

# 植物抗氧化剂 及其应用

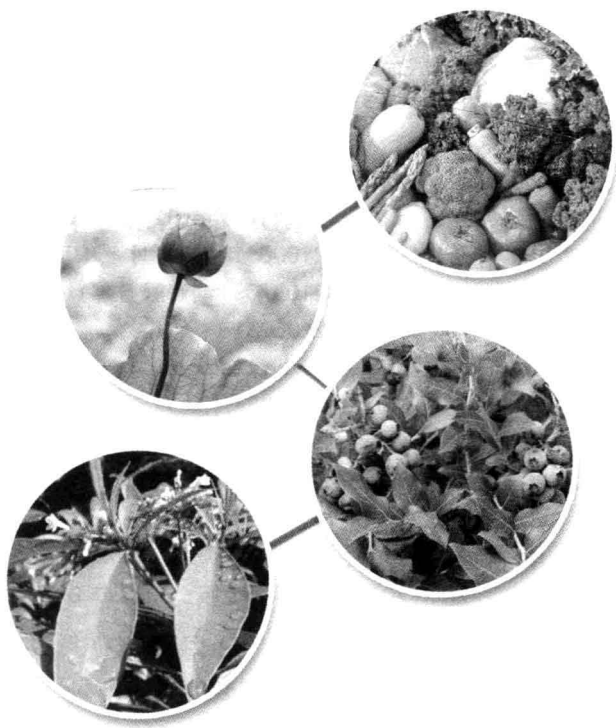
◎ 闵九康 主编



中国农业科学技术出版社

# 植物抗氧化剂 及其应用

◎ 闵九康 主编



中国农业科学技术出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

植物抗氧化剂及其应用 / 闵九康主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2013. 6

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1248 - 9

I. ①植… II. ①闵… III. ①植物 - 抗氧化剂②植物 - 活性氧  
IV. ①Q945

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058116 号

责任编辑 徐 毅 张志花

责任校对 贾晓红 郭苗苗

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82106631 (编辑室) (010)82109702 (发行部)

(010)82109709 (读者服务部)

传 真 (010)82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京昌联印刷有限公司

开 本 850mm × 1 168mm 1/32

印 张 10.5

字 数 270 千字

版 次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

版权所有 · 翻印必究

# 《植物抗氧化剂及其应用》

## 编委会

主 编 闵九康

副主编 贺焕亮 夏 兰

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 编 委 | 马春雨 | 刘耕宏 | 李美琼 | 张桂兰 |
|     | 沈育芝 | 邬奇洋 | 闵九康 | 何 畅 |
|     | 胡喜娜 | 陶天申 | 贺焕亮 | 夏 兰 |
|     | 谢 旭 | 樊晓斌 |     |     |

# 内容简介

全书共 12 章，主要论述了植物抗氧化剂和活性氧的发生及代谢过程；植物抗氧化剂和活性氧的种类及功能；植物抗氧化剂对人类健康的有益作用；植物抗氧化剂和活性氧对胁迫的防卫作用；酚类化合物在环境中的重要功能；植物活性氧在发送信息中的作用以及活性氧和光合作用的关系。

本书可供大专院校师生、科学研究单位的专家和学者，有关企业领导和工程技术人员等阅读和参考。

# 代序

## 苦楝树般的人生风骨

——记著名农业化学家闵九康

### 一、引言

闵九康教授是江苏宜兴人士，他是家乡人民精心培养和教育出的杰出代表之一。因此，宜兴人民也为其热爱家乡，建设祖国的感人事迹而感到无比自豪，同时，亦为闵九康教授作出的巨大成就和重要贡献而感到骄傲。

闵九康教授一生勤奋好学，知识渊博，硕果累累，著述等身，其创造了两项科技著作的世界纪录（1200万文字总量和500万字单卷世界纪录），并正在问鼎新的吉尼斯世界纪录。闵教授通晓英、俄、德、法等多国语言，因此，他翻译出版了大量的外国专著、论文、专利和国际会议资料，从而为我国科技发展提供了先进的技术和重要的科学信息。近年来，他又以惊人的毅力撰写了多部科技专著，从而使专著总量达到了16部之多。

他是著名农业化学家，已77岁高龄，却愿意坐八九个小时的车，跑到山西一个小村庄里当乡亲们的美誉“村官”，替农民当科技的家。

他不关心自己的腰包鼓不鼓，却记挂着乡亲们的日子是不是能富起来，他乐意饿着肚子给农民上培训课。

他大概是世界上用笔写字最多的农业科学家之一了，都可以问鼎吉尼斯世界纪录了。

他一直致力于楝素生物农药、楝素生物肥料的研发和生产。苦楝树不择地之腴瘠，坚不易摧，朴不求饰。苦楝树这种品质，也正是闵九康人生风骨的生动写照。

他在低碳农业领域研究中取得了突破性进展。因此，他被国内外有关单位和多家媒体授予了“低碳农业之父”的荣誉称号。

## 二、饿肚子上课的专家和不想让农民饿肚子的心

2012年7月初，烈日炎炎。刚刚搭了8个小时火车从北京赶到山西省忻州市的闵九康，顾不上休息，又搭车跑向定襄县杨芳乡智村。此时，那里到处都是——一片片碧绿的玉米青纱帐。

路上，不时有人打招呼：“吆，闵教授来啦！”不但是智村，附近一带，认识他的村民也很多。

定襄县是山西省少有的资源匮乏县之一。闵九康从2005年1月18日起正式受聘为智村名誉村委主任。当时他就承诺，决不当“顾得上问一下，顾不上就不问”的闲官，每到各个农时，都会主动替农民当科技的家，并郑重表示：“事要管，但分文不赚。”

他是著名农业化学家、原中国农业科学院土壤肥料研究所常务副所长、国务院特殊津贴获得者，中国工程院院士专家团农业化学首席专家——如此顶级的专家，跑到这么偏僻的地方，以其77岁高龄当个名誉“村官”，当真是乡亲们的福气。闵九康一年总要去五六次，呆上一两个礼拜，有一次甚至在那里待了一个多月。

半路经过南义井村的时候，他就被种有机甜瓜的张补银给

“抓”住了。

抓几把泥土看看，扒扒趴在地里的甜瓜，闵九康说：“土壤丝毫没有板结，这甜瓜施的是楝素生物复合肥吧？不过，养分有点跟不上了。我建议，你以后底肥施 80% 的肥料，剩下 20% 等到坐瓜期再施！”

这里说到的楝素生物复合肥，便是闵九康研发的。近年来，他一直致力于楝素生物农药、楝素生物肥料的研发和生产。在他位于中国农业科学院的办公室里，就摆着两盆楝树。他最爱跟人说起楝树的诸般好处。

楝树，又称苦楝树，那是乡间到处可见的古老树种。不择地之腴瘠，一旦立定脚跟，就蓬蓬勃勃奋发向上，它坚不易摧，朴不求饰，青翠挺拔，更难得的是材质极佳，又有净化空气等诸多的“神奇本领”。

他是那种脚上经常沾着泥巴的科学家，哪怕是古稀之年，仍在田间地头奔波。

除了山西，河南淅川、江苏如皋、新疆呼图壁、河北大城……到处都有他提供技术服务的公司和生产基地。

山西神宇科技示范基地有限公司总经理崔兴荣，本来是一家生产化肥的国有企业的厂长，1996 年，他听中科院院士李振声说，有机肥是必然趋势。他就试图将企业转型发展。他找过很多专家，其中一位专家的技术转让费是 50 万元。说实话，开价并不高，但崔兴荣付不起。1998 年，北京的一次肥料鉴定会上，他一眼就看上了闵九康研发的楝素生物复合肥的技术。

崔兴荣说：“我想要您的技术，但我没有钱。”——听起来还真有些“赖皮”。

闵九康笑说：“你总要给我点工资吧！”

月薪一千元，崔兴荣居然就请到了一位著名的农业化学家。事实上，2000 年前后，崔兴荣开始筹办自己的企业，资金困难，

就这点工资他总共才付了五六万元。但闵九康的技术却源源不断地送了过去。

有一年除夕，崔兴荣付了设备、原料费后，口袋只剩下了6元钱——刚够他和妻子搭车回家。他打电话给闵九康：“我今年连员工工资都发不出了，您的工资也只能明年补上了。”闵九康却立刻给他账号里转了3万元。

闵九康说，桉素生物复合肥对农民是件“宝”，不但能全面提供农产品所需的养分，而且对土地没有污染，不会造成土地板结，还有一定的杀虫、杀菌作用。农民越早用上，越有益，不能因为一时资金困难就停产。所以，他“救急”为的不是崔兴荣，而是农民和土地。

桉素生物复合肥零售价1500元一吨。有经销商找来，声称他可以把价格翻个倍。听完，闵九康说，不用了，卖那么高，老百姓该用不起了。他宁可搭着“11路汽车”，跟着崔兴荣到全国各地去推广。何况，他本就每年都要花大量时间到田间地头去送技术呢！

闵九康患糖尿病多年，必须非常注意饮食和休息，再加上年纪也大了，但他全国各地到处跑。行，公交车加火车，甚至是硬卧、硬座，有时候一搭就是几天几夜；吃，随便塞点馒头、喝点水；睡，晚上就在农民家里睡一觉，第二天接着到处跑……

有一次，因为火车晚点，他到达目的地时，已经是下午一点多。农民朋友依然等候在那里，一个也没离场。闵九康动情地说：“你们饿着肚子等我上课，我也饿着肚子来给你们讲课。你们学会了技术，就再也不用‘饿肚子’了！”

闵九康常说“知识送出去，钞票‘变’出来”。他不关心自己的腰包鼓不鼓，却记挂着乡亲们的日子是不是能富起来。

于是，这样一个满头银发的老科学家，走遍河南、河北、黑龙江、北京、山西、宁夏回族自治区……有一年，闵九康直到除

夕当天才匆匆赶回家过年……

南义井村有机甜瓜种植基地的张补银，种了8亩（1亩≈667平方米。全书同）甜瓜地，原来施化肥每亩需花300元，如今施楝素生物复合肥，每亩只要130元，还省了每亩五六十元的农药费。他的甜瓜不仅上市早，而且口感香甜，别人卖1元的瓜他能卖3元。5亩平地，他的收益从每亩1千元增到3千元，3亩大棚更是每亩年收益2万元。

同样种甜瓜的李仁义，靠着楝素生物复合肥，盖起了三层楼房。他怕附近的村民知道自己致富的秘密，居然选择夜深人静的时候开着卡车来运肥料。

### 三、8个单词和1200万字的科技专著

在闵九康的右手中指第一个指节，有一个突出的老茧，粗糙而厚实。这就是他几十年来笔耕不辍的证据。

至今，他已翻译和编著的农业科技著作共计15部，1200万字。其中，《农业生态生物化学和环境健康展望》一书就有498万字。而且，这个数字还在不断更新中——就在十几天前，他刚刚出版了他的新作《土壤生态毒理学和生物修复工程》，下个月他又计划出版新书《植物克生素的生产和应用》（该书已于2013年2月由中国农业科学技术出版社正式出版）。

1200万字，都是他一笔一画写出来的（他至今不习惯用电脑打字）。即便是在等待公交车和会议的休息时间，他都要掏出纸和笔写几行字。

闵九康开玩笑说，他大概是最没有“长进”的科学家了，几十年前，他到哪都拿着书看，几十年后，他到哪都在写书。不过，付出总有回报，他大概也是世界上用笔写字最多的农业科学

家了——为此，他现在正准备申请吉尼斯世界纪录。

他的勤奋在上大学时就颇为突出。1956年，他离开故乡——宜兴万石老家，到浙江大学土壤与农业化学系求学深造。那个时候，整个中国政治氛围特别浓厚，他的很多同学热衷于搞运动。但他从一开学就缠着图书馆的管理员，说要进去看书。一些比较珍贵的书籍，甚至一些从国外得到的专业书籍，他都私下里学了。他还偷偷地借了很多书籍，送到周围同样爱学习的同学手中。

那时候，学俄语是“潮流”，闵九康却“鬼使神差”般地学起了英文。他每天只要有时间就背单词。他跟自己说，我每天至少要背会8个新单词。如今，77岁的他依然保持着这个习惯，每天背8个单词。虽然记忆力已开始衰退，但他说：“我每天背8个单词，忘了3个，那我还记得5个呢！”

1960年他大学毕业。在那个年代，大学毕业后参加工作就等于捧牢了个铁饭碗，一般人会放弃继续学习的想法，但闵九康没有。他一边在浙江大学当助教，一边找英语书和专业书来看。机会来了，1962年他考上了浙江大学农业化学研究生，得到了继续深造的机会。他的勤奋，还让他精通了法、德、俄等多国语言，获得了1979年去法国留学的机会。

闵九康身上始终保持着宜兴读书人特有的坚韧劲。走路、坐车，人到哪，书本就带到哪，看书、搞研究。连在中国农业科学院土壤肥料研究所当副所长，主持会议的时候，他都能掏出本书来看。别人都说，“你这个副所长不称职。”他说：“我也这么觉得，我觉得我做研究员比当副所长好！”

在中国农业科学院工作几十年，闵九康负责全国土壤普查和植物营养诊断，以及土壤肥力、土壤酶活性和土壤有机质的研究。他总是一有空就在实验室里待着。“我不敢说农科院里最晚熄灯的人一定是我，但最晚熄灯的人里面肯定有我。”

## 四、“不甘落后症”和“心比天高症”

十年前，子女对67岁的闵九康说：“您辛苦一辈子了，还是在家歇歇吧。”闵九康风趣地说：“不行，我的‘病’不容许我歇下脚步。你问我什么病？不甘落后症！”

2012年，子女重提此事，闵九康说：“我的‘病’已经升级为‘心比天高症’，我对科学的追求也是这样，没有止境。”

17年前，他在中国农业科学院岗位上退了下来，但他转身就在院里自费租了办公室，继续搞研究。

作为农业化学家的闵九康，对生物肥料有着深入的研究。近年来，他除了研发楝素生物农药、楝素生物肥料，对转基因植物和食品的研发与安全问题还有着深入研究，在业界颇有影响。此外，他还在研究土壤修复、低碳农业、生物制氢等一系列技术。

闵九康总是说：“我的时间越来越紧了，但我心里头有太多太多想要拿出来服务人类的东西，只要能多折腾出哪怕那么一点，也好啊！”

“金窝、银窝，不如自己的草窝。”这是闵九康时常挂在嘴边的一句话。他放弃了几次留在欧美工作生活的机会，还把他出国留学的两女一子，喊回了祖国。而家乡故土，更是他心中永远的眷恋。

## 五、“低碳农业之父”和“中华苦楝王”

当人们进入闵九康教授的办公室时，映入眼帘的有两桢篇幅，即“低碳农业之父”和“中华苦楝王”。

近年来，闵九康教授由于在全球气候变化与低碳农业领域的研究中取得了突破性的进展，并获得了巨大的社会效益和经济效益。因此，其被国内外有关单位和媒体授予了“低碳农业之父”的荣誉称号，并得到了公众的认同和赞誉。之前，闵九康教授还获得了“中华苦楝王”的光荣称号。闵九康教授的这些当之无愧的称号及其数以万计的珍贵的科学论据将与日月同辉，永垂史册。

## 六、结语

在采访中，当他看到家乡报社相赠的《宜兴方言》一书，高兴地用宜兴话说：“虽然我十几岁就离开了宜兴，但宜兴话还流利佬，在家我都用宜兴话哄外孙睡觉的。”他居然能非常完整地念起家乡的童谣：“天上一个星，地下一个丁，丁零当啷挂油瓶；油瓶漏，种赤豆；赤豆不发芽，种芝麻；芝麻不结果，种大麦；大麦不齐头……”他连夜将这本书看完，还亲笔写下好几个书中未收录的宜兴童谣，托记者带给《宜兴方言》一书的编辑。

他怀念着家乡的一山一水、一土一木，经常做梦都回到家乡。他常说：我离开太久了，我真诚地希望，在我有生之年，如果能回到宜兴，我有太多的事情要做。但我最想回家种树，就种楝树，不仅有益，还能励志。我们一起把宜兴这个环保之乡建设得更加美好，人寿年丰……

记者：许娟（原载宜兴日报 2012 年 11 月 22 日第 3 版）

# 前 言

植物中的抗氧化剂及其重要功能已受到了全世界的广泛关注和深入研究。植物抗氧化剂有多种化合物，其中主要有谷胱甘肽、硫醇、抗坏血酸、生育酚（维生素 E）、类胡萝卜素和酚类化合物等。

活性氧（reactive oxygen species, ROS）主要有过氧化物、过氧化氢和羟基基团等。它们产生于氧化代谢过程中的相互转化作用。ROS 因其与生物分子发生反应而有力地造成了生物的氧化伤害。因此，重视 ROS 的研究就显得十分必要。生物暴露于环境胁迫条件下时就会遭到氧化伤害，但同时 ROS 又具有抗病原体的保卫功能。酚和小分子抗氧化剂如生育酚（维生素 E）、谷胱甘肽和抗坏血酸（维生素 C）等的作用功能研究的兴趣与日俱增。现时，这类化合物的生物合成途径的详细过程尚不清楚。因此，研究将集中在调节植物生长和植物对环境反应过程中 ROS 和抗氧化剂之间复杂和精巧的相互作用。

本书将对植物中抗氧化剂和活性氧进行深入和全面论述。同时对与此有关的内容亦作讨论。前 6 章主要讨论抗氧化剂（谷胱甘肽、硫醇稳衡中的蛋白质、抗坏血酸、生育酚、类胡萝卜素、酚化合物和过氧化氢酶）的合成和功能。因此，为了控制和调节它们的有效合成，就特别需要进一步理解抗氧化剂的代谢作用。第七章至九章则重点叙述 ROS 在发送信号，发育过程和细胞壁生物化学中的重要作用。第十章至十二章讨论了光合作用和活性氧的关系，叶片和细胞壁中 ROS 主要的来源。

植物抗氧化剂和活性氧因与人类健康密切相关，所以受到了广泛关注和重视，本书收集了许多重要的相关信息和资料，以飨读者。

本书能及时出版，得益于中国农业科学技术出版社编辑关心和支持，并归功于中国农业科学院、浙江大学、南京大学、武汉大学和北京林业大学及江苏晴兰生态农业有限公司的教授、学者、专家的撰稿和审阅。在此，我对他们的辛勤劳动和巨大的付出表示衷心感谢。

最后，十分感谢宜兴日报记者许娟为我撰写和发表的采访录。该文朴实无华，感人至深，催人奋进，其也是对我一生的高度评价。因此，我将其作为新作《植物抗氧化剂及其应用》一书的代序。掩卷沉思，感慨万千，我终于完成了这部富有历史意义的科学著作，从而也使我从“必然王国”迈入了“自由王国”的境界，“苍山如海，残阳如血”。

谢谢！

中国农业科学院 闵九康

2013 年 3 月

# 目 录

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 第一章 谷胱甘肽 .....                                                     | (1)  |
| 一、导言 .....                                                         | (1)  |
| 二、谷胱甘肽氧化还原偶合和细胞氧化还原电位 .....                                        | (2)  |
| 三、谷胱甘肽的代谢作用 .....                                                  | (3)  |
| 四、GSH 生物合成和 L-丁硫堇-SR-巯基胍胺 (buthionine-SR-sulphoximine) 的抑制作用 ..... | (6)  |
| 五、谷胱甘肽和细胞循环 .....                                                  | (12) |
| 六、叶片中的谷胱甘肽及其与激冷耐受性的关系 .....                                        | (13) |
| 七、根系和根瘤发育调节过程中的谷胱甘肽和同原谷胱甘肽 .....                                   | (16) |
| 八、运输和运载体 .....                                                     | (21) |
| 九、谷胱甘肽和信号发送 .....                                                  | (22) |
| 十、结论和展望 .....                                                      | (24) |
| 第二章 植物硫醇酶和硫醇稳衡作用 .....                                             | (26) |
| 一、导言 .....                                                         | (26) |
| 二、氧化还原电位及其与氧化还原硫醇蛋白组的关系 .....                                      | (27) |
| 三、硫醇基团的氧化作用 .....                                                  | (30) |
| 四、氧化还原蛋白质中的 C-X-X-C 和 C-X-X-S 基序 .....                             | (32) |
| 五、保持硫醇—氧化还原稳衡作用的主要反应 .....                                         | (33) |
| 六、硫醇-二硫化物相互转化过程中的酶系统 .....                                         | (36) |
| 1. 硫氧还蛋白 .....                                                     | (36) |
| 2. 谷胱甘肽氧还蛋白 .....                                                  | (37) |

|                                                      |             |
|------------------------------------------------------|-------------|
| 3. $\omega$ (omega) 和 $\lambda$ (lambda) -GSTs ..... | (40)        |
| 4. 二硫化蛋白质异构酶 .....                                   | (41)        |
| 七、抗氧化剂 (过氧化氧还蛋白, 硫醇/二硫化蛋白质)<br>的防卫作用 .....           | (42)        |
| 八、植物的硫醇蛋白组 .....                                     | (49)        |
| 九、亚细胞区室中的硫醇稳衡作用 .....                                | (51)        |
| 十、依-硫醇对基因表达的氧化还原调节作用 .....                           | (53)        |
| 十一、硫醇调节与代谢和发育途径的关系 .....                             | (56)        |
| 十二、展望 .....                                          | (57)        |
| <b>第三章 植物的抗坏血酸、生育酚和类胡萝卜素 .....</b>                   | <b>(59)</b> |
| 一、导言 .....                                           | (59)        |
| 二、抗坏血酸 .....                                         | (60)        |
| 1. 在亚细胞中的分布和位置 .....                                 | (60)        |
| 2. 抗坏血酸的生物合成 .....                                   | (60)        |
| 3. 抗坏血酸的循环 .....                                     | (65)        |
| 4. 抗坏血酸和脱氢抗坏血酸的跨膜输送过程 .....                          | (68)        |
| 5. 参与抗坏血酸氧化作用的酶系统 .....                              | (68)        |
| 6. 抗坏血酸的分解代谢作用 .....                                 | (70)        |
| 7. 抗坏血酸合成的调控和代谢工程 .....                              | (70)        |
| 8. 抗坏血酸的功能 .....                                     | (71)        |
| 三、维生素 E: 生育酚和生育酚三烯醇 .....                            | (77)        |
| 1. 类异戊二烯抗氧化剂 .....                                   | (77)        |
| 2. 生育酚和生育酚三烯醇的结构及其抗氧化剂活性 ..                          | (79)        |
| 3. 生育酚的功能 .....                                      | (82)        |
| 4. 生育酚和生育酚三烯醇的生物合成 .....                             | (85)        |
| 5. 生育酚和生育酚三烯醇生物合成的调控及其<br>工程 .....                   | (86)        |
| 四、类胡萝卜素 .....                                        | (88)        |