

植物 SOD 的分子生物学及其在植物抗逆基因工程中的应用进展

王广慧

(绥化学院 生物与食品工程系, 黑龙江 绥化 152061)

摘要:超氧化物歧化酶(SOD)是普遍存在于生物体内的能清除超氧阴离子自由基的一类金属酶,在植物抗逆基因工程中有广泛的应用。我国研究者现已从很多植物中克隆出 SOD 基因,转 SOD 基因的研究工作也已取得了可喜的成果。现就近年来国内在植物 SOD 的分子生物学研究及其在植物抗逆基因工程中的应用研究方面的进展进行综述,并对植物抗逆基因工程中存在的问题进行了分析和探讨。

关键词:超氧化物歧化酶;植物抗逆性;转基因植物

中图分类号:Q 946-33 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2011)03-0194-04

植物在生长发育过程中会受到各种逆境的胁迫,如高温、干旱、辐射、盐碱、病原菌侵染等。这些胁迫使细胞内有害活性氧(ROS)产生与清除的动态平衡被破坏。大量活性氧的累积会影响植物的生长、发育,甚至导致细胞或植株死亡。超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, EC1.15.1.1, 简称 SOD)是普遍存在于生物体内的能清除超氧阴离子自由基的一类金属酶。植物体内的 SOD 按与酶蛋白结合的金属离子不同主要分为 3 类: Mn-SOD (主要位于线粒体中)、Cu/Zn-SOD (主要位于细胞质和叶绿体中)和 Fe-SOD^[1] (主要位于叶绿体中)。

由于各种逆境的侵袭严重影响作物的产量和种植面积,所以提高作物的抗逆性一直是作物育种领域的焦点。随着分子生物学与转基因技术的发展,人们开始从分子水平上深入认识植物与逆境之间的关系,也为作物抗逆性能的提高开辟了新的途径。我国研究者现已从很多植物中克隆出 SOD 基因,为植物抗逆分子机理的阐明以及利用转基因技术培育抗逆新品种奠定了基础。我国在转 SOD 基因的研究工作方面也已取得了可喜的成果。现综述近年来国内在植物 SOD 的分子生物学研究及其在植物抗逆基因工程中应用研究的进展情况。

1 植物 SOD 的分子生物学研究

2003 年,王伟青^[2]从低温处理 6 h 的番茄品种 L402 的叶片中提取总 RNA,用 RT-PCR 的方法得到 Cu/Zn-SOD 的 cDNA。此 cDNA 序列全长 962 bp,编码 217 个氨基酸。序列分析表明,该序列与菠菜、豌豆、拟南芥

Cu/Zn-SOD 的同源性分别是 82%、82%、80%。

2004 年,许姣卉^[3]以苹果属小金海棠(*Malus xiaojinensis* Cheng et Jiang)为试材,利用 RT-PCR 法和筛选 cDNA 文库相结合的方法,分离到小金海棠 Cu/Zn-SOD 基因(MxSod1)全长序列,进行了原核表达,并对时空表达和诱导表达模式进行了深入分析。分离到的小金海棠 MxSod1 基因 cDNA 序列全长 826 bp,具有完整的 ORF,编码 152 个氨基酸的多肽,推测分子量 15 kD。该基因具有 Cu/Zn-SOD 基因的典型结构域特征。这是苹果属植物中首次克隆到的 SOD 基因。

郭建军^[4]以念珠藻基因组 DNA 为模板,根据 SOD 基因保守序列设计特异引物进行 PCR 扩增,获得了 Fe-SOD 基因,发现其拥有 Fe-SOD 的全部保守序列,与念珠藻(*Nostoc commune* strain DHI)基因只有 90% 同源性,表明该藻种可能与后者来源于不同的亚种。高级结构预测表明,该基因编译的蛋白质含有 2 个结构域。

2005 年,韩闯等^[5]采用 PCR 技术,以热带植物夏威夷椰子(*Chamaedorea acrostichana*)基因组为模板,克隆获得了 Cu/Zn-SOD 基因片段。序列分析表明,此 Cu/Zn-SOD 基因片段含 3 个外显子和 3 个内含子,编码 64 个氨基酸,与玉米、红薯和白杨相应氨基酸序列的同源性分别为 82.81%、81.25% 和 79.69%。

2006 年,常万霞^[6]从抗旱、耐盐植物柽柳中克隆到 Mn-SOD 基因,构建到酵母表达载体 pYES2 上,并对酿酒酵母进行转化,验证柽柳 Mn-SOD 基因的功能。克隆到的柽柳 Mn-SOD 基因 cDNA 序列全长 699 bp,具完整的 ORF,编码 232 个氨基酸。其 5' 非编码区为 40 bp, 3' 非编码区为 333 bp。经生物信息学分析,该蛋白质的等电点为 7.10,分子量为 26 kD。

朱虹琳等^[7]用 RT-PCR 方法,从中国莲(*Nelumbo*

作者简介:王广慧(1973-),女,黑龙江绥化人,硕士,副教授,研究方向为生物化学与分子生物学。

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(11551559)。

收稿日期:2010-11-10

nucifera)的幼叶中成功扩增出 Cu/Zn-SOD 的 cDNA 序列。该 cDNA 序列全长 461 bp,包括起始密码子和终止密码子。其中编码区段为 456 bp,共编码 152 个氨基酸。所编码蛋白的相对分子质量为 1.552×10^4 ,等电点为 4.515。与 GenBank 中其它物种的 Cu/Zn-SOD 进行同源性比较,发现其核苷酸序列相似性高达 80%~86%,氨基酸序列相似性达 89%~94%。所有已知的 Cu/Zn-SOD 的关键活性位点在该蛋白中均保守存在。

王荣等^[8]克隆了条斑紫菜编码 Mn-SOD 的 cDNA 及基因组 DNA 全长序列,并进行了序列特性相关分析。研究结果表明,该 cDNA 序列全长 958 bp,具完整的开放读码框,编码 224 个氨基酸和终止密码子;在基因组中该基因序列全长 1 416 bp,包含 4 个外显子和 3 个内含子;该基因编码区密码子的平均 GC 含量为 60.9%,第 3 位密码子的 GC 含量高达 84.9%;序列中包含 4 个与 Mn^{2+} 的结合位点及 1 个保守的金属结合结构域;预测蛋白分子量为 24 469.09 Da,等电点为 5.99;条斑紫菜 Mn-SOD 与人的相关蛋白具有类似的空间结构,都有 6 个跨膜 α 螺旋结构域;由 cDNA 序列推导的氨基酸序列与莱茵衣藻相似性为 57.7%;进化树分析结果表明条斑紫菜 Mn-SOD 与绿藻莱茵衣藻和硅藻海链藻的亲缘关系较近。这是该基因在红藻门中的首次报道。

2007 年,胡根海等^[1]克隆了棉花胞质 Cu/Zn-SOD 基因 cDNA 序列。该 cDNA 全长 682 bp,ORF 长 456 bp,编码 152 个氨基酸,属于低拷贝基因。推测酶蛋白分子量约为 15.03 kD,等电点为 6.09,与其它植物的同类蛋白质氨基酸序列同源性在 82%~87%。他们还克隆了棉花叶绿体 Cu/Zn-SOD 基因^[9]。该基因序列全长 1 043 bp,具有完整的 ORF。推测酶蛋白分子量约为 29.0 kD。推导的氨基酸序列分析显示含有叶绿体信号肽,与已知植物的叶绿体 Cu/Zn-SOD 酶蛋白的氨基酸序列同源性在 66%~74%。

王峰等^[10]以水稻(*Oryza sativa*)品种 Cps1017 幼穗为材料,通过 RT-PCR 克隆了长度为 698 bp 的水稻细胞质 Cu/Zn-SOD 基因(*OsCu/Zn-SOD*)。序列分析表明,该基因具完整的 ORF,编码 152 个氨基酸,与玉米(*Zea mays*)Cu/Zn-SOD 基因序列的同源性为 88%。TargetP 和 ChloroP 预测编码蛋白 N 端无信号肽序列,且此编码区段有 8 个外显子和 7 个内含子。

2009 年,张玉刚等^[11]以小金海棠(*Malus xiaojinensis* Cheng et Jiang)为试材,利用差异筛选消减 cDNA 文库和 RACE 相结合的方法,分离到了小金海棠 CuZn-SOD 基因(*MxSod2*)。该基因全长 805 个碱基,ORF 为 471 bp,编码 157 个氨基酸,预测分子量为 15 kD。经系统进化树分析表明,小金海棠 *MxSod2* 与龙眼、荔枝等非禾本科植物亲缘关系较近,与花生、水稻、玉米等禾本科植物有较远的亲缘关系。

程华等^[12]利用 RACE 技术首次从银杏中克隆到锰

型超氧化物歧化酶基因(*GbMnSOD*)的 cDNA。*GbMnSOD* 的 cDNA 全长 965 bp。生物信息学分析表明,此 cDNA 序列含有 1 个 681 bp 最大读码框,编码 1 个 226 氨基酸的多肽链,推测分子量为 25.5 kD,等电点为 8.97。三维结构预测结果显示,*GbMnSOD* 含有由 12 个 α 螺旋和 3 个 β 折叠所构成的篮子状活性中心。*GbMnSOD* 氨基酸序列与其它植物的 *MnSOD* 具有很高的同源性。进化树分析结果表明,*GbMnSOD* 和其它物种的 *MnSOD* 源自于相同的祖先。Southern 杂交显示,*GbMnSOD* 属于一个小的多基因家族。Northern 杂交表明,*GbMnSOD* 在银杏的根、茎、叶和果中都有表达,在叶中的表达量最高,*GbMnSOD* 的转录受到 ABA、IAA、蔗糖、甘露醇、NaCl 和低温的诱导。

李琳玲等^[13]利用 RACE 技术从银杏中克隆到叶绿体铁型超氧化物歧化酶(*GbFeSOD*)基因 cDNA 全长。*GbFeSOD* 的 cDNA 全长 1 106 bp,含有 1 个 720 bp 的最大读码框。三维结构预测显示,*GbFeSOD* 含有由 11 个 α 螺旋和 3 个 β 折叠所构成的篮子状活性中心。进化树分析表明 *GbFeSOD* 和其它物种起源相同。Southern 杂交显示,*GbFeSOD* 属于一个小的多基因家族。Northern 杂交表明 *GbFeSOD* 在银杏的茎、叶中的表达量最高,果中表达量最小,在根中没有表达。ABA、渗透物质处理、低温和高温均能诱导 *GbFeSOD* 表达量增加,其中 4℃低温诱导增加缓慢,40℃高温诱导迅速而稳定,而 44℃培养条件下,*GbFeSOD* 表达量呈先增后降的现象。

杨鸯鸯等^[14]依据拟南芥、芥菜型油菜和白菜已知的 SOD 保守序列设计引物,用同源序列法和 RT-RACE 技术克隆出甘蓝型油菜 Cu/Zn-SOD 和 Fe-SOD 基因。经序列分析和基因片段拼接,得到 Cu/Zn-SOD 和 Fe-SOD 基因的全长 cDNA,分别为 756 bp 和 1 037 bp。以 cDNA 序列设计引物,获得 1 322 bp 的 Cu/Zn-SOD 基因组 DNA 和 1 659 bp 的 Fe-SOD 基因组 DNA。生物信息学分析表明,Cu/Zn-SOD 基因 ORF 长 459 bp,编码 152 个氨基酸,在基因组序列结构上具有 7 个外显子和 6 个内含子。而 Fe-SOD 基因 ORF 长 792 bp,编码 263 个氨基酸,在基因组序列结构上具有 8 个外显子和 7 个内含子。

阙友雄等^[15]在构建文库和大规模测序的基础上,从甘蔗叶片全长 cDNA 文库中获得 1 个甘蔗 SOD 全长基因,经生物信息学分析,判断它属于 Mn-SOD。该基因全长 919 bp,ORF 长 702 bp,5'端 UTR 长 99 bp,3'端 UTR 长 118 bp。5'端起始密码子 ATG 周边第一、-6、-3 及 +4 位的碱基为 G 碱基,符合 Kozak 规则;在 3'端 UTR 存在典型的加尾信号 AATAAA 和明显的 poly(A)结构。该基因编码 233 个氨基酸,编码蛋白分子量约为 25.3 kD,等电点为 7.11。利用 SubLocv 1.0 预测该基因编码蛋白定位于线粒体中。

2 植物 SOD 在植物抗逆基因工程中的应用研究

2003 年,王方正等^[16]将来源于豌豆的 Mn-SOD 基因与响应逆境的启动子 SWPA2(来自红薯)、TEV(烟草

蚀刻病毒翻译前导肽序列)及 TP(叶绿体转移肽序列)克隆进质粒 pCambia1301 中,用农杆菌介导法转化水稻,获得的转基因植株经 PEG 模拟干旱诱导后,光照下 MV(paraquat)引起的电解质外渗明显低于野生型水稻;经紫外线伤害后,转基因水稻光合作用的恢复能力也好于野生型水稻。

王伟青^[2]克隆了番茄品种 L402 的叶绿体 Cu/Zn-SOD 基因,并利用农杆菌介导法转化烟草,获得了抗低温胁迫的转基因烟草。

2006 年,杜娟等^[17]构建了小麦来源的 Mn-SOD 基因的单子叶植物高表达载体,用基因枪法转化优良玉米自交系的胚性愈伤组织。甲基紫经氧化损伤处理后,用电质渗透率法测定阳性株系叶片渗透液的电导率。结果表明,转基因株系的抗氧化损伤能力显著高于对照。

李筠等^[18]发现同时转入 Cu/Zn-SOD 和抗坏血酸过氧化物酶基因(APX)的转基因甘薯清除活性氧的能力增强,在水分胁迫下能保持较高的叶片含水量和净光合速率(Pn),耐旱性得到提高。

2007 年,胡根海等^[19]从陆地棉中克隆到 Cu/Zn-SOD 的 cDNA 编码区,构建了植物表达载体 pBI-SOD,验证正确后转入根癌农杆菌 LBA4404 中,并对烟草叶片进行了遗传转化,为转基因烟草抗逆性的进一步研究奠定了基础。

2008 年,张海娜等^[20]克隆了小麦的 2 个 SOD 基因 TaSOD1.1 和 TaSOD1.2,构建融合上述 2 个基因 ORF 的双元表达载体。采用农杆菌介导法获得了过量表达 TaSOD1.1 和 TaSOD1.2 的转基因烟草植株。研究表明,NaCl 处理下,与对照相比,转基因植株伤害较小,叶片失绿面积较少,植株长势明显增强,叶片的 SOD 活性均明显提高,而丙二醛(MDA)含量明显降低。转基因植株的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量,以及可溶性糖和可溶性蛋白含量也表现出与 SOD 活性相同的趋势。表明在烟草中高表达小麦 TaSOD1.1 和 TaSOD1.2 基因,通过外源基因在转录水平上的调节,能增加植株 SOD 活性,减轻盐分胁迫造成的细胞膜质过氧化,增强植株抵御盐分胁迫的能力。

吴建慧^[21]克隆了碱茅 SOD 基因(PutSOD),将 PutSOD 基因与绿色荧光蛋白 GFP 基因融合,构建到植物表达载体 pBI121 上,经农杆菌介导的真空浸润法将基因转入拟南芥中。对转基因拟南芥进行抗盐性试验,结果表明,转 PutSOD 基因拟南芥比野生型有更好的生长势,表明 PutSOD 在提高植物耐受性上有更强的作用。

汤莉等^[22]以携带有 Cu/Zn-SOD 和抗坏血酸过氧化物酶基因(APX)的马铃薯为材料,研究了其对 MV 和 NaCl 所引起的氧化胁迫的耐受性。结果表明,MV 胁迫下,转基因马铃薯叶片膜的相对电导率明显低于对照;NaCl 胁迫下,其叶绿素含量高于对照。在含 NaCl 的培

养基上,转基因幼苗生根率明显大于对照。另外,NaCl 胁迫下转基因马铃薯叶片的 SOD 和 APX 酶活性显著高于对照,与其耐盐性的提高相一致。这些研究表明,转入 Cu/Zn-SOD 和 APX 基因的马铃薯清除活性氧的能力增强,抗逆性得到提高。

陈莉等^[23]以仙客来组培苗的叶片为受体材料,采用根癌农杆菌介导法将 Mn-SOD 基因导入仙客来,并测定转 Mn-SOD 基因仙客来组培苗在 36℃ 高温胁迫下的 SOD 活性、MDA 含量、细胞膜相对透性和可溶性蛋白含量。结果表明,转基因仙客来的 SOD 活性始终高于非转基因植株,细胞膜透性和 MDA 含量上升的速度低于非转基因植株,可溶性蛋白含量高于非转基因植株,说明其对高温胁迫的抗性高于非转基因植株。

曲妍妍等^[24]将从番茄中克隆得到的叶绿体 Cu/Zn-SOD 基因,与含有 35S 启动子的 pBI121 载体重组,分别构建了正义和反义表达载体,利用农杆菌介导的叶盘法转化烟草,获得了转正义和反义基因的烟草植株。经低温弱光胁迫后表明,与野生型相比,转正义基因植株耐低温能力强,能维持较高的电子传递速率。

3 讨论

植物基因工程抗逆策略最大的优点是可利用来源于不同物种的基因,可以避免传统育种中的许多生物学限制,扩大育种范围;另一个显著的优点是提高了育种的目性,因为在转基因时仅仅是把一个已知的功能确定的基因转到植物中,而在传统育种的杂交过程中,则是把很多未知的基因一起转到另一个植株中,其中也很可能包含有不希望有的基因或性状。

但基因工程抗逆也存在明显的不足之处:如由于位置效应和拷贝数的不同,外源基因在不同转基因植株之间的表达量和表达稳定性往往存在很大差异,所以育种时需要获得较多的转基因植株分别进行分析,才能最终筛选出理想的株系;此外,外源基因的导入可能会使有些受体植物的生理代谢活动出现严重的紊乱,致使有的植株虽提高了抗逆性,却产生其它不良的影响。导致这些问题的原因在于植物体内调控机制的复杂性。外源基因在转化植株中的表达涉及到表达水平、表达部位及表达时间等诸多因素。那么如何克服这些缺点而提高植物的抗逆性呢?可考虑采取如下策略:采用逆境诱导型启动子或器官组织特异性启动子,减少抗逆基因对植物生长发育可能的不良影响;筛选单拷贝的转基因植株以减少基因沉默的发生,提高外源基因表达水平和稳定性;对转基因植株进行多代的跟踪,检测外源基因表达和遗传的稳定性;采用多基因协同表达的方法,如把调控不同抗逆路径的转录因子或其它功能基因一起转到植物体内,因为植物的抗逆反应是一个非常复杂的过程,其间涉及到很多抗逆基因的表达调控,单个基因所起的作用往往是比较有限的。

另外,还需考虑的一个重要问题就是转基因食品的

安全性。直至今日,这些问题还没有明确的答案^[25]。转基因作物转入的基因及其表达的蛋白本身可能不会对人类产生毒副作用,但由于目前还不能做到基因的定点整合,由此产生一些非目标效应(如引起某些重要蛋白的高表达或不表达而引起毒性或致敏性)也是可能的,尤其利用基因枪法获得的转基因材料后代变异较大。所以,即使迄今为止,多数研究结果显示转基因食品与传统食品具有等同的安全性和营养价值^[26-31],进行转基因食品的安全性评价仍是十分必要的^[32]。

参考文献

- [1] 胡根海,喻树迅,范术丽,等. 编码棉花胞质铜锌超氧化物歧化酶基因的克隆与表达分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1602-1609.
- [2] 王伟青. 番茄叶绿体抗氧化酶基因的克隆与遗传转化的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003: 23-55.
- [3] 许皎卉. 小金海棠超氧化物歧化酶基因克隆与分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 19-63.
- [4] 郭建军. Fe-SOD 基因的克隆及其表达研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 28-56.
- [5] 韩闯, 谢潮添, 游学明, 等. 夏威夷椰子超氧化物歧化酶基因片段的克隆与序列分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(6): 167-170.
- [6] 常万霞. 桉柳 MnSOD 基因的克隆及功能验证[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006: 19-52.
- [7] 朱虹琳, 董臣, 刁英, 等. 莲铜锌超氧化物歧化酶 cDNA 的克隆和序列分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2006, 52(4): 475-480.
- [8] 王荣, 刘海, 周晓君, 等. 条斑紫菜锰超氧化物歧化酶基因克隆与序列分析[J]. 高技术通讯, 2006, 16(5): 522-528.
- [9] 胡根海, 喻树迅, 范术丽, 等. 陆地棉叶绿体铜锌超氧化物歧化酶基因的克隆与表达[J]. 植物生理与分子生物学报, 2007, 33(3): 197-204.
- [10] 王峰, 王宏斌, 王金发, 等. 水稻细胞质铜锌超氧化物歧化酶基因的序列和表达分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, 15(2): 101-106.
- [11] 张玉刚, 郭绍霞, 韩振海. 小金海棠超氧化物歧化酶基因 MxSod2 克隆与序列分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 43-46.
- [12] 程华, 李琳玲, 许峰, 等. 银杏锰型超氧化物歧化酶 GbMnSOD 基因的克隆与表达[J]. 园艺学报, 2009, 36(9): 1283-1290.
- [13] 李琳玲, 程华, 许峰, 等. 银杏铁型超氧化物歧化酶基因 (GbFeSOD) 的克隆与表达[J]. 果树学报, 2009, 26(6): 840-846.
- [14] 杨鸯鸯, 李云, 丁勇, 等. 甘蓝型油菜 Cu/ZnSOD 和 FeSOD 基因的克隆及菌核病菌诱导表达[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 71-78.
- [15] 阙友雄, 刘金仙, 许莉萍, 等. 甘蔗锰超氧化物歧化酶基因的全长克隆、序列分析和表达特性[C]// 彭友良, 朱有勇. 中国植物病理学会 2009 年学术年会论文集. 昆明: 中国植物病理学会, 2009: 477.
- [16] 王方正, 王庆斌, 朱亚芳, 等. MnSOD 基因转化水稻及其功能的研究[C]. 中国植物生理学会全国学术年会暨成立 40 周年庆祝大会学术论文摘要汇编. 杭州: 中国植物生理学会, 2003: 319.
- [17] 杜娟, 朱赓, 李晚忱. 外源超氧化物歧化酶基因 MnSOD 在玉米中的过量表达及抗逆性的提高[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(1): 57-63.
- [18] 李筠, 邓西平, 郭尚洙, 等. 转铜/锌超氧化物歧化酶和抗坏血酸过氧化物酶基因甘薯的耐旱性[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(4): 451-457.
- [19] 胡根海, 喻树迅, 范术丽, 等. 陆地棉超氧化物歧化酶基因的克隆与烟草转化[J]. 西北植物学报, 2007, 27(11): 2169-2174.
- [20] 张海娜, 李小娟, 李存东, 等. 过量表达小麦超氧化物歧化酶(SOD)基因对烟草耐盐能力的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1403-1408.
- [21] 吴建慧. 碱茅(*Puccinellia tenuifolia*)超氧化物歧化酶基因功能解析及对杨树(*Populus × euramericana* 'Guariento')遗传转化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008: 37-88.
- [22] 汤莉, 汤晖, KWAK Sang-Soo, 等. 转铜/锌超氧化物歧化酶和抗坏血酸过氧化物酶基因马铃薯的耐氧化和耐盐性研究[J]. 中国生物工程杂志, 2008, 28(3): 25-31.
- [23] 陈莉, 周连霞, 马峰旺, 等. 转 MnSOD 基因仙客来植株的获得及其对高温胁迫的抗性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 155-160.
- [24] 曲妍妍. 番茄叶绿体 LesAPX 和 Cu/Zn-SOD 的克隆及功能分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008: 19-63.
- [25] Falk M C, Chassy B M, Harlander S K, et al. Food biotechnology: benefits and concerns[J]. Nutr., 2002, 132(6): 1348-1390.
- [26] Momma K, Hashimoto W, Yoon H J, et al. Safety assessment of rice genetically modified with soybean glycinin by feeding studies on rats[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2000, 64(9): 1881-1886.
- [27] Chen Z L, Gu H, Li Y, et al. Safety assessment for genetically modified sweet pepper and tomato[J]. Toxicology, 2003, 188(2-3): 297-307.
- [28] Hammond B, Dudek R, Lemen J, et al. Results of 13 week safety assurance study with rats fed grain from glyphosate tolerant corn[J]. Food Chem Toxicol., 2004, 42(6): 1003-1014.
- [29] El-Sanhoty R, El-Rahman A A, Bogl K W. Quality and safety evaluation of genetically modified potatoes spunta with CryV gene: compositional analysis, determination of some toxins, antinutrients compounds and feeding study in rats[J]. Nahrung, 2004, 48(1): 13-18.
- [30] Lei X. Agriculture, China could be first nation to approve sale of GM rice[J]. Science, 2004, 306(5701): 1458-1459.
- [31] Healy C, Hammond B, Kirkpatrick J. Results of a 13-week safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-protected, glyphosate-tolerant MON 88017 corn[J]. Food Chem Toxicol., 2008, 46(7): 2517-2524.
- [32] 姚春馨, 许明辉, 李进斌, 等. 转几丁质酶—葡聚糖酶双价基因水稻稻米毒理试验[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(4): 18-23.

Research Advance on Molecular Biology of Plant's Sod and Its Applications in Plant Resistance Genetic Engineering

WANG Guang-hui

(Department of Biology and Food Engineering, Suihua University, Suihua, Heilongjiang 152061)

Abstract: Superoxide dismutase (SOD) is a class of metal enzymes ubiquitous in biological body, which can eliminate superoxide anion. It has a wide application in plant resistance genetic engineering. Chinese researchers have cloned SOD genes from many plants and SOD gene transfer research has also achieved encouraging results. This paper reviews domestic research advance in recent years on molecular biology of plant's sod and its applications in plant resistance genetic engineering, and problems in plant resistance genetic engineering are also been analyzed and discussed.

Key words: superoxide dismutase; plant resistance; transgenic plant