nat Sci)* (安徽师范大学学报(自然科学版)), 27(1):71-90
- Zhou QX(周启星), Gao ZM(高拯民). 1995. Combined pollution and its indexes of Cd and Zn in soil-rice systems(土壤-水稻系统 Cd-Zn 的复合污染及其衡量指标的研究)[J]. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 32(4):430-436

(上接第 807 页 Continue from page 807)

- 傅立国. 1991. 中国植物红皮书—稀有濒危植物(第1册)[M]. 北京:科学出版社:288
- Chen Y(陈永), Han YX(韩艳霞), Cao HX(曹红霞). 1999. The efficiency and exploitation of human essential fatty acid(人体必需脂肪酸的能效及开发利用)[J]. *J Kaifeng Univ* (开封大学学报), 13(2):28-30
- Hellor S R. 1988. EPA/NIH Mass Spectral Data Base[M]. Washington:Government Printing Office
- Hellor S R, Mioline G W. 1980. AEP/NIH Mass Spectral Database Supplement[M]. Washington:Government Printing Office
- Masada Y. 1976. Analysis of Essential Oils by Gas Chromatography and Mass Spectrometry[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 36
- Rahuman AA, Gopalakrishnan G, Ghose B S, et al. 2000. Effect of *Feronia limonia* on mosquito larvae[J]. *vFitoterapia*, 71:553-555
- Xie LT(谢丽涛), Chen JK(陈家堃). 1998. The inhibitive effect of essential fatty acids on AFP Secretion and cell growth on BEL-7402 human hepatocellular carcinoma cell line(必需脂肪酸对 BEL-7402 人肝癌细胞生长和甲胎蛋白分泌抑制的研究)[J]. *Chin J Cancer Biother* (中国肿瘤生物治疗杂志), 5(4):274-27
- Zhang TY(张庭延), Gao LY(高留英). 1998. The sense of physiology and pathology of essential fatty acid(必需脂肪酸的生理病理意义)[J]. *Foreign Medical Sciences Section of Pathophysiology and Clinical Medical* (国外医学. 生理、病理科学与临床分册), 18(2):148-151
- Zhou ZB(周正邦). 2001. Discuss on the characteristic and planting on *Cleidiocarpum cavaleriei* (Lévl.) Airy Shaw(蝴蝶果的特性及栽培利用探讨)[J]. *Seed* (种子), (1):36

Fe²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺对植物生理特性影响的比较分析

作者: [雷桅](#), [王双明](#), [孙敏](#), [LEI Wei](#), [WANG Shuang-Ming](#), [SUN Min](#)
 作者单位: [雷桅, LEI Wei \(西南科技大学, 生命科学与工程学院, 四川, 绵阳, 621010; 西南大学, 生命科学学院三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆, 400715\)](#), [王双明, WANG Shuang-Ming \(西南科技大学, 生命科学与工程学院, 四川, 绵阳, 621010\)](#), [孙敏, SUN Min \(西南大学, 生命科学学院三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆, 400715\)](#)
 刊名: [广西植物](#) **ISTIC PKU**
 英文刊名: [GUIHAI](#)
 年, 卷(期): 2007, 27 (5)
 被引用次数: 7次

参考文献(30条)

1. [王忠](#) [植物生理学](#) 2000
2. [中国科学院上海药物研究所](#) [中草药有效成分提取与分离](#) 1983
3. [王镜岩](#); [朱圣庚](#); [徐长法](#) [生物化学](#) 2002
4. [陈吉书](#) [无机化学](#) 2002
5. [陆定志](#); [傅家瑞](#); [宋松泉](#) [植物衰老及其调控](#) 1997
6. [陈建勋](#); [王晓峰](#) [植物生理学实验指导](#) 2002
7. [郑荣梁](#) [自由基生物学](#) 1992
8. [杨频](#); [高飞](#) [生物无机化学原理](#) 2002
9. [赵南明](#); [周海梦](#) [生物物理学](#) 2000
10. [赵保路](#) [氧自由基和天然抗氧化剂](#) 2002
11. [Alscher R G](#); [Hess J L](#) [Antioxidants in Higher Plants](#) 1993
12. [Asada D](#) [Production and scavenging of active oxygen in chloroplasts](#) 1992
13. [Foyer C H](#); [Lelandais M](#); [Kunert K J](#) [Photooxidative stress in plants](#) 1994
14. [洪全](#), [王榆](#), [王力军](#), [张胜涛](#) [自由基研究在生物、药学及动力学中的应用](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(2)
15. [蒋明义](#) [水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的氧化作用](#) 1996(02)
16. [蒋明义](#); [杨文英](#); [徐江](#) [渗透胁迫下水稻幼苗中叶绿素降解的活性氧损伤作用](#) 1994(04)
17. [李保印](#), [周秀梅](#), [齐安国](#), [王永胜](#) [EDTA-Fe对高羊茅草坪的效果](#)[期刊论文]-[草原与草坪](#) 2004(1)
18. [林植芳](#); [李双顺](#); [张东林](#) [采后荔枝果皮色素、总酚及有关酶活性的变化](#) 1988(01)
19. [马志卿](#), [冯俊涛](#), [江志利](#), [张兴](#) [松油烯-4-醇对家蝇超氧化物歧化酶、过氧化氢酶及过氧化物酶的影响](#)[期刊论文]-[农药学报](#) 2004(2)
20. [McRea D G](#); [Thompson J E](#) [查看详情](#) 1983
21. [Morel I](#); [Lescoat G M](#); [Cogrel P](#) [Antioxidant and ironchelating activities of the flavonoids catechin, quercetin and diosmetin on iron-loaded rat hepatocyte cultures](#) 1993
22. [Noctor G](#) [Ascorbate and glutathione:keeping active oxygen under control](#) 1998
23. [孙赛初](#); [王焕校](#); [李启任](#) [水生维管束植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探](#) 1985(02)
24. [田迪英](#), [杨荣华](#) [果蔬抗氧化活性与总酚含量相关性研究](#)[期刊论文]-[化学世界](#) 2004(2)
25. [Torel J](#); [Cillard J](#); [Cillard P](#) [Antioxidant activity of flavonoids and reactivity with peroxy radical](#) 1986

26. [Tusda T;Shiga K;Ohshima K](#) [Inhibition of lipid peroxidation and the active oxygen radical scavenging effect of anthocyanin pigments isolated from Phaseolus vulgaris L](#) 1996
27. [Vaughn K C;Lax A R;Duke S O](#) [Polyphenol oxidase:thechloroplast oxidase with no established function](#) 1988
28. [杨淑慎,高俊凤](#) [氧、自由基与活性植物的衰老](#)[期刊论文]-[西北植物学报](#) 2001(2)
29. [杨世勇,王方,谢建春](#) [重金属对植物的毒害及植物的耐性机制](#)[期刊论文]-[安徽师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(1)
30. [周启星;高拯民](#) [土壤-水稻系统Cd-Zn的复合污染及其衡量指标的研究](#) 1995(04)

本文读者也读过(6条)

1. [姜招峰.杨翰仪](#) [氧自由基对CAT、SOD和GPX的氧化修饰研究](#)[期刊论文]-[北京联合大学学报\(自然科学版\)](#) 2003, 17(3)
2. [高扬帆.王建华.崔乘幸.GAO Yang-fan.WANG Jian-hua.CUI Cheng-xing](#) [氯化锰和钼酸对盐渍地棉花幼苗生长耐盐性影响的研究](#)[期刊论文]-[河北农业大学学报](#)2006, 29(4)
3. [周贞洁.刘仁臣.蔡知音.褚克平.夏若虹.ZHOU Zhen-jie.LIU Ren-chen.CAI Zhi-yin.CHU Ke-ping.XIA Ruohong](#) [钠、钾离子对肌质网囊泡NADH氧化酶和伴生超氧自由基的调控](#)[期刊论文]-[航天医学与医学工程](#)2006, 19(3)
4. [张焜.邓西平.赵长星.ZHANG Yu.DENG Xi-ping.ZHAO Chang-xing](#) [水分胁迫下不同进化型小麦抗氧化能力比较](#)[期刊论文]-[西北植物学报](#)2005, 25(8)
5. [张勇](#) [Na<, 2>0-Ca0-Al<, 2>0<, 3>-Si0<, 2>-H<, 2>0体系产物对核素Sr、Cs的固化效应研究](#)[学位论文]2009
6. [石荣.贺福初](#) [氧化还原与细胞凋亡的关联](#)[期刊论文]-[生命科学](#)2004, 16(2)

引证文献(4条)

1. [肖英奎,于海业,李继嫒,张艳平](#) [气雾培供铁浓度对微型种薯光合作用与产量的影响](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2012(10)
2. [徐爱东](#) [增施铁肥提高小麦抗盐性研究](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2009(09)
3. [朱海军,刘广勤,曹福亮,臧旭,周蓓蓓,生静雅](#) [施锌对薄壳山核桃幼苗生长及体内锌分配的影响](#)[期刊论文]-[南京林业大学学报\(自然科学版\)](#) 2012(04)
4. [龚红梅,李卫国](#) [锌对植物的毒害及机理研究进展](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2009(29)

引用本文格式: [雷桅.王双明.孙敏.LEI Wei.WANG Shuang-Ming.SUN Min](#) [Fe²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺对植物生理特性影响的比较分析](#)[期刊论文]-[广西植物](#) 2007(5)