

Fundamentals of Physiology and Genetics and
Breeding in Crop Drought Resistance and Water Saving

作物抗旱节水的生理 遗传育种基础

张正斌 编著



科学出版社
www.sciencep.com

作物抗旱节水的生理 遗传育种基础

**Fundamentals of Physiology and
Genetics and Breeding in Crop
Drought Resistance and Water Saving**

张正斌 编著

国家自然科学基金 国家 863 计划
国家 973 计划 中国科学院资助项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了作物抗旱节水生理遗传育种研究的理论和技术体系及最新研究进展。第一篇节水农业和生物节水的理论与实践,主要介绍了我们面临的水资源危机及宏观调控对策;节水农业的发展和生物节水研究的发展趋势;研究作物水分利用效率的理论模型和测定技术。第二篇作物抗旱节水的生理遗传育种基础,重点介绍了作物抗旱节水形态性状适应和自我调控机理,作物抗旱节水的生理调节机制;特别是关于水通道蛋白,叶片表皮蜡质基因、渗透调节、抗氧化等;气孔调节与抗旱节水;激素和信号转导与抗旱抗逆;抗旱等逆境诱导蛋白;抗旱等逆境基因表达和克隆;抗旱节水性状的定位和分子标记;转抗旱抗逆基因方面的最新研究进展;作物整体抗逆性和共同机制;以及作物抗旱节水育种方面的理论和经验。

本书可作为大专院校和科研单位从事植物抗旱节水生理和遗传育种专业类的博士、硕士研究生的教材以及科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

作物抗旱节水的生理遗传育种基础/张正斌编著. —北京:科学出版社, 2003.12

ISBN 7-03-011628-3

I. 作… II. 张… III. 抗旱性-作物育种:遗传育种 IV. S332.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 053815 号

责任编辑:丁迪红 霍春雁/责任校对:刘小梅

责任印制:刘士平/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年12月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—1200 字数:431 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

How can we continue to expand food production for a growing world population within the parameters of likely water availability? The inevitable conclusion is that humankind in the 21st century will need to bring about a “Blue Revolution-more crop for every drop” to complement the so “Green Revolution” of the 20th century. Water use productivity must be wedded to land use productivity. Science and technology will be called upon to show the way.

1970 Nobel Peace Prize Laureate

Norman E. Borlaug

10 March, 2000

序 一

我国干旱半干旱地区约占国土面积的一半，其中耕地面积占到全部耕地的三分之一。干旱不仅限于在干旱半干旱地区发生，世界任何地方——包括湿润地区也出现季节性干旱。随着人口增加、经济发展以及全球气候变化，世界性的干旱缺水趋势将继续加重。解决农业生产中的干旱缺水问题不外乎通过两个互为依存的途径：一是改造环境使之适应于植物需要，二是改造植物本身使之适应于外部环境。以往采取的措施多侧重于前者，并已经取得了巨大成功。虽然今后在水土资源的改造利用方面仍存在很大潜力，有待挖掘，但改造植物本身的问题开始突显出来，特别是当水的流失、渗漏、蒸发得到最大限度控制、水的时空调节得到最大限度利用之后，提高植物自身的抗旱性和水分利用效率就成为一个关键问题和最终潜力所在。当前，以生物性节水为主的农业生态系统优化用水研究领域的兴起，正是适应了这一客观发展需要。

长期以来，增强作物抗旱性和提高水分利用效率是两个相互联系、不可分割的研究方面，进入 20 世纪 90 年代后，抗旱与节水两个名词经常同时出现。由于干旱加剧，水资源日趋紧缺，更加促进了作物抗旱与节水研究的交叉与融合；在农田生产中，从单纯追求数量向高产、优质、高效并重方向转变趋势日益明显的情况下，植物节水机理与调控的研究，即生物节水——作物自身高效用水的研究就显得尤为重要，成为植物水分关系研究的主流。

为实现作物高效用水目标，需要同时挖掘作物抗旱性和作物水分利用效率的潜力，而遗传改良、生理调控和群体适应是实现这一目标的三个主要技术途径，其中，培育出抗旱节水新品种、新类型是一个核心目标。在这一背景下，《作物抗旱节水的生理遗传育种基础》一书的出版无疑是十分及时的。

这部著作的特色是将作物抗旱与节水相互交叉，将遗传、生理与育种相结合。该书从宏观环境到微观分子，从性状到遗传，从形态发育到生理机制，从栽培育种到基因工程，对作物抗旱节水的基本理论与研究进展做出了较全面系统的论述，提供了大量新资料，并进行了一些很有见地的探讨。虽然其整体结构还可改进，且从专门学科角度看，有些论述有待进一步深入，

但它所提供的丰富知识将使读者受益匪浅，从多方面给予我们的启示更是它的价值所在。作者张正斌研究员曾和我共事过，他有过从事小麦抗旱生态育种、小麦节水生理与改良以及小麦水分利用效率分子遗传方面的研究经历，正是因为有了这样一些积累，加上他的辛勤努力才使这本自成一体的书得以顺利出版，的确难能可贵。

我很高兴为此书作序。此书对从事作物抗旱节水研究的科技工作者、教师 and 研究生是一本很好的参考读物；有理由相信，它的问世将会促进我国这方面的研究更好地向理论与实践紧密结合的方向发展。

中国工程院院士

山仑

2003年6月于杨陵

序 二

干旱是我国粮食生产的首要灾害，在水资源危机日益严重的今天和未来，作物抗旱节水生理遗传育种研究具有重要的现实和战略意义。

作物抗旱节水研究是个重要问题，也是个复杂问题，国内外科学家都长期进行了大量的研究。20 世纪 80 年代以前，主要是植物抗旱形态解剖结构和生长发育的研究，80 年代后主要是植物抗旱生理生化机理和栽培调控研究；进入 90 年代初期，节水农业开始兴起，生物节水概念出现，从抗旱向节水研究方向深入发展，作物抗旱节水生理遗传育种交叉研究成为新的发展方向；90 年代中后期，抗旱节水的分子生物学和分子遗传学及基因工程研究突飞猛进，取得了可喜的研究成果。但目前国内外没有见到这方面的系统理论专著。

张正斌同志长期致力于小麦抗旱节水遗传育种研究，在西北学习和工作过 20 多年，从事过水土保持、生态农业、小麦抗旱生态育种和节水生理遗传交叉研究，后又从事小麦水分利用效率的分子遗传研究。由于他对西北干旱环境的深切体验，研究工作的多种经历和他本人的勤奋好学与努力钻研，使他对我国旱地农业和节水农业的宏观发展以及作物抗旱节水生理遗传育种的微观机理研究都有比较全面的了解和深刻的认识。基于此丰厚的基础，他编著了这本《作物抗旱节水的生理遗传育种基础》一书。

在第一篇“节水农业和生物节水的理论与实践”中，从水资源的危机到生物节水、节水农业的发展、作物水分利用效率的研究方法和技术的系统介绍，使读者对我国和世界旱地农业和节水农业的发展有了一个比较全面的了解。在第二篇“作物抗旱节水的生理遗传育种基础”中，从抗旱节水的形态发育到生理生化机理、分子遗传、基因工程和抗旱节水育种的国内外研究进展都有较详尽的论述。

该书的特点是突出了水分高效利用的主线，辩证地论证了抗旱和节水的关系；以生理和遗传为基础原理，以育种应用为目标，理论联系实际。重点突出、条理清晰、旁征博引、内容丰富、论述精辟。难能可贵的是，本书结合作者自己的长期研究，对一些问题进行了很有见解的思考与探讨，给读者

以深层次的启发。国内外还未见到这样较系统全面、有学科交叉、自成一体的作物抗旱节水生理遗传育种的专著，对节水农业的深入研究具有重要参考价值。

我很高兴为此书作序，并希望这本书成为科研单位和高等院校从事植物抗旱节水生理遗传育种研究的科研人员和学生的一本好的参考书。我相信此书必将促进我国作物抗旱节水生理遗传育种研究的深入发展。

中国科学院院士

李振声

2003年7月于北京

前言

水是生命的源泉!

我国自古有农谚道:“有收无收在于水,收多收少在于肥”!

在 1972 年联合国召开的“人类环境”会议和 1979 年召开的“水”的大会上就向全世界发出警告“水不久将成为一项严重的社会危机,石油危机之后的下一个危机就是水”。1992 年 100 多个国家元首和政府首脑通过的《21 世纪议程》中提出:“水不仅是地球上的一切生命所需,而且对一切社会经济部门具有生死攸关的重要意义”。水资源的短缺将是世界未来发展的头等重要限制因子。我国平均每年因干旱直接减收粮食 100 亿公斤以上。干旱为我国农业的最大挑战,因干旱造成的我国粮食大幅度减产直接威胁着世界粮食安全。

因培育出矮秆抗倒高产小麦,带动世界粮食作物矮秆高产育种,使世界粮食产量在 20 世纪成倍增长,引起世界“绿色革命”(green revolution)的诺贝尔和平奖获得者 Norman E. Borlaug (2000) 讲到:“我们如何在有限可能利用的水资源条件下,生产更多的食物来满足日益快速增长的人口需要,毋庸置疑的结论是,人类在 21 世纪需要开展‘蓝色革命——让每一滴水生产出更多粮食’(blue revolution—more crop for every drop),去继续完成 20 世纪‘绿色革命’的使命,科学技术的发展在召唤我们走上这条道路”。

目前世界上已兴起了节水农业的研究热潮。越来越多的有识之士认识到生物节水(biology water saving)的重要性,只有提高生物自身的水分利用效率(water use efficiency, WUE)才有可能取得节水上的新突破。在各种抗旱节水措施中,生物抗旱节水是基础和关键,利用遗传改良培育抗旱节水优质品种,投资少、见效快、易大面积推广、效益持久、有很大的潜力可挖,是当今全球抗旱节水研究的热点,也是未来农业研究中一个前景广阔的领域。

我国旱地农业有悠久的历史和丰富的栽培经验,目前我国在主要农作物小麦、玉米、水稻、棉花上开展了较大规模的节水灌溉和栽培生理调控研究,取得了一定的成效,但在作物抗旱节水优质育种、分子遗传和基因工程研究方面还相对落后。关于抗旱节水性的基础研究,到目前为止,形态结构异化的研究已经较少见到,在我国更多的是集中在生理生化基础研究,只有少数进入分子生物学水平,而国外已进入分子遗传和基因工程应用基础研究。虽然目前国内外还没有见到作物抗旱节水生理遗传育种方面的系统专著,但 1995 年在法国召开了第一次国际干旱会议(the first INTERDROUGHT international conference),将有关论文在 1996 年 *Plant Growth Regulation* 杂志第二期上组织发表了“高等植物耐旱性的遗传、生理和分子生物学分析”(drought tolerance in higher plants: genetical, physiological and molecular biological analysis)的专刊,1997 年将其中 11 篇内容丰富的综述论文结集成册出版。抗旱节水生理遗传育种交叉研究已成为国际植物抗旱节水研究的新生点,而我国在此方面还相对薄弱,在有些方面还是空白。

节水生物学应包括:节水生理生化基础,节水栽培管理(灌溉、旱农),节水遗传

育种改良的理论与技术研究。有关节水灌溉、栽培、管理和水分生理研究的论著较多,而有关生物节水、节水的遗传育种问题研究少、起步晚、论著也少。

在水分与植物的关系方面,有 H. A. 古谢夫著,王统正译的《植物水分状况的若干规律》(科学出版社,1962)。P. J. 克雷默著,许旭旦,汤章城,王万里,陆宪辉译的《植物的水分关系》(科学出版社,1989)。

在作物抗旱生理生态方面,有邹琦主编的《作物抗旱生理生态研究》(山东科学技术出版社,1994)。赵松龄主编的《春小麦干旱生理生态学》(陕西科学技术出版社,1996)。山仑、陈培元主编的《旱地农业生理生态基础》(科学出版社,1998)。

我国在节水农业方面,已有大量的气象、地理方面水资源研究,土壤水分运移规律研究,灌溉制度和技术体系研究,作物节水栽培和调控生理生态研究。国内已出版了几本有关节水农业方面的专著,如贾大林、司徒淞、庞鸿宾等编著的《节水农业与区域治理》(中国农业科技出版社,1992),许越先、刘昌明、J. 沙和特主编的《农业用水有效性研究》(科学出版社,1992),许越先、吴凯、姚建衡编著的《节水农业研究》(科学出版社,1992)。胡毓骐、李英能等编著的《华北地区节水型农业技术》(中国农业科技出版社,1995),康绍忠、刘晓明、熊运章著的《土壤-植物-大气连续体,水分传输理论及应用》(水利电力出版社,1994),冷石林等主编的《中国北方旱地作物节水增产理论与技术》(中国农业科技出版社,1996),康绍忠、梁银丽、蔡焕杰编著的《旱区水-土-作物水分关系及其最优调控原理》(中国农业出版社,1998),农业部水土工程重点实验室,西北农业大学农业水土工程研究所主编的《西北地区农业节水与水资源持续利用》(中国农业出版社,1999),刘昌明、王会肖编著的《土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控》(科学出版社,1999),山仑、黄占斌、张岁岐编著的《节水农业》(清华大学出版社,2000)。

在作物抗旱育种方面,张正斌和王德轩著有《小麦抗旱生态育种》(陕西人民教育出版社,1992)。但目前国内外还未见有作物抗旱节水的生理遗传育种交叉研究方面的专著,特别是以作物水分高效利用的生理遗传育种方面为主的专著。

从 20 世纪 80 年代起,国外就开始了在作物水分利用效率方面的生理遗传育种研究,特别是近年来在分子遗传和转基因方面,有了可喜的进展。研究作物抗旱节水性状的分子标记和基因克隆及转基因是当今世界的热点问题,这方面虽然起步较晚,但前景诱人。国际上 2000 年成立了植物抗逆基因组的协作小组,2001 年美国科学基金资助近四百万美元开展植物(主要是水稻、番茄和拟南芥)水分利用效率基因组研究。随着科学技术的飞速发展,特别是分子生物学的应用,不断地深入地揭示了抗旱机理,使人们对由多基因控制的作物抗旱节水性的遗传规律研究和基因工程改良的设想由不可能变为可能;特别是转抗旱和抗盐基因水稻、玉米、小麦等的应用研究已有较大的进展,由不现实即将变为现实,使人们看到了抗旱节水转基因作物在不远的将来应用的希望。

作物抗旱节水是一个非常重要,但机理复杂、研究困难和问题很多的课题!我们虽不可能在短时间内做出很大的成绩,但我们必须迎难而上,不断探索!科学研究需要原始创新,需要拼搏开拓精神!长期的科学积累,一定会使我们在作物抗旱节水的遗传育种改良方面取得一定的进展!作物抗旱节水研究从形态性状→生理生化代谢→遗传背景→基因定位→基因克隆→基因工程改良不断深入,其中还有许多难题在等待我们探

索。从抗旱到节水研究是一个发展,从抗旱水分生理到抗旱节水生理遗传育种交叉研究是一个提高,从节水遗传改良到优质高产高效还有许多艰难的路程要走,需要育种学家、遗传学家、植物生理学家的合作和共同努力!

在长期的小麦抗旱节水遗传育种和生理生态交叉研究工作中,我们深深感到在许多研究领域方面,国内由于各种条件的限制明显落后于国外。为了在短时间内能追赶世界科技前沿,我们愿甘当人梯,克服各种困难,结合自己长期的研究和国内外最新发展动态,编著《作物抗旱节水的生理遗传育种基础》一书,为大家提供一个比较全面的参考,让大家能少走弯路、直击攻关目标。这是我们的心愿,也是我们义不容辞的责任!因作者的研究范围和水平有限,书中可能还会存在许多不足之处,希望同行学者多提宝贵意见。

此书是我们在 15 年长期研究工作的基础上完成的,我的硕士导师,中国科学院水土保持研究所的抗旱小麦育种学家王德轩研究员;我的博士导师,旱农学家、作物抗旱生理学家山仑院士;我的博士后导师,中国农业科学院作物品种资源研究所的小麦分子遗传学家贾继增研究员,以及香港浸会大学生物系张建华教授,中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心的刘孟雨研究员,在有关研究工作中给予了大力支持。徐萍同志在资料搜索,书稿打印及文字校对中做了大量工作。在此表示真诚的感谢!本书得到了国家自然科学基金(30270821),国家 863 计划节水重大专项(2002AA2Z4011),中国科学院生命科学与生物技术局择优支持项目(STZ-01-12),中国科学院知识创新方向项目(KXCX-SW-317-02),中国科学院知识创新重要方向项目(生命科学与生物技术局),国家 973 计划(G1998010200, 2003CB114301)等多方面的支持,在此也表示非常感谢!山仑院士和邓西平研究员给予认真细致的审阅,并提出了一些宝贵的修改意见,以及山仑和李振声二位院士给予作序,在此表示衷心感谢!

作 者

于中国科学院遗传与发育生物学研究所

农业资源研究中心

2003 年 7 月,石家庄

目 录

第一篇 节水农业和生物节水的理论与实践

1. 水危机与蓝色革命	(3)
1.1 20 世纪工业革命和绿色革命带来的机遇与挑战	(3)
1.2 为水而战——蓝色革命的呼唤	(4)
1.2.1 世界水资源	(4)
1.2.2 中国水资源	(6)
1.2.3 华北水资源	(8)
1.2.4 西北水资源	(9)
1.3 蓝色革命的崛起	(11)
1.3.1 开发空间云水资源	(11)
1.3.2 降水资源的涵养和调控	(12)
1.3.3 水资源的区域宏观调配	(13)
1.3.4 节水农业	(13)
1.3.5 城市生活和工业生产节水	(14)
1.3.6 非淡水资源的开发利用	(14)
1.3.7 生物节水	(14)
1.4 蓝色革命是绿色革命的继续	(15)
参考文献	(16)
2. 节水农业的发展	(17)
2.1 节水农业概念的发展	(17)
2.2 旱作农业节水技术的发展	(18)
2.2.1 增加土壤储蓄水分技术发展	(18)
2.2.2 减少土壤水分蒸发技术发展	(19)
2.2.3 提高作物水分利用效率技术发展	(20)
2.2.4 雨水有限灌溉技术发展	(22)
2.3 灌溉农业节水技术的发展	(22)
2.4 干湿交替节水灌溉增产理论的科学应用	(24)
2.5 华北节水农业发展	(25)
2.5.1 华北平原地下水位下降原因分析	(25)
2.5.2 华北水资源平衡的对策	(26)
2.5.3 华北平原节水农业发展对策	(28)
参考文献	(33)

3. 生物节水	(34)
3.1 生物节水的研究趋势	(34)
3.2 植物节水	(35)
3.2.1 不同植物的 WUE 差异	(35)
3.2.2 小麦 WUE 研究进展	(37)
3.2.3 不同光合作用途径植物抗旱节水差异及应用前景	(40)
3.2.4 C ₄ 植物的高光效和高 WUE 基因导入 C ₃ 植物的展望	(43)
3.3 动物节水	(44)
3.4 微生物节水	(45)
参考文献	(45)
4. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型	(48)
4.1 作物水分利用效率的概念与估算模型	(48)
4.1.1 潜在水分利用效率	(48)
4.1.2 现实水分利用效率	(49)
4.1.3 蒸腾效率	(49)
4.1.4 叶片水分利用效率	(49)
4.1.5 冠层水分利用效率	(50)
4.1.6 价值水分利用效率	(50)
4.2 蒸发蒸腾估算模型	(51)
4.2.1 农田水分平衡模型	(51)
4.2.2 Penman-Montheith 模型	(51)
4.2.3 蒸腾模型	(51)
4.2.4 蒸散模型	(52)
4.2.5 蒸腾蒸发分摊模型	(52)
4.3 问题与讨论	(53)
参考文献	(54)
5. 碳同位素在作物水分利用效率研究中的应用及问题	(55)
5.1 基本原理	(55)
5.2 Δ 在小麦 WUE 研究中的应用进展	(56)
5.3 存在问题与应用前景	(60)
参考文献	(61)

第二篇 作物抗旱节水的生理遗传育种基础

6. 作物抗旱节水的形态发育适应与自我调控	(67)
6.1 作物对于干旱环境的适应	(67)
6.2 作物的抗旱机制	(67)

6.2.1 减少蒸腾·····	(67)
6.2.2 根系加强吸水能力 ·····	(69)
6.2.3 储藏水分·····	(70)
6.3 作物的耐旱机制·····	(70)
6.4 作物的避旱机制·····	(71)
6.5 抗旱方式与作物育种·····	(72)
6.6 根系与抗旱适应·····	(72)
6.6.1 根系与土壤水分 ·····	(72)
6.6.2 根系的发育 ·····	(73)
6.6.3 根系水分倒流与蒸腾调节在栽培管理中的应用 ·····	(73)
6.6.4 不同抗旱基因型的小麦根系 ·····	(74)
6.6.5 不同作物的根系 ·····	(76)
6.6.6 根冠比和根系冗余 ·····	(76)
6.7 叶片与抗旱适应·····	(79)
6.8 群体抗旱适应的自我调控机制·····	(80)
参考文献 ·····	(81)
7. 作物抗旱节水的生理调控机制 ·····	(83)
7.1 水的生理功能·····	(83)
7.2 水的运输·····	(83)
7.3 水通道蛋白·····	(84)
7.3.1 水通道蛋白的发现 ·····	(84)
7.3.2 植物膜水通道蛋白 ·····	(85)
7.3.3 植物水通道蛋白的结构 ·····	(87)
7.3.4 植物水通道蛋白的功能 ·····	(88)
7.3.5 植物水通道蛋白功能表达与调控 ·····	(91)
7.3.6 植物水通道蛋白功能检测·····	(94)
7.3.7 植物水通道蛋白研究中存在的问题及思考·····	(96)
7.4 根系吸水的机理及抗旱节水生理调节·····	(98)
7.4.1 驱动根系水流的动力 ·····	(99)
7.4.2 水在管状组织空腔中的流动 ·····	(100)
7.4.3 水通道蛋白与根系吸水 ·····	(100)
7.4.4 根部非共质体运输途径 ·····	(101)
7.4.5 植物根部的水分倒流现象·····	(101)
7.4.6 吐水现象及在灌溉中的应用 ·····	(104)
7.4.7 植株伤流量与根系活力和土壤水分状况 ·····	(106)
7.4.8 根呼吸与抗旱性 ·····	(106)
7.4.9 根系的渗透调节 ·····	(106)
7.4.10 根系的抗过氧化·····	(107)

7.4.11 根冠平衡石淀粉·····	(107)
7.4.12 根系蛋白和氨基酸·····	(107)
7.5 蒸腾及其调控·····	(107)
7.6 角质层类物质的作用及其遗传研究·····	(110)
7.6.1 角质层类物质的作用·····	(110)
7.6.2 蜡质的成分和形态·····	(111)
7.6.3 脂类物质的转运蛋白·····	(112)
7.6.4 与蜡质有关的基因·····	(113)
7.6.5 植物蜡质基因的克隆和分离·····	(115)
7.6.6 蜡质与环境调控·····	(116)
7.6.7 木栓化·····	(116)
7.6.8 有关植物蜡质的研究方法·····	(117)
7.7 渗透调节·····	(117)
7.7.1 渗透调节现象及其功能·····	(117)
7.7.2 渗透调节及表现差异·····	(119)
7.7.3 渗透调节的遗传·····	(121)
7.7.4 脯氨酸代谢与渗透调节·····	(122)
7.7.5 甜菜碱代谢与渗透调节·····	(123)
7.7.6 渗透调节应用价值的探讨·····	(124)
7.8 抗氧化与细胞膜稳定性·····	(125)
7.8.1 抗氧化酶防御体系·····	(125)
7.8.2 渗透调节物质与过氧化反应·····	(127)
参考文献·····	(128)
 8. 气孔调节与抗旱节水·····	(134)
8.1 气孔分布和结构差异·····	(134)
8.2 气孔开关调控·····	(135)
8.3 气孔振荡·····	(137)
8.4 光合作用午休·····	(138)
8.5 光合作用的气孔限制和非气孔限制·····	(139)
8.6 气孔的不均匀关闭·····	(140)
8.7 CO ₂ 浓度升高与气孔变化·····	(140)
8.8 气孔调节的遗传改良·····	(141)
参考文献·····	(143)
 9. 激素和信号转导与抗旱抗逆·····	(146)
9.1 植物水分胁迫信号识别和转导·····	(146)
9.1.1 渗透胁迫感受机理和部位·····	(146)
9.1.2 质外体与植物细胞第一信使·····	(148)

9.1.3 细胞骨架-微管和微丝与信号转导	(150)
9.1.4 质膜上的信号感受器	(152)
9.1.5 液泡膜上信号感受器	(153)
9.2 植物水分平衡中根冠间的信号与气孔调控	(153)
9.2.1 根源逆境信号的性质	(155)
9.2.2 Ach 信号	(155)
9.2.3 ABA 信号	(156)
9.2.4 细胞分裂素信号	(169)
9.2.5 茉莉酸信号	(170)
9.2.6 电化波、伤素和水力信号	(170)
9.2.7 无机离子信号	(171)
9.3 植物细胞信号转导中的第二信使	(172)
9.3.1 Ca^{2+} 信号	(172)
9.3.2 1,4,5-三磷酸肌醇/二脂酰甘油双信使	(178)
9.3.3 环腺苷二磷酸核糖	(179)
9.3.4 环化单磷酸腺苷	(179)
9.3.5 磷脂酶	(180)
9.3.6 蛋白激酶	(183)
9.3.7 pH (质子) 信号	(186)
9.3.8 H_2O_2 信号	(188)
9.4 逆境信号转导的复杂性	(189)
9.5 植物激素及其应用	(189)
9.5.1 ABA 的合成和作用	(189)
9.5.2 细胞分裂素	(191)
9.5.3 水杨酸	(192)
9.5.4 植物激素与不定根的形成	(193)
9.5.5 植物激素与衰老	(193)
参考文献	(194)
10. 干旱等逆境诱导蛋白和糖及其功能	(207)
10.1 干旱诱导蛋白	(208)
10.2 胚晚期丰富蛋白	(210)
10.2.1 胚晚期丰富蛋白的存在与定位	(210)
10.2.2 LEA 蛋白的结构和功能	(211)
10.3 耐脱水性与糖	(213)
10.4 渗透调节蛋白	(215)
10.5 热激蛋白	(215)
10.6 泛肽	(217)
参考文献	(218)

11. 干旱等逆境诱导基因的表达和调控及克隆	(221)
11.1 干旱诱导的基因表达	(221)
11.2 ABA 诱导的基因表达	(223)
11.3 ABA 非依赖诱导的基因表达	(224)
11.4 ABA 转录水平上调的基因表达	(224)
11.5 ABA 不能诱导的基因表达	(225)
11.6 干旱和其他机制互作诱导的逆境基因表达	(226)
11.7 干旱应答基因的功能	(227)
11.8 麦类作物抗旱抗逆相关基因的分离和克隆	(228)
11.9 植物抗逆性功能基因组研究展望	(229)
参考文献	(231)
12. 抗旱节水相关基因的定位和分子标记	(236)
12.1 小麦	(236)
12.2 大麦	(238)
12.3 水稻	(239)
12.4 玉米	(240)
12.5 高粱	(241)
12.6 大豆	(242)
12.7 番茄	(242)
12.8 植物基因组间胁迫相关基因的保守性	(242)
参考文献	(245)
13. 转耐旱耐逆基因作物	(248)
13.1 转耐旱耐盐基因烟草	(248)
13.1.1 甘露醇基因	(248)
13.1.2 <i>D-ononitol</i> 基因	(249)
13.1.3 果聚糖基因	(249)
13.1.4 海藻糖基因	(250)
13.1.5 甜菜碱基因	(250)
13.1.6 脯氨酸基因	(251)
13.1.7 <i>LEA</i> 基因	(252)
13.1.8 过氧化氢酶基因	(252)
13.2 转耐脱水耐盐基因拟南芥	(252)
13.3 转耐旱耐盐耐寒基因苜蓿	(253)
13.3.1 <i>MnSOD</i> 基因	(253)
13.3.2 <i>Alfinl</i> 基因	(253)
13.4 转耐旱耐盐基因水稻	(254)