

# 活性氧与植物抗氧化系统研究进展

白英俊<sup>1</sup>, 李国瑞<sup>1,2,3,4</sup>, 黄凤兰<sup>1,2,3,4</sup>, 李威<sup>1</sup>, 丛安琪<sup>1</sup>, 陈永胜<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. 内蒙古民族大学, 内蒙古通辽 028000; 2. 内蒙古自治区高校蓖麻产业工程技术研究中心, 内蒙古通辽 028000; 3. 内蒙古自治区蓖麻育种重点实验室, 内蒙古通辽 028000; 4. 内蒙古自治区蓖麻产业协同创新培育中心, 内蒙古通辽 028000)

**摘要** 活性氧(ROS)是在植物体内产生的氧化能力很强的氧。植物体内存在着抗氧化系统,对调控活性氧的平衡起了关键作用。系统概述了植物活性氧的种类、产生、检测、伤害及植物抗氧化系统的清除机制等方面的研究进展,为今后利用生物工程技术合成同工酶,提高植物对不良环境的抗性奠定了基础。

**关键词** 活性氧;抗氧化系统;抗逆性

中图分类号 S-3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)36-0001-03

## Research Progress of Reactive Oxygen Species and Plant Antioxidant System

BAI Ying-jun<sup>1</sup>, LI Guo-rui<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Feng-lan<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Yong-sheng<sup>1,2,3,4\*</sup> et al (1. Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028000; 2. Castor Industry Research Center of the Inner Mongolia Autonomous Region University, Tongliao, Inner Mongolia 028000; 3. The Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Castor Breeding, Tongliao, Inner Mongolia 028000; 4. Collaborate Innovative Cultivate Center for Castor Industry of Inner Mongolia, Tongliao, Inner Mongolia 028000)

**Abstract** Reactive oxygen species (ROS) is a highly oxidizing oxygen produced in plants. Plant antioxidant system played a key role to balance the regulation of active oxygen. The research of active oxygen of species, generation, detection, injury and scavenging mechanism of plant antioxidant system were introduced, which could be used to synthesize isoenzymes and improve plant resistance to adverse environment.

**Key words** Reactive oxygen species; Antioxidant system; Plant resistance

活性氧(ROS)简单的来说就是氧化能力很强的氧。是由 $O_2$ 获得电子转化而来的一类分子或离子及自由基。一般分为超氧阴离子( $O_2^-$ )、羟自由基( $OH^{\cdot}$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )、单线态氧( $O_2$ )。植物在进行有氧代谢时必定会产生活性氧。低浓度的活性氧(ROS)可作为一个重要的信号分子来参与调控植物的生理反应及非生物胁迫反应<sup>[1]</sup>,而高浓度的活性氧(ROS)会阻碍植物生长甚至导致死亡。植物为了保持自身的正常的生理代谢,会通过酶促和非酶促即表现为抗氧化酶系统和抗氧化剂对活性氧的清除作用来维持植物的正常生理活动。笔者综述了活性氧与植物抗氧化系统研究进展,旨在为提高植物对不良环境的抗性提供参考。

## 1 活性氧的产生及分类

**1.1 超氧阴离子( $O_2^-$ )** 在物质代谢过程中,大部分进入植物的氧被还原为水,其余氧在物质代谢过程中接收到不同数量的电子,形成不同性质的活性氧。氧分子受单一电子形成超氧阴离子。 $O_2^-$ 既是阴离子,又是自由基。它是一种氧化还原活性都很强的活性氧。植物中 $O_2^-$ 生产的途径主要包括在呼吸链转移过程中形成 $O_2^-$ 。叶绿体上的光系统 I (PSI)、光系统 II (PS II)途径中的电子传递链(ETC)泄露电子而生成 $O_2^-$ 。此外,通过酶促反应、细胞核上的电子传递链会有电子的侧漏,也会生成 $O_2^-$ <sup>[2-3]</sup>。

**1.2 单线态氧( $O_2$ )** 单线态氧( $O_2$ )在植物体内产生的途径很多。叶绿体单线态氧( $O_2$ )的产生主要是以PS I为媒介,分2种不同方式产生。第1种是直接还原产生单线态氧( $O_2$ )。例如,当存在除草剂时由于它是光合电子传递链的电

子传递转向剂,迫使电流向改变,无法到达NADP,从而诱导自由基的形成。第2种由铁氧还蛋白参与作用是间接还原产生 $O_2$ <sup>[4]</sup>。

**1.3 过氧化氢( $H_2O_2$ )** 植物在正常生理情况或在各种逆境情况(如干旱、低温、紫外照射、强光)下都会产生 $H_2O_2$ 。 $H_2O_2$ 产生的途径主要有线粒体、叶绿体的电子链传递、脂肪酸 $\beta$ 氧化、光呼吸、木质化和栓化等。与其他活性氧不同的是,它没有不成对的电子,所以可自由透过生物膜迅速扩散从而损伤植物细胞。活性氧(ROS)中低浓度的 $H_2O_2$ 是可以用作调节植物环境胁迫的信号分子之一。而高浓度的 $H_2O_2$ 会导致一些酶失活,进一步造成植物的程序性死亡<sup>[5]</sup>。

**1.4 羟自由基( $OH^{\cdot}$ )** 在所有的活性氧中 $OH^{\cdot}$ 的氧化能力是最强的,半衰期极短。由于极强的氧化特性及植物体内没有特定的清除 $OH^{\cdot}$ 的机制,所以它对植物细胞有极大损伤。 $OH^{\cdot}$ 的产生途径有很多种:① $H_2O_2$ 与 $O_2^-$ 通过Haber-Weiss反应。② $H_2O_2$ 与水( $H_2O$ )光解作用。③ $H_2O_2$ 与铁离子( $Fe^{2+}$ )通过Fenton反应<sup>[6]</sup>。在植物体中 $OH^{\cdot}$ 的氧化反应可能主要通过从有机分子上提取1个氢原子、与具有苯环结构的分子进行加成反应、与氨基酸进行氧化分解反应完成。

## 2 植物抗氧化系统的清除机制

### 2.1 抗氧化酶类-酶促清除系统

**2.1.1 超氧化物歧化酶(SOD)** SOD是一种含金属的酶,对植物中的超氧阴离子具有特异的清除作用,可根据不同的金属辅助因子分为3类,即Cu/Zn-SOD、Fe-SOD、Mn-SOD。其中Cu/Zn-SOD由2个金属亚基组成。在细胞质、叶绿体、植物幼叶中含量较多。Fe-SOD、Mn-SOD由含有1个金属离子亚基组成,主要存在于线粒体和叶绿体以及老叶中。SOD可以催化植物体内的 $O_2^-$ 生成 $H_2O_2$ 和 $O_2$ <sup>[7]</sup>。此

**基金项目** 内蒙古民族大学科研立项项目(NMDSSI1757)。

**作者简介** 白英俊(1992—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,研究方向:作物栽培与耕作。\*通讯作者,教授,博士,硕士生导师,从事植物生物化学与分子生物学研究。

**收稿日期** 2017-11-10

外,SOD可以防止 $\text{Fe}^{3+}$ 被还原成 $\text{Fe}^{2+}$ ,间接阻止通过Fenton反应生成 $\text{OH}^{-1}$ 。

**2.1.2 过氧化氢酶(CAT)**。CAT是一种包含血红素四聚体酶且主要存在于细胞内的过氧化体中一种单功能酶<sup>[8]</sup>。它主要清除由光呼吸过程中产生的 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,分解为 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{O}_2$ ,间接降低了 $\text{OH}^{-1}$ 的产生。由于过氧化氢的亲合力小,所以需要大量的CAT才能实现对 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的完全清除。

**2.1.3 抗坏血酸过氧化物酶(APX)**。APX也是清除 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的主要酶之一。APX是利用抗坏血酸(AsA)为电子供体清除 $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[9-10]</sup>。 $\text{H}_2\text{O}_2$ 除了自身可以对植物细胞造成伤害之外,还可以被 $\text{O}_2^-$ 还原通过Haber-Weiss反应生成危害性更大的活性氧 $\text{OH}^{-1}$ ,所以对维持植物体内 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的相对水平有重要意义。

**2.1.4 谷胱甘肽还原酶(GR)**。植物细胞中的GR也是清除 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的关键酶。它主要存在于叶绿体基质中与APX形成抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环发挥作用<sup>[11]</sup>。对植物来说,逆境如干旱、高温、盐害、虫害等,都会使GR的浓度提高,从而增加叶片中还还原性谷胱甘肽的表达量,对避免细胞毒害以及环境胁迫起着重要作用。

## 2.2 抗氧化剂类-非抗氧化酶促清除系统

**2.2.1 抗坏血酸(AsA)**。AsA,即维生素C(Vc),广泛存在于各种细胞器中,在叶绿体基质中积累浓度最高,可以清除植物体内产生的活性氧<sup>[12]</sup>。它还可以清除膜脂过氧化过程中产生的多聚不饱和脂肪酸(PUFA)自由基,又可作为酶的底物对活性氧的清除发挥着重要作用<sup>[13]</sup>。由于AsA有多种氧化功能,因此认为可以将AsA的降低作为植物抗氧化能力衰退的指标。

**2.2.2 谷胱甘肽(GSH)**。GSH是由谷氨酸(Glu)、半胱氨酸(Cys)和甘氨酸(Gly)聚合形成的三肽化合物。GSH是植物体内重要的活性氧清除剂,可溶于水。抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环是植物体内清除活性氧的重要途径<sup>[9]</sup>。此外,GSH还是植物中重要的解毒剂<sup>[14]</sup>。它与金属离子有较强的亲和力,可以与金属离子有效地结合,形成无毒的化合物从而起到解毒的作用。

## 3 植物自身抗氧化系统对活性氧的调节

**3.1 不同植物种类之间的差异** 由于不同植物的基因型差别较大,所以在植物细胞程序性死亡与逆境条件下抗氧化酶的含量及活性有一定的差异。通常 $\text{C}_4$ 植物因独特的花环结构比 $\text{C}_3$ 植物逆境中适应性要强。例如,玉米( $\text{C}_4$ )与小麦( $\text{C}_3$ )同时受到水分胁迫时,小麦植物体细胞中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的积累要比玉米的多、快,且小麦抗氧化酶的含量略低于玉米,所以 $\text{C}_4$ 植物独特的花环结构增加了其对逆境的适应性。

**3.2 同种植物不同生育时期之间的差异** 同种植物抗氧化酶的活性在不同生育时期也有所不同<sup>[15]</sup>。一般在幼叶中ROS的含量较低,随着发育成熟ROS的含量逐渐升高,在到达衰老时期ROS的含量达到最大,与此同时抗氧化酶的含量随之增大。在植物的生长周期中,果实成熟期ROS含量一般高于开花期,开花期含量高于营养生长期。

**3.3 同种植物不同植物器官之间的差异** 在同一植物不同组织和器官中,抗氧化酶活性也不同。植物体内不同植物器官的抗氧化酶的活性不同。不同植物器官抗性有着明显的差异,主要是由植物体内不同组织器官抗氧化酶的含量活性变化所致。对于大部分植物,根中的抗氧化酶活性变化最为敏感,其次是叶片<sup>[16]</sup>。

## 4 不同逆境植物抗氧化系统对清除活性氧的影响

**4.1 低温、高温胁迫对抗氧化酶活性的影响** 无论何种植物都有其最适宜的生长温度范围,超出或低于这个温度范围都会对植物形成温度胁迫,造成不良影响<sup>[17-18]</sup>。在同一种温度胁迫下,随着处理时间的延长,不同抗氧化酶会呈现出不同的活性变化,有些抗氧化酶会呈现出先上升后下降的活性变化。也有些抗氧化酶的活性处于持续降低的状态。因为抗氧化酶本身就是一种蛋白质,会受到温度的影响,所以会呈现出不同的活性。

**4.2 水分胁迫对抗氧化酶活性的影响** 植物在生长过程中需要一定的水分。当水分高于或低于植物的正常需求范围时,会对植物造成水分胁迫。当水分亏缺时,植物体内很多生理反应无法正常进行。水分胁迫使植物体内丙二醛(MDA)含量急剧增加,导致膜脂的过氧化<sup>[19]</sup>,破坏细胞膜系统。这种情况下植物通常会通过调节叶片气孔的开关程度控制水分蒸腾,进行自我保护<sup>[20]</sup>。

**4.3 重金属离子对抗氧化酶活性的影响** 重金属会对植物正常生长产生一定影响,不同植物对不同的金属元素有着不同的敏感度<sup>[21]</sup>。某些金属离子是植物生长的必需元素,直接参与植物体中的生理生化反应,例如Cu/Zn-SOD是一种含铜和锌的同型二聚体酶。另外的一类重金属元素不是作物生长的必需元素,如铅、镉、汞等有害重金属长期大量的积累会降低植物抗氧化酶的活性,甚至会导致植物的死亡<sup>[22]</sup>。

## 5 活性氧的检测

**5.1  $\text{O}_2^-$ 的检测** 紫外-可见吸收分光光度法是最常用的检测 $\text{O}_2^-$ 的方法。常用的方法有细胞色素C还原法和氮蓝四唑(NBT)还原法<sup>[23]</sup>。细胞色素C还原法,是通过把一定量的氧化性细胞色素C还原为还原性细胞色素C,在 $\lambda_{550\text{nm}}$ 处有最大吸收峰,测定还原性细胞色素C的产量,间接得出 $\text{O}_2^-$ 的含量。该方法的不足之处在于对细胞色素C的纯度要求较高且细胞色素C容易被其他物质所还原,故灵敏度较低。NBT还原法是在 $\text{O}_2$ 的作用下还原生成不溶于水的蓝色甲臍<sup>[24]</sup>。该方法测定灵敏度高,常用于 $\text{O}_2^-$ 的组织化学定位。

**5.2  $\text{OH}^{-1}$ 的检测**  $\text{OH}^{-1}$ 在活性氧中最为活泼,半衰期极短,检测起来较为困难。后来发现DMSO为 $\text{OH}^{-1}$ 的分子探针,以DMSO与 $\text{OH}^{-1}$ 的反应产物甲基亚磺酸(methanesulfinic acid,MSA)作为 $\text{OH}^{-1}$ 形成的标志<sup>[25]</sup>。但是该方法操作比较烦琐,且所用药物毒性较大,有待更进一步探究。

**5.3  $\text{H}_2\text{O}_2$ 的检测**  $\text{H}_2\text{O}_2$ 与其他活性氧相比相对稳定。在弱酸环境下, $\text{H}_2\text{O}_2$ 可将Fe氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ 和硫氰酸盐或二甲酚橙反应,利用分光光度计比色法即可测得以上2种有

色产物的含量。在辣根过氧化物酶(horseradish peroxidase, HRP)催化下,TMB(3,5,3'5'-四甲基联苯胺)与 $H_2O_2$ 反应生成有色产物,可通过分光光度计检测,但灵敏度不高<sup>[26]</sup>。在 HRP 催化下,Amplex Red 与 $H_2O_2$ 反应产生氧化产物 RSF(resorufin),发出红色荧光 Amplex Red 高度特异和灵敏,RSF 非常稳定,且荧光不易受到生物样品自发荧光的干扰。除此之外,可利用绿色荧光蛋白的 $H_2O_2$ 的荧光探针<sup>[27]</sup>、 $H_2O_2$ 的特异性荧光探针 HyPer 等新技术<sup>[28]</sup>。

**5.4  $O_2$  的检测** 用于测定 $O_2$ 的方法主要有化学发光法、电子顺磁共振法(ESR)、色谱分光光度法等<sup>[29]</sup>。化学发光法是利用探针分子与单线态氧反应生成高化合物,生成的产物会迅速分解并伴随这些能量的释放,对发出的信号可进行检测。色谱法是利用高效液相色谱法(HPLC),依据探针捕获单线态氧前后吸光度变化进行测定。ESR 探针的检测原理是单线态氧的 ESR 自旋捕获剂与 $^1O$ 作用后导致 ESR 信号的变化,该方法被大量用于光敏化过程中 $O_2$ 的测定<sup>[30]</sup>。

**5.5 MDA 的检测** 脂类过氧化产生的最终产物 MDA 可作为脂类过氧化的指标。在实验室中常用硫代巴比妥酸(TBA)与其反应,生成的化合物为粉红色,可在 $\lambda_{532}$ nm处被检出。该方法应用广泛,经济、便捷,但是由于 TBA 对 MDA 专一性不强,造成一定误差。HPLC 可以专一地直接测定 MDA<sup>[31]</sup>。HPLC 虽然专一、灵敏、快速,但不能短时间内同时测量很多样品,且仪器价格昂贵。

## 6 展望

ROS 在植物中主要是在自然衰老阶段和逆境大量积累。ROS 具有“两面性”。清除植物体内产生的活性氧主要通过抗氧化酶与抗氧化剂。它们在协同合作,清除自身代谢与逆境产生的活性氧。抗氧化酶类主要有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)。抗氧化剂类主要有抗坏血酸、谷胱甘肽、甘露醇和黄酮类等物质。在植物细胞的研究中,抗氧化酶类的活性与植物的自身代谢、植物逆境胁迫有着密切的相关性。但是目前对 ROS 产生及检测尚未完全探知,对植物抗氧化清除机制利用有待发展。因此,正确了解植物体中活性氧的生成和性质及植物抗氧化系统的作用机理不仅对植物的自身及逆境的生理代谢有着重要作用,对生物工程转基因有着深远的意义。

## 参考文献

[1] BAILEY-SERRES J, MITTLER R. The roles of reactive oxygen species in plant cells[J]. *Plant physiology*, 2006, 141(2): 311.  
 [2] 黄亚成, 秦云霞. 植物中活性氧的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(36): 219-226.  
 [3] 李国婧. 超氧阴离子的产生及其在植物体内作用的研究[J]. *生物技术世界*, 2012(4): 24-25.  
 [4] TRIANTAPHYLIDÈS C, KRISCHKE M, HOEBERICHTS F A, et al. Singlet oxygen is the major reactive oxygen species involved in photooxidative damage to plants[J]. *Plant physiology*, 2008, 144(2): 960-968.  
 [5] 张梦如, 杨玉梅, 成蕴秀, 等. 植物活性氧的产生及其作用和危害[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(9): 1916-1926.

[6] BHATTACHARJEE W. The language of reactive oxygen species signaling in plants[J]. *Journal of botany*, 2012, 4: 99-103.  
 [7] MIURA C, SUGAWARA K, NERIYA Y, et al. Functional characterization and gene expression profiling of superoxide dismutase from plant pathogenic phytoplasma[J]. *Gene*, 2012, 510(2): 107-112.  
 [9] 薛鑫, 张芊, 吴金霞. 植物体内活性氧的研究及其在植物抗逆方面的应用[J]. *生物技术通报*, 2013(10): 6-11.  
 [8] 谢晓红. 植物抗氧化酶系统研究进展[J]. *化工管理*, 2015(32): 99-100.  
 [9] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(1): 105-110.  
 [10] 孙卫红, 王伟青, 孟庆伟. 植物抗坏血酸过氧化物酶的作用机制、酶学及分子特性[J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41(2): 143-147.  
 [11] 程华, 李琳玲, 常杰, 等. 植物抗氧化酶的研究进展[C]//2008 园艺学进展(第八辑)——中国园艺学会第八届青年学术讨论会暨现代园艺论坛论文集. 上海: 中国园艺学会, 2008.  
 [12] BOATRIGT W L. Oxygen dependency of one-electron reactions generating ascorbate radicals and hydrogen peroxide from ascorbic acid[J]. *Food chemistry*, 2016, 196: 1361.  
 [13] 陈坤明, 宫海军, 王锁明. 植物抗坏血酸的生物合成、转运及其生物学功能[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 329-336.  
 [14] 闫慧芳, 毛培胜, 夏方山. 植物抗氧化剂谷胱甘肽研究进展[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 428-434.  
 [15] 康璐瑶, 崔海峰, 邢阿宝, 等. 龙菱 2 号不同发育阶段茎部活性氧的检测分析[J]. *长江蔬菜*, 2015(22): 92-94.  
 [16] 王永军, 杨今胜, 袁翠平, 等. 超高产夏玉米花粒期不同部位叶片衰老与抗氧化酶特性[J]. *作物学报*, 2013, 39(12): 2183-2191.  
 [17] YANG Q Z, ZHANG Z K, RAO J P, et al. Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in 'Hayward' kiwifruit by enhancing antioxidant enzyme activity and regulating endogenous hormones levels[J]. *Journal of the science of food & agriculture*, 2013, 93(15): 3691.  
 [18] 杜朝昆, 李忠光, 龚明. 水杨酸诱导的玉米幼苗适应高温和低温胁迫的能力与抗氧化酶系统的关系[J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41(1): 19-22.  
 [19] 许小南, 沈曾佑, 张志良, 等. 水分胁迫对植物线粒体结构和脯氨酸氧化酶活性的影响[J]. *植物生理学报*, 1986, 12(4): 388-395.  
 [20] 阮志平, 唐源江, 曾美涓. 干旱胁迫对 4 种棕榈植物幼苗光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. *热带植物学报*, 2016, 37(10): 1914-1919.  
 [21] 罗洁文, 李莹, 苏烁烁, 等. 类芦根系抗氧化酶和植物螯合肽对 Cd、Pb 胁迫的应答[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 1047-1053.  
 [22] 杨雨嘉, 支崇远, 李培林, 等. 重金属 $Cd^{2+}$ 和 $Cu^{2+}$ 对一种曲壳藻生长情况及其抗氧化酶活性的影响[J]. *生态科学*, 2015, 34(6): 75-80.  
 [23] 赵晓玉, 薛娟, 卢存福, 等. 植物中活性氧信号转导及其检测方法研究进展[J]. *电子显微学报*, 2014(2): 188-196.  
 [24] DRIEVER S M, FRYER M J, MULLINEAUX P M, et al. Plant signal transduction[M]. Hatfield: Humana Press, 2009: 109-116.  
 [25] MCRAC D G, THOMPSON J E, et al. Senescence dependent changes in superoxide anion production in illuminated chloroplasts from bean leaves[J]. *Planta*, 1983, 158(3): 185.  
 [26] GRISHAM M B. Methods to detect hydrogen peroxide in living cells: Possibilities and pitfalls[J]. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 2013, 165(4): 429-438.  
 [27] HERNÁNDEZ-BARRERA A, QUINTO C, JOHNSON E A, et al. Chapter Fifteen-using hyper as a molecular probe to visualize hydrogen peroxide in living plant cells: A method with virtually unlimited potential in plant biology[J]. *Methods in enzymology*, 2013, 527(527): 275-290.  
 [28] BARTOSZ G. Use of spectroscopic probes for detection of reactive oxygen species[J]. *Clinica chimica acta*, 2006, 368(1/2): 53-76.  
 [29] BELOUSOV V V, FRADKOV A F, LUKYANOV K A, et al. Genetically encoded fluorescent indicator for intracellular hydrogen peroxide[J]. *Nat Methods*, 2006, 3(4): 281-286.  
 [30] FISCHER B B, HIDEG É, KRIEGERLISZKAY A. Production, detection, and signaling of singlet oxygen in photosynthetic organisms[J]. *Antioxidants & redox signaling*, 2013, 18(16): 2145-2162.  
 [31] 左玉. 脂质过氧化及抗氧化剂抗氧化活性检测方法[J]. *粮食与油脂*, 2009(2): 39-42.