

图书在版编目(CIP)数据

环境污染与食品安全/张乃明主编. —北京: 化学工业出版社, 2007.1

ISBN 978-7-5025-9972-0

I. 环… II. 张… III. 环境污染-影响-食品卫生-研究 IV. X503

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027614 号

责任编辑: 刘兴春

文字编辑: 汲永臻

责任校对: 吴 静

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 320 千字 2007 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

《环境污染与食品安全》编委会

主任：张乃明

副主任：周晓理 段永蕙

编委会：张乃明（云南农业大学）

周晓理（上海应用技术学院）

田光明（浙江大学）

段永蕙（山西财经大学）

Eric TAISNE 法国 ISA Lille (Institute Supérieur of Agriculture)

南忠仁（兰州大学）

申瑞玲（郑州轻工业学院）

陈建军（云南农业大学）

程红艳（山西农业大学）

文波龙（云南农业大学）

前 言

食品是人类生存和发展的最基本物质，人类在对食品永不满足需求的同时，也不断地促进和发展了食品的生产，今天食品工业已是许多国家在各个产业中名列前茅的重要支柱产业。对于食品而言安全性本来是食品最基本的要求，食品应具有安全、营养和食欲三个基本要素，其中安全则是消费者选择食品的首要标准。但近年来在世界范围内不断出现食品安全事件，如英国“疯牛病”事件，比利时“二□英”事件，日本的“0—157”事件以及国内发生的苏丹红色素、吊白块、毒米、毒油、孔雀石绿、瘦肉精等事件，使得全球食品安全形势十分严峻，日益严重的环境污染和频繁发生的食品安全事件给人类生命与健康带来巨大威胁，并已成为全球关注的两大热点问题。

本书试图对上述两大热点问题进行有针对性的介绍。全书共分8章，第1章主要阐述了环境问题的产生及环境污染、食品质量与安全的基本概念，环境中污染物影响食品质量的途径，国内外食品安全状况以及食品安全监督管理体系，并突出阐述了环境污染与食品安全领域研究动态和发展方向；第2章重点介绍了大气污染、水污染、土壤污染的基本特征以及对食品安全性的影响，同时也对辐照食品的安全与放射性污染的问题进行了论述；第3章系统介绍了农用化学物质包括化肥、农药以及塑料地膜的种类，在农业生产中的使用情况以及对农产品质量与食品安全性的主要影响与防治措施；第4章介绍了兽药和饲料添加剂的基本概念、兽药和饲料添加剂对食品安全性的影响、发生的原因、带来的危害以及应采取的控制技术措施；第5章论述了食品添加剂定义、种类对食品安全有影响的常见食品添加剂以及正确使用食品添加剂的方法；第6章则介绍了HACCP提出的背景及基本的原理，并结合实际以案例形式阐述了HACCP在中国及欧洲国家不同类型的食品生产企业中的应用情况；第7章简要介绍了无公害农产品、绿色食品、有机食品的概念、认证程序、产地环境要求、生产技术规程和具体的生产技术；第8章对安全食品原料生产基地的环境质量监测、评价与管理做了全面论述。

本书在编写过程中既考虑到作为教材的基础性和系统性，又充分体现环境污染与食品安全领域的最新科学研究进展，同时为兼顾这方面知识的普及，在文字表达上力求通俗易懂。本书适于农业、工商、质检、卫生、食品与药品监督管理、食品生产企业等部门的技术与管理人阅读或作为培训教材，也适于作为高等院校环境科学、农业资源与环境、食品质量与安全、食品科学、农畜产品加工等专业的教材。

全书各章节的编写分工为：第1章和第8章由张乃明编写；第2章由南忠仁、陈建军、程红艳、刘芳编写；第3章由段永蕙、曹娜、张乃明编写；第4章由申瑞玲编写；第5章由周晓理编写；第6章由周晓理、Eric TAISNE编写；第7章由田光明、文波龙编写；最后，全书由张乃明统稿。本书在编写过程中参阅了国内外相关领域许多专家的研究成果和发表的文献资料，化学工业出版社给予大力支持与帮助，在此一并表示衷心感谢。

限于学识水平，书中的不足与欠妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2006年12月于昆明

1 绪 论

1.1 环境与环境污染问题

环境污染与食品安全已成为全球性的热点问题，特别是环境污染问题有随着经济增长和人口增加呈逐渐加重的趋势，因此，研究环境污染对食品安全的影响，必须首先对环境的概念和环境污染问题的产生有一个初步的了解。

1.1.1 环境的概念

环境（environment）是相对于某一中心事物而言的。某一中心事物周围的事物，就是这个中心事物的环境。在环境科学中，环境一般是指：（a）一个生物个体或生物群体的周围的自然状况或物质条件；（b）影响个体和群体的复杂的社会、文化条件。人类生存在自然环境里，同时也生存在技术化、社会化的人文环境中，这些都是环境的重要组成部分。以人类为中心来看待环境的观点叫做“人类中心主义”。它与以生物为中心的环境观以及与以生物与非生物为中心的环境观有着重大的区别，不同的环境观必然直接影响到人们对待环境的态度和行为。

在实际工作中，学术上的概念往往不能直接应用，于是便有了法律意义上环境的概念与定义。例如《中华人民共和国环境保护法》明确规定环境是指：“大气、水、土地、矿藏、森林、草原、野生动物、野生植物、水生植物、名胜古迹、风景游览区、温泉、疗养区、自然保护区、生活居住区等”。这实际上是一种把环境中应当保护的的对象界定为环境的工作定义，目的是为了法律的顺利贯彻和准确实施。

1.1.2 环境系统

系统是由两个或两个以上相互独立又相互联系和制约、执行特定功能的要素组成的整体。组成系统的要素又称子系统，而每个子系统又由若干更小的子系统所构成；同样，每一个系统又是一个更大系统的子系统。一般来说，作为一个系统具有以下 5 个特征：集合性、关联性、目的性、环境适应性与整体性。

环境是一个系统，它具有系统的特征。环境系统（environmental system）是一个动态的开放系统。它的子系统有大气环境、水环境、土壤环境、生物环境等。这些基本的组成要素被称为环境要素，每一个环境要素又可以再分为若干子系统。如水环境系统可以再分为流域环境系统、海洋环境系统和湖泊环境系统等。

环境系统概念的提出，是把人类的生存环境作为一个统一的整体来看待，避免人为地把环境分割为互不相关、支离破碎的各个组成部分。揭示环境系统的内在本质在于各环境要素之间的相互关系和相互作用，对于研究和解决当前许多环境问题具有重大意义。

环境系统是具有一定自我调节能力的动态平衡体系，能对外界较小的冲击进行补偿和缓

冲，从而维持系统的稳定性。环境系统中任何一个要素发生变化便会影响整个系统的平衡，通过调整达到新的平衡。

1.1.3 环境污染问题

环境污染（environmental pollution）问题是指由于自然界或人类的活动，使环境质量下降或生态环境系统失调，对人类的社会经济发展、健康和生命产生有害影响的现象。从引起环境问题的根源来划分，环境问题可分为两类。由自然力引起的原生环境问题，称为第一环境问题，主要指地震、洪涝、飓风、海啸、火山爆发等自然环境灾害问题。目前人类的技术水平和抵御能力还很薄弱，难以战胜这类环境问题。由人类活动引起的次生环境问题，也称第二环境问题，它分为环境污染和生态破坏两大类。

自然灾害的形成，主要是自然力作用的结果，是不以人们的意志力为转移的无法避免的客观事实，加大或减轻灾害的发生而完全控制其影响尚不可能。但人为的作用可以加速或减缓灾害的发生，如乱砍滥伐森林会加剧洪涝灾害，因此，尽量预防减缓灾难则是力所能及的。

由于人为的因素使环境的构成或状态发生了变化，导致环境质量下降，扰乱和破坏了人们正常的生产和生活条件就是环境污染。即指有害的物质如工业“三废”对大气、水体、土壤和生物的污染。此外还包括声污染、热污染、放射性污染和电磁辐射等。生态破坏则是指由于人类活动直接作用于自然环境而引起的对自然生态系统的不良影响。例如，乱砍滥伐引起的森林植被破坏，过度放牧引起的草原退化，大面积开垦草原引起的荒漠化，植被破坏引起的水土流失等。

环境问题起源于史前时期，当人类使用火，开始农业耕种，人类对自然的施加影响便开始了。然而，掀起第一次环境浪潮的则是自工业革命以来，由于科学发明和技术进步使社会生产力迅速提高，创造了巨大的物质财富，人类干预和改造大自然的能力和规模突飞猛进，同时也带来了新的环境问题，自然资源的过度开发利用已使其难以恢复和再生，急剧增加排向环境的有害、有毒废物导致生态环境不断恶化，化肥、农药过度的使用不仅造成对生态系统的严重破坏，而且危及农产品质量与安全，20世纪50~60年代发生了震惊世界的“八大公害事件”使成千上万人罹难，正是大自然对人类一味追求经济产值、自毁家园式的畸形发展模式的报复。

1962年，美国生物学家卡尔逊（R. Carson）《寂静的春天》（silent spring）一书的出版，展现了由于杀虫剂污染带来的严重后果，揭示了污染对生态系统的影响，引起了广泛的注意。1972年联合国在瑞典斯德哥尔摩召开了“人类环境会议”，通过了《人类环境会议宣言》，呼吁世界各国政府和人民共同努力，保护人类生存的地球环境。1992年在巴西里约热内卢联合国又一次召开“环境与发展大会”，世界各国政府首脑一起讨论环境与发展问题，通过了若干公约，使环境保护进入了一个新的发展阶段。

当前世界面临的环境问题主要表现在以下几个方面：大气污染日益严重；臭氧层破坏；温室效应和气候变化；海洋环境恶化；水资源短缺、水污染加剧；土壤污染、土地退化和沙漠化严重；森林砍伐；物种消失；有毒有害化学品和危险废物排放猛增。环境污染不仅造成巨大的经济损失，而且许多污染物通过食物链传递威胁食品安全与人体健康，在许多地区环境污染已成为经济持续发展的主要制约因素，食品安全事件频发已成为社会稳定的巨大隐患。

无论是发展中国家还是发达国家，随着人类对环境与资源不适当或过度的开发和利用，使得地球资源、自然系统和种群所面临的危机逐步升级，更使得环境污染问题越来越突出。伴随着工业化和城市化进程的加快，有毒有害的污染物种类和数量都在不断增加，当各种污染物进入大气、水体和土壤，其数量、浓度和持续时间超过了环境的自净能力，以至于破坏生态平衡，影响人体健康，就会造成环境污染，环境污染可以使环境中的物质组成发生改变，而且环境污染物可通过大气、水体、土壤和食物链等多种途径对人体产生影响，从而造成人体对生存的不适应，甚至产生由环境污染而引起的食品安全问题。食品作为环境中物质、能量交换的产物，其生产、加工、贮存、分配和制作都是在一个开放的系统中完成的。那么，在食品的生产周期链中，都可能出现因环境污染因素而导致的食品的质量下降与被污染问题。

1.2 食品的质量与安全

1.2.1 食品与现代食品的概念

食品 (food) 也称食物，是人类生存和发展必需的最基本的物质。回顾人类文明进步的历史，食物可划分为两个时期，即“食物采集时期 (food-gathering period)”和“食物生产时期 (food-gathering period)”。“食物采集时期”是公元前 8000 年以前的时代，这个时期人类以生吃肉食，采集野生植物为主；“食物生产时期”是公元前 8000 年以来，包括现代，食物的种类和生产技术随着社会技术的进步而不断发展。据文献介绍，啤酒酿造可以追溯到公元前 7000 年的古代巴比伦帝国 (Babylonia)。早在公元前 3000 年，人类就学会了饲养家畜，生产牛奶、黄油、奶酪，腌制肉和鱼等技术，祖先将这些食品生产技术一直延续至今。

按照《中华人民共和国食品卫生法》第五十四条的规定：食品是“指各种供人食用或者饮用的成品和原料以及按照传统是食品又是药品的物品，但是不包括以治疗为目的的物品”，这是对食品的法律含义。而现代食品，从食品生产卫生监督角度来看，可认为是应用现代加工技术生产供现代人食用或饮用的各类食品。

1.2.2 食品的分类

现代食品的种类已远远超出“前人食谱”，食品工业已成为世界各国产值的最大的部门之一，如美国、日本、法国的食品工业在制造业中位居第一位，中国食品工业总产值在各种行业中排第三位。

现代食品不仅生产规模大，而且食品的种类也很多，概括起来可分为以下 20 大类。

- ① 粮食及制品 指各种原粮、成品粮以及各种粮食加工制品，包括方便面等。
- ② 食用油 指植物和动物性食用油料，如花生油、大豆油、动物油等。
- ③ 肉及其制品 指动物性生、熟食品及其制品，如生、熟畜肉和禽肉等。
- ④ 消毒鲜乳 指乳品厂 (站) 生产的经杀菌消毒的瓶装或软包装消毒奶以及零售的牛奶、羊奶和马奶等。
- ⑤ 乳制品 指乳粉、酸奶及其他以奶为主要原料生产的属于乳制品类的食品。
- ⑥ 水产类 指供食用的鱼类、甲壳类、贝类等鲜品及其加工制品。
- ⑦ 罐头 将加工处理后的食品装入金属罐、玻璃瓶或软质材料的容器内，经排气、密

封、加热杀菌、冷却等工序达到商业无菌的食品。

⑧ 食糖 指各种原糖和成品糖，不包括糖果等制品。

⑨ 冷食 指固体冷冻的即食性食品，如冰棍、雪糕、冰激凌等。

⑩ 饮料 指液体和固体饮料，如碳酸饮料、汽水、果味水、酸梅汤、散装低糖饮料、矿泉饮料、麦乳精等。

⑪ 蒸馏酒、配制酒 指以含糖或淀粉类原料，经糖化发酵蒸馏而制成的白酒（包括瓶装和散装白酒）和以发酵酒或蒸馏酒作酒基，经添加可食用的辅料配制而成的酒，如果酒、白兰地、香槟、汽酒等。

⑫ 发酵酒 指以食糖或淀粉类原料经糖化发酵后未经蒸馏而制得的酒类，如葡萄酒、啤酒。

⑬ 调味品 指酱油、酱、食醋、味精、食盐及其他复合调味料等。

⑭ 豆制品 指以各种豆类为原料，经发酵或未发酵制成的食品，如豆腐、豆粉、素鸡、腐竹等。

⑮ 糕点 指以粮食、糖、食油、蛋、奶油及各种辅料为原料，经烘烤、油炸或冷加工等方式制成的食品，包括饼干、面包、蛋糕等。

⑯ 糖果蜜饯 以果蔬或糖类的原料经加工制成的糖果、蜜饯、果脯、凉果和果糕等食品。

⑰ 酱腌菜 指用盐、酱、糖等腌制的发酵或非发酵类蔬菜，如酱黄瓜等。

⑱ 保健食品 指依据《保健食品管理办法》，称之为保健食品的产品类别。

⑲ 新资源食品 指依据《新资源食品卫生管理办法》，称之为新资源食品的产品类别。

⑳ 其他食品 未列入上述范围的食品或新制订评价标准的食品类别。

1.2.3 国内外食品的安全问题现状与对策

对于食品而言安全性本来是食品最基本的要求，简单地说，食品应具有安全、营养和食欲三个基本要素。其中安全则是消费者选择食品的首要标准。但近年来在世界范围内不断出现食品安全事件，如英国“疯牛病”事件，比利时“二口英”事件，日本的 O-157 事件以及亚洲的“禽流感”和欧洲的“口蹄疫”等，国内发生的苏丹红色素、孔雀石绿、吊白块、毒米、毒油、瘦肉精事件等，使得全球食品安全形势不容乐观，食品安全成为全球的热点问题之一。

俗话说“民以食为天”，食品安全是上至国家领导、下至普通百姓都很关注的大事，近年来频繁发生的食品安全事件，足以说明食品安全状况不容乐观，环境污染对食品安全性的威胁问题不能掉以轻心，这可以从近年来国内外发生的食品安全事件得到验证。

(1) 国际方面的食品安全事件

① 英国疯牛病事件 疯牛病从 1985 年在英国发现后，20 世纪 90 年代初发展成为一个高潮，又逐渐扩展到西欧，目前已经变成世界性问题。疯牛病可能通过牛肉和牛肉制品，尤其是内脏和骨髓传染给人类，引起新型老年性痴呆症即新型克雅症。疯牛病是对牛海绵状脑病（BSE）的俗称，它是一种慢性、具有传染性的致死性中枢神经系统疾病。该病临床和组织学病理学特征是病畜神经失常、共济失调、感觉过敏和中枢神经系统灰质空泡化。疯牛病、疯羊病和新型克雅病统称为可传染的海绵脑病。

2000年7月英国有34万个牧场的17万头牛感染此病,已屠宰焚毁30多万头。流行趋势于20世纪90年代后期明显下降,但发病率每年仍以23%的速度增加,并由英国向西欧,全欧和亚洲扩散,受累国家超过100个。有科学家推测处于潜伏期的病人约50万人,发病后表现为进行性痴呆、记忆丧失、共济失调、震颤、神经错乱,最终死亡。发生并流行于英国的疯牛病,导致英国为此损失300亿美元。

② 二□英污染食品事件 1999年在欧洲发生的一起对人类健康造成威胁的恶性事件。比利时、荷兰、法国、德国连续发生饲料受到二□英污染,导致畜禽类产品及乳制品二□英含量过高现象。

二□英是一种无色无味的脂溶性物质,包括210种化合物,毒性是氰化物的130倍,砒霜的900倍,是目前世界上已知的有毒化合物中毒性最强的。其致癌性质极强,还可能引起严重的皮肤病和伤及胎儿。二□英微量摄入人体不会立即引起病变,但由于其稳定性极强,一旦摄入就无法排出。如长期食用含有二□英的食物,这种剧毒成分就会蓄积下来,最终造成对人体的严重危害。

这种可怕的“世纪之毒”是从哪里来的?它并非天然存在,而是由工业活动人为造成的。二□英在工业化国家主要来自化学品杂质、城市垃圾(尤其是塑料袋)焚烧、纸张漂白及汽车尾气排放。据悉,此次比利时等国大量家禽遭二□英污染,很可能是由于在饲料中掺入了含有珀瑞玲(pyralene)的工业用油。这次事件造成的直接损失达3.55亿欧元,如果加上与此关联的食品工业,损失已超过上百亿欧元。

③ 日本O-157中毒事件 自1996年6月从日本多所小学发生集体食物中毒事件而发现元凶为“O-157”大肠杆菌以来,日本全国至当年8月患者已达9000多人。其中7人死亡,数百人住院。“O-157”是一种长约0.002mm、宽约0.001mm的杆菌。“O”是德语对这种细菌称谓的第一个字母。大肠杆菌因其抗原抗体反应不同,截至目前被分为173种。“O-157”于1982年被美国科学家定为第157种而得名。感染上大肠杆菌“O-157”的患者往往都伴有剧烈的腹痛、高烧和血痢。病情严重者并发溶血性尿毒症症候群(HUS)和脑炎,危及生命。“O-157”引起的食物中毒事件近年来不仅在日本,而且在美国以及欧洲、大洋洲、非洲等地也发生过。

④ 日本雪印牌牛奶事件 2000年6月底以来,日本关西等地区发生特大食品中毒事件,一万多名消费者饮用雪印乳业公司大阪工厂生产的低脂肪牛奶后出现呕吐和腹泻等中毒症状。这是二战后日本发生的规模最大的一起食品中毒事件。大阪府公共卫生研究所证实,从患者饮用剩余的雪印牛奶中检查出了黄色葡萄状球菌,这种葡萄状球菌导致A型肠毒素滋生,该毒素可造成饮用者腹泻、呕吐及全身不适。

(2) 我国食品安全的状况

今天的食品安全不仅仅是一个国家一个地区的问题,同时也是一个全球性问题。近年来,国际食品安全问题发生频繁,食物中毒和死亡人数大幅增长,引起国际社会的广泛关注。我国历来重视食品的安全问题,但问题依然严重。据卫生部的统计数据表明,我国近几年食品安全问题日趋严重,因食品而中毒、死亡人数增长速度惊人。1998~2000年间,在短短的3年中我国食物中毒人数在10万人左右,死亡人数高达300人以上。但有关专家指出,实际食物中毒、死亡人数远远超过国家有关部门公布的数据。在2000年后,我国食品安全问题更趋严重。频频见诸媒体和走进公众视野的如重庆市“毛发水”酱油案件;天津输液瓶灌装酱油案件;浙江省白砂糖中添加“吊白块”案件;广东劣质大米案件;内蒙古死因

不明羊肉案件；江西病死猪肉加工食品案件；重庆市非法加工伪劣食品案件；广东省中山市 78 人因食用甲胺磷农药残留“蔬菜”而食物中毒案件；因食用含有“瘦肉精”的猪肉，浙江省杭州市 60 多人食物中毒和广东百余人食物中毒案件；阜阳“劣质奶粉”事件、“苏丹红一号”事件。此外，涉及因假酒、农药残留、食品或饲料中添加违禁物质造成的食物中毒，导致人员死亡和大批人员集体住院的事件时有发生。

1.3 环境污染与食品安全性

影响食品质量与安全性的因素很多，其中环境污染对食品安全性的影响较大，同时也较为普遍。按食品污染的性质来分，有微生物性污染、化学性污染、放射性污染、寄生虫污染；按食品污染的来源划分有原料污染、加工过程污染、包装污染、运输和贮存污染、销售污染；按食品污染发生的情况来划分，有一般性污染和意外性污染。1993 年，英国 C. E. Fisher 研究并列出了现代食品安全问题的六大类别：环境污染物、自然毒素、微生物致病、人为加入食物链的有害物质、营养失控、其他不确定的饮食风险。其中前四类问题都直接或间接与环境相关，而且环境污染物还被单列一类，可见，环境污染因素已经成为威胁食品安全的主要原因之一。

随着工业化发展带来的环境污染日趋严重，越来越多的有毒有害物质进入食品而使食品的营养价值和质量降低或对人体产生不同程度的危害。环境中能够对食品安全造成影响污染物是多种多样的，它们主要来源于工业、采矿、能源、交通、城市排污及农业生产，并通过大气、水体、土壤及食物链危及人类饮食安全。大气污染物的种类很多，主要来自矿物燃料燃烧（如煤和石油等）和工业生产。前者产生 SO_2 、氮氧化物、碳氧化物、碳氢化合物和烟尘等；后者随所用原料和工艺不同而排出不同的有害气体和固体物质（粉尘），常见的有氟化物和各种金属及其化合物。这些大气污染物可以直接被人和动植物吸收，也可通过沉降和降水而污染水体与土壤。水体污染引起的食品安全问题，主要是通过污水中的有害物质在动植物中累积而造成的。水体污染物对陆生生物的影响主要是通过污水灌溉的方式造成。污灌可以使污染物通过植物的根系吸收，向地上部分以及果实中转移，使有害物质在作物中累积。同时有害物质也可直接进入生活在水中的水生动物体内，并蓄积。造成土壤污染的主要原因是向土壤施肥、施用农药、用污水灌溉、在地面上堆放废物以及大气中的污染物沉降到土壤中。当进入土壤的污染物不断增加，致使土壤结构严重破坏，土壤微生物和小动物会减少或死亡，这时农作物的产量会明显降低，收获的作物体内毒物残留量很高，从而影响食用安全。

1.4 环境污染与食品安全主要研究内容与发展趋势

1.4.1 环境污染与食品安全主要研究内容

环境污染与食品安全是一门全新的交叉学科，就其研究内容而言，不仅涉及面广，内容丰富，而且综合性、应用性、技术性都很强。当前的主要研究内容可以概括为以下 6 个方面：

- (a) 食品（农产品）原料产地环境质量（大气、水、土壤）对食品的质量与安全性的影

响，包括原料基地选择、监测、评价和管理等；(b) 食品加工的环境条件和加工过程中可能引起食品物理、生物和化学污染的危害分析与关键点控制 (HACCP)；(c) 食品添加剂的选择和应用对食品质量与安全性的影响及预防；(d) 饲料添加剂和兽药残留对动物源食品安全性的影响；(e) 农用化学物质 (化肥、农药、地膜) 对农产品的危害与健康风险；(f) 安全食品包括无公害食品、绿色食品、有机食品的基本知识与生产技术规程。

1.4.2 环境污染与食品安全发展趋势

(1) 发展可靠、快速、便携、精确的食品安全检测技术

建立一批在技术上与国际接轨，经过科学认证的重点研究和检测机构，为食品安全的检测技术与重点方法提供科技支撑。依据中国国情，在近期应重点发展快速检测技术。同时，有选择性地研究与研制高、精、尖检测方法，开发部分先进的仪器设备。加快研制检测所需要的消耗品，重点开发有关安全限量标准中对应的农药、兽药、重要有机污染物、食品添加剂、饲料添加剂与违禁化学品、生物毒素的检测技术和相关设备，建立食品安全检测实验室质量控制规范。

(2) 发展食品中重要病原体检测技术

要重点发展对人民健康造成的威胁比较大的病原体 (如疯牛病、禽流感病、新城疫、口蹄疫和水泡性口炎等) 的检验检测技术。对于人畜共患疾病的检测技术，要予以高度关注。加快建立食源性致病菌分子分型电子网络的步伐，迅速提高对食源性致病菌的检测能力。

(3) 发展食品安全过程控制技术

根据对“从农田到餐桌”进行全程控制的要求，发展食品生产、加工、贮运、包装等各环节的安全技术，建立对食品安全进行全过程控制的技术体系。发展食品中主要污染物残留控制技术。加快发展农药残留控制技术，继续淘汰和限制高毒、高残留的农药品种。健全农药科学使用标准。加大病虫害综合防治技术的培训工作，大力推广综合防治技术，进一步提高技术到位率，逐步减少对传统农药的依赖。加快发展兽药残留控制技术，开展有关兽药残留问题的基础科学研究工作，加速高效疫苗、新型兽药研究与产业化开发，制定和颁布中国兽药检测方法标准及兽药残留限量和兽药休药期标准。

发展饲料安全质量控制技术。开发和推广安全、无污染、高效饲料品种以及安全高效、质优价廉的天然药物饲料添加剂替代品，发展饲料安全配制技术。不断改进饲料的加工工艺和设备，降低饲料中有毒成分残留。

发展食品生产、加工、贮藏、包装与运输过程中安全控制技术。在农业生产环节，推广清洁生产技术，鼓励合理使用化肥，利用生物技术和物理方法控制作物病虫害。严禁使用高毒、高残留农药，推广应用高效低毒低残留农药和生物农药，并严格遵守农药使用安全间隔期的规定。大力发展养殖业病害检测和防治技术、健康养殖技术与设备设施的研究开发。实行生产记录卡制度，禁止使用镇静、安眠类饲料添加剂和平喘、激素类药物。

(4) 大力加强食品加工技术与设备的研究开发

制定科学合理的生产工艺规范，保证生产环境和人员的卫生；保证原料清洗水的卫生质量，科学合理地使用防腐剂、色素、面团改良剂等食品添加剂，延长产品的保存期和改善感官品质。在贮运环节，研究食品贮藏过程中有害物质形成规律和采后杀菌剂、杀虫剂的变迁规律，研制安全、经济、高效的食品贮藏技术措施，开发低温冷藏设备。发展食品辐照技术，确定不同类食品最低辐照有效剂量以及相关辐照剂量参数。发展食品综合保鲜技术，研

究新型清洗剂配方、保鲜剂、保鲜纸，延长食品保藏期。大力发展农产品专贮、专运技术，研究和推广食品包装过程中的安全控制技术。进行新型、无毒、经济、受力强度适当、严密性好的包装材料的筛选、推广、应用。发展鲜切类产品可食用膜、气调包装技术。

(5) 发展食源性危害危险性评估技术与方法

在开展危险性评估的过程中，将食源性疾病相关的高危因素作为分析重点，重视针对易感人群的危险性评估。广泛使用的农药、兽药、食品添加剂以及其他危害性大的化学污染物是重点评估对象。在摸清食品中危害因素污染水平的基础上，研究暴露水平及相应的生物标志物的变化，并找出其致病性阈值。制定危险性评估标准程序，确保危险性评估结果的正确性。加强流行病学研究，通过临床和流行病学研究获得数据，并充分利用这些资料为开展危险性评估服务。加强毒理学研究，确定化学性危害对人体健康产生的不良作用。充分利用生物标志物进行危险性评估，阐明中国主要化学污染物的作用机制，给药剂量、药物作用剂量关系，药物代谢动力学和药效学。

生物因素危险性评估。对具有公共卫生意义的致病性细菌、真菌、病毒、寄生虫、原生动物及其产生的有毒物质对人体健康产生的不良作用进行科学评估。微生物污染是影响中国食品安全的最主要因素，其中致病性细菌对食品安全构成的危害最显著，应当作为重点分析对象，确定其对不同人群和个体的致病剂量。重点进行人群暴露与健康效应的定量评估以及涉及食品安全突发性事件的危险性评估。

思 考 题

1. 环境污染如何影响食品安全？
2. 食品安全、食品质量、食品卫生三个概念有何不同？
3. 我国食品安全监督管理存在哪些问题？
4. 简述未来食品安全技术领域研究的主要内容。

2 环境污染对食品安全性的影响

主要内容简介：环境各个要素的污染都会最终影响农产品及食品的质量，本章重点介绍了大气污染、水污染、土壤污染的基本特征以及对食品安全性的影响，同时对辐照食品的安全与放射性污染的问题进行了论述。

2.1 大气污染对食品安全的影响

大气污染 (air pollution) 是指人类活动向大气排放的污染物或由它转化成的二次污染物在大气中的浓度达到有害程度的现象。人类自从用煤作燃料以后，大气污染的现象就存在了。大气污染物的种类很多，其理化性质非常复杂，毒性也各不相同，主要来源为矿物燃料（如煤和石油等）燃烧和工业生产。大气污染物对农作物的危害种类也很多，如 SO_2 、 NO_x 、 Cl_2 、 HCl 、酸雨、氧化剂、氟化物、汽车尾气、粉尘等。长期暴露在污染空气中的动植物，由于其体内外污染物增多，可造成其生长发育不良或受阻，甚至发病或死亡。人类食物都直接或间接来自动植物，大气污染也会影响食品的安全性。

2.1.1 大气主要污染物及来源

2.1.1.1 大气 SO_2 污染的来源

二氧化硫 (sulfur dioxide) 作为一种常见的空气污染物来说，二氧化硫比任何其他化合物的历史更悠久。大气中二氧化硫的来源有天然来源和人工来源两个， SO_2 有四类天然排放源：海洋雾沫，它们会夹带一些硫酸到空中；土壤中某些有机体，如动物死尸和植物枯枝在细菌作用下可分解产生某些硫化物，继而转化为 SO_2 ；火山爆发，也将喷出可观量的 SO_2 气体；雷电和干热引起的森林火灾也是一种天然 SO_2 排放源，因为树木也含有微量硫。据统计，陆地天然来源的硫总量为 $500 \times 10^4 \text{t}$ (F. A. Record, 1982)，约占全球排放量的 1/3 (另 2/3 是人为排放)。 SO_2 的人工排放源主要是矿石燃料、煤、油的燃烧，有色金属冶炼、硫酸厂等。根据卡利斯 (Cullis) 等 1980 年发表的估算数据，地球上全年由人为污染源向大气排放的 SO_2 量见表 2-1。

表 2-1 地球全年 SO_2 的发生量 (Cullis 等, 1980)

发 生 源	发生量/ $\times 10^6 \text{t}$	发 生 源	发生量/ $\times 10^6 \text{t}$
煤燃烧	62	有色金属冶炼	10.7
石油燃烧	25.5	从工厂发生的硫氧化物	1.9
石油冶炼	3.7	人为污染源排放的 SO_2 总量	103.8

由表 2-1 可以看出，地球全年 SO_2 的产生量高达 $1.0 \times 10^8 \text{t}$ 之多，且煤燃烧和石油燃烧 SO_2 的产生量为 $87.5 \times 10^6 \text{t}$ ，占人为排放量的 84.3%，因此使用低硫燃料，就能大大减少 SO_2 的排放量。

自 20 世纪 70 年代以来，全球 SO₂ 的产生量平均每年以 5% 的速率递增，到 20 世纪末超过 3.7×10⁸t。据统计，1995 年我国 SO₂ 的发生量为 2.370×10⁷t，居全世界第一位（林肇信等，1999）。

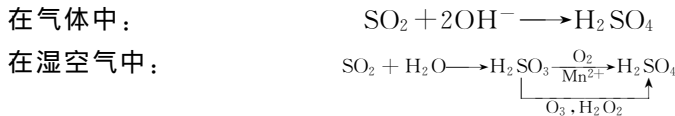
2.1.1.2 酸雨的来源

酸雨（acid rain）具有很大的破坏力，它会使土壤的酸性增强，导致大量农作物与牧草枯死；它会破坏森林生态系统，使林木生长缓慢，森林大面积死亡；它还使河湖水酸化，鱼虾大量死亡，农作物减产、可食部分重金属含量增加。还会损害人体呼吸系统及皮肤，刺激眼睛，严重影响人体健康。因此，研究酸雨对植物、土壤、生态系统、人、建筑物等的危害及其机理是非常重要的。

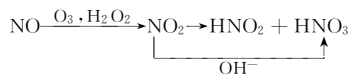
对于酸雨量化的定义是由德国科学家 Junge 于 1962 年提出。他考虑了自然界大气中在 10℃ 时存在的 CO₂ 浓度约为 1.34×10⁻⁵ mol/L，当它和雨水充分接触达到平衡时，雨水的 pH 值约为 5.6。有了这一定义之后，人们常用 pH=5.6 的降水作为划分酸雨的界限，即 pH<5.6 的雨为酸雨。当然这个定义的科学性与合理性，随着科学技术的发展，人们对环境认识的不断深入，还有待进一步考究。

酸雨是由大气污染而造成的，酸雨中含有多种无机酸和有机酸，其中绝大部分是硫酸和硝酸。多数情况下，以硫酸为主，根据世界各地酸雨成分分析发现，酸雨中 90% 以上是 H₂SO₄ 和 HNO₃，尤以 H₂SO₄ 含量更高，这说明从污染源排放出来的 SO₂ 和 NO_x 是形成酸雨的主要起始物。

酸雨的形成是一个十分复杂的过程，目前有些细节尚无定论。从化学角度来看，大气中酸性物质增加或碱性物质减少均可导致降水酸化。其形成过程为



NO_x 在大气和湿空气中转化为 HNO₃ 的反应式为



由此可见，酸雨的形成以及酸度的大小直接与大气中 SO₂ 和 NO_x 的含量有关，因此 SO₂ 和 NO_x 的含量是大气污染程度的两项重要指标，SO₂ 和 NO_x 主要排放源是城市中的火力发电厂、炼油厂等工厂，城市供热以及汽车等交通工具。因此，控制污染气体的排放是预防酸雨的根本途径。

除此之外，大气中还有许多气态或固态物质对降水的 pH 值也会有影响。石灰中的氧化钙，土壤中的碳酸钙，天然和人为来源的 NH₃ 以及其他碱性物质都可使降水中的酸中和，对酸性降水起缓冲作用。酸雨中关键性离子组分是 SO₄²⁻、Ca²⁺ 和 NH₃，作为酸指标是 SO₄²⁻，其来源主要是燃烧排放的 SO₂，作为碱指标的是 Ca²⁺ 和 NH₃。既有人为来源，也有天然来源，一般天然来源是主要的，这也可以在一定程度上解释酸雨区域分布的原因。

2.1.1.3 大气氟化物污染的来源

氟化物（fluorid）包括氟化氢（HF）、氟化硅（SiF₄）、氟硅酸（HSiF₆）、氟化钙（CaF₂）微粒等，HF 是常见的危害植物生长的污染物。

引起大气污染的氟化物，主要来自砖瓦、水泥、陶瓷、磷肥、电解铝、含氟药物、农药、塑料、橡胶、冷冻剂的制造、加工行业，另外，燃烧煤炭产生的烟气中也含有大量的氟

化物。砖瓦厂排放的氟化物，主要来自以土壤原料——砖坯。高温灼烧，可使土壤中较稳定的氟化物转变为气态氟化氢和四氟化硅，并从烟道排放到大气中。一般黏土的含氟量为400mg/kg左右。在实验室模拟条件下，1000℃时，黏土的排氟率为81.3%。氟化物排放的起始温度因土壤种类而异，约在500~600℃，此后随温度增高排氟量相应增加。砖厂实际生产时在砖瓦窑温度下排氟率为70%~95%，大多为85%~95%。分布广泛的砖厂，是农村大气氟化物污染的主要根源。

2.1.1.4 大气氯化物污染的来源

大气中氯化物(chlorid)污染主要是氯气的污染。大气中的氯气浓度很低，只有在化工厂、电化厂、农药厂、塑料厂、玻璃厂、冶炼厂、自来水净化厂等发生泄漏时，氯气才会造成植物急性危害。

2.1.1.5 大气粉尘和金属飘尘的来源

爆炸、粉末状物质的混合、过筛、包装、搬运等均可产生粉尘。沉积于工作环境的降尘由于振动或气流的影响，重又悬浮于空气中成为二次扬尘，也是粉尘的颗粒来源之一。煤的燃烧也可产生烟尘，烟尘由炭黑颗粒、煤粒和飞灰组成，粒径一般在0.05~10 μm 之间。燃烧条件不同，产生的烟尘量不同，一般每吨煤大约产生4~28kg的烟尘。烟尘产生于冶炼厂、钢铁厂、焦化厂和供热锅炉等烟囱附近，常以污染源为中心扩大到周围几百亩地区或下风向发展到几公里的区域。金属飘尘的粒径小于10 μm ，能长时间飘浮空中。随着工业的发展，排入大气的许多金属微粒如铅、镉、铬、锌、镍、砷和汞等金属飘尘的毒性较大，这些微粒可沉积或随雨雪下降到地面。有些低沸点重金属，冶炼中很容易挥发进入大气，如锡等。炼锌厂的废气中含有镉。

2.1.2 常见大气污染物对食品质量及安全性的影响

2.1.2.1 SO₂ 污染对农作物的影响

(1) SO₂ 污染对农作物生长的影响

二氧化硫是我国大气污染中的主要污染物，随着我国经济的迅速发展，以煤为主要能源的消耗量不断增加，使大气中SO₂浓度持续增加，因而对农业生态环境造成了严重的危害。(冯宗炜等，1999)采用田间开顶式熏气装置，以油菜、菜豆、番茄、胡萝卜、大豆、棉花、小麦、大麦、水稻为供试农作物，设对照、50 $\mu\text{L}/\text{m}^3$ 、100 $\mu\text{L}/\text{m}^3$ 、150 $\mu\text{L}/\text{m}^3$ 、250 $\mu\text{L}/\text{m}^3$ ，共5个处理。进行实验研究，得出以下结果。

观察油菜相对生长速率RGR的变化，可以得知，SO₂降低了油菜的RGR。在整个生长期中，各SO₂处理组的RGR始终低于对照组，在实验开始后3周内，降低幅度明显大于第4周和第5周，说明SO₂对幼龄油菜RGR的影响大于成龄和老龄。NAR小于对照组，在前3周内，SO₂对油菜静同化率NAR的降低作用大于后2周。相比较而言，SO₂暴露对油菜NAR的影响不如酸性降水明显。在SO₂作用下，菜豆的干物质积累，叶面积和株高增长均受到明显的抑制，随SO₂浓度增加而减少。在相同SO₂浓度下，不同生长量指标受影响程度有很大差异。对照减少的百分率看，对根系的影响最大，对叶子物重积累的影响大于叶面积增长的影响，对茎干物质积累的影响大于植株高度(茎伸长生长)的影响。SO₂对番茄、胡萝卜苗期生物量的影响是十分明显的，生物量随SO₂浓度的增加而降低。在低浓度SO₂(50 $\mu\text{L}/\text{m}^3$)作用下，番茄的生物量比对照下降了20%($P<0.01$)。

SO₂对大豆干物质积累，叶面积和株高增长以及棉花生物量均有明显的抑制作用。随着

SO₂ 浓度增加, 大豆和棉花的生长量呈下降趋势。与对照相比, 在 50 μ L/m³ SO₂ 处理下, 大豆叶面积、株高和生物量分别下降 15%、28%和 15%, 差异显著 ($P < 0.05$)。棉花的生物量下降 21%。

在生长初期, SO₂ 刺激了大麦的 RGR, 而进入生长中期和后期, 50 μ L/m³ 的 SO₂ 暴露组的 RGR 与对照相近或略高于对照; 其他各组的 RGR 则低于对照组, 且以 100 μ L/m³ SO₂ 的暴露对大麦 RGR 的抑制作用表现最严重。SO₂ 单一暴露并未改变大麦体内光合作用产物分配模式, 仍为籽实 > 茎叶 > 根部。但分配比率有所改变, 表现在籽实部分比率增大, 分别比对照提高了 3%~7%; 而根部比率降低, 约低于对照 4%~10%。另外, 随着 SO₂ 单一暴露浓度的加大, 大麦根部的干物质绝对重 (R_w) 亦呈逐渐下降之趋势。低浓度 SO₂ 长期暴露对水稻、小麦生长量的影响研究表明, 小麦对 SO₂ 反应敏感, 株高、叶面积和生物量随 SO₂ 浓度增加而降低, 而水稻的生长量测定指标, 处理间变化无规律, 差异不显著。

(2) SO₂ 污染对农作物产量和品质的影响

对于农作物来说不同的作物其产量和品质构成因子是不一样的, 如蔬菜分叶菜、根菜、瓜果等, 油菜、大豆等经济作物产量构成因子主要有结荚率、每荚粒数、百粒重或千粒重, 而小麦、水稻等粮食作物产量构成因子主要为每亩穗数、每穗粒数、千粒重等。品质的构成因子主要有淀粉含量、蛋白质含量、含糖量、出油率、粗纤维含量等。

① 对产量的影响 SO₂ 的污染对油菜、菜豆、番茄和胡萝卜产量影响很大, SO₂ 可造成严重减产。随着 SO₂ 浓度的增加, 减产幅度呈逐渐增大的趋势。与对照相比, 50 μ L/m³ SO₂ 作用下, 油菜、菜豆、番茄和胡萝卜分别减产 9%、11%、9%和 9%。暴露在 150 μ L/m³ SO₂ 下的四种蔬菜, 减产幅度在 22%~30%。由此表明, SO₂ 污染可造成蔬菜大幅度的减产。不同 SO₂ 浓度暴露下对菜豆影响顺序为每株有效结荚数、单荚长度、单荚鲜重。相关分析结果指出, 在三要素中, 与产量相关最密切的是有效结荚数, 相关系数 $r = 0.99$, 其次是单荚长度和单荚鲜重, 分别为 0.97 和 0.85, SO₂ 对菜豆产量的影响主要是减少了菜豆的结荚数所致, 其原因可能是 SO₂ 损害了菜豆的生殖过程。

在 SO₂ 暴露下, 对大豆和棉花皮棉的产量的影响表现为: 低浓度 SO₂ 长期暴露造成大豆和棉花皮棉产量明显降低, 减产幅度随 SO₂ 浓度升高而增大, 两者之间呈显著负相关, 相关系数 $r = -0.93$, 在 100 μ L/m³ SO₂ 处理下, 大豆和棉花皮棉分别减产 9%和 10%。250 μ L/m³ SO₂ 处理下, 减产幅度分别增至 20%和 18%。对大豆产量的影响以每株有效结荚数为最大, 其次是籽粒百粒重。有效结荚数和籽粒百粒重与 SO₂ 暴露浓度之间存在明显的负相关, SO₂ 对大豆产量影响主要是减少有效结荚数所致, 其机理可能与菜豆相同。

大麦、小麦和水稻在 SO₂ 污染下的产量均受到一定程度的影响, 并呈现出随 SO₂ 浓度增加而产量逐渐下降的趋势。在 50 μ L/m³ SO₂ 作用下, 大麦减产 11%, 而小麦和水稻不减产, 在 100 μ L/m³ SO₂ 处理下小麦和水稻呈现出减产趋势。主要是对穗粒数的影响比较明显, 穗粒数随 SO₂ 浓度的增加而减少。相关分析表明, 在小麦产量构成的因子中, 与产量相关最密切的是穗粒数, 相关系数 $r = 0.95$, 相关显著 ($P < 0.05$)。因此, SO₂ 引起小麦减产主要是由于减少了结实造成的, 说明 SO₂ 对禾谷类作物受精结实有一定的影响。

② SO₂ 污染对农作物品质的影响

i. 对游离氨基酸的影响。对小麦进行的三次游离氨基酸含量测定结果表明, 在实验开始时, 所有 SO₂ 处理组的游离氨基酸含量均低于对照, 而经过一段时间的暴露处理后, 所有 SO₂ 处理组的游离氨基酸含量反而明显高于对照。通过比较同一处理下的三次测定结果,

还可看出在 SO_2 暴露下，叶片游离氨基酸含量的变化趋势多为由低向高，明显有别于对照的由高向低的变化模式。

对菜豆游离脯氨酸含量的测定结果与小麦相一致。亦与 SO_2 浓度呈正相关。对照组的脯氨酸含量为 0.420mg/g 鲜重，在 $100\mu\text{L}/\text{m}^3$ 和 $250\mu\text{L}/\text{m}^3$ 的 SO_2 下暴露 3 周后，脯氨酸分别升高了 10.48% 和 26.67% ，达到 0.465mg/g 鲜重和 0.532mg/g 鲜重。

ii. 对叶片含糖量的影响。 SO_2 对作物叶片含糖量的影响因作物而异。 SO_2 对油菜叶片含糖量的影响表现为随 SO_2 浓度增加，含糖量开始呈上升趋势，在 $150\mu\text{L}/\text{m}^3$ 的 SO_2 浓度下，达到顶点，为 1.903% ；随后迅速下降，低于对照 1.225% 。在其他实验组合中，当降水酸度相同时，均以 $150\mu\text{L}/\text{m}^3$ SO_2 的暴露组的含糖量最高， $250\mu\text{L}/\text{m}^3$ SO_2 的暴露组合含糖量最低。说明 $150\mu\text{L}/\text{m}^3$ SO_2 可能是刺激增加油菜含糖量的最高浓度。若 SO_2 高于 $150\mu\text{L}/\text{m}^3$ ，油菜叶片的含糖量将出现大幅度的减少。

大豆的测定结果表明 SO_2 暴露与否及 SO_2 浓度的高低对叶片含糖量均未具有统计学意义上的明显影响 ($P>0.05$)。除少数处理组外，暴露下的叶片含糖量多低于对照。但与油菜结果相似，在相同 pH 值的模拟酸雨处理下，大豆叶片含糖量亦呈随 SO_2 浓度加大而回升的趋势（有些处理组合含糖量可超过对照），直至 SO_2 升至 $150\mu\text{L}/\text{m}^3$ 时。随后，大豆叶片含糖量再次出现下降。

2.1.2.2 酸雨对农作物的影响

酸雨通过两种途径影响农作物，一种是直接接触植物的营养器官和繁殖器官，影响其生长和生产力；另一种是逐渐影响土壤，改变其物理、化学和生物学性质，经过较长的时期使土壤肥力降低，从而间接影响农作物的生长和生产力。衡量农作物生长的指标主要有相对生长速率 (RGR)、净同化率 (NAR)、叶面积、株高、生物量（或干物质重）和生育期等。

关于酸雨对农作物生长的直接影响，近年来国内外进行了大量的模拟试验。冯宗炜等 (1999) 报道，对模拟酸雨条件下油菜、菜豆、胡萝卜、白菜、萝卜、大豆、棉花、小麦、水稻、大麦等作物生长情况的研究。结果表明模拟酸雨对油菜 RGR 的影响主要表现在生长前期。在试验开始后的 2 周内，模拟酸雨处理组的相对生长速率低于对照组 (pH=5.6)。第 3 周后，不同处理的 RGR 之间无明显差异。在前 2 周内，模拟酸雨暴露引起油菜 NAR 的下降，下降幅度约 $5\%\sim 46\%$ 。到第 3 周和第 4 周内，各暴露组的 NAR 仍分别低于对照组 $7.3\%\sim 20.2\%$ 。白菜在 pH3.5 的酸雨处理植株生长受到抑制，株高、叶面积和干物质重均明显低于对照 (曹洪发等, 1989)。萝卜在 pH3.5 开始，干物质的积累受阻，其生物量比对照低。模拟酸雨有刺激菜豆株高增高的现象，在模拟酸雨处理第 2 周后，各处理组的株高均大于对照组，在试验中还观察到模拟酸雨使菜豆现蕾期推迟的现象 (冯宗炜等, 1999)。

大豆在 pH=3.0 酸雨作用下，株高、叶面积相干物重等指标显示出与对照有显著差异，表现出植株矮、叶面积减小、干物质积累少 (曹洪发等, 1989)。但 (冯宗炜等, 1999) 模拟酸雨处理下大豆和花生均变化不大，即使在 pH 值为 2.8 的酸雨作用下，调查的各项生长指标，与对照相比无显著差异，说明模拟酸雨对花生、大豆的株高、叶面积和生物量等没有明显影响。棉花在苗期对模拟酸雨反应敏感，在模拟酸雨处理后第 5 周调查，pH=4.6 处理的生物量呈现出与对照有显著差异 ($P>0.01$)，生物量随降水酸度增加而减少。随着暴露时间的延长，与对照之间的差别减少。

小麦在 pH=3.0 酸雨作用下，株高、叶面积和干物质重等指标显示出与对照有显著差异。小麦苗期在酸雨作用下，其生长有所抑制，表现出植株矮、叶面积小、干物质积累少。

但在拔节后与对照生长量的差别就逐步消失，水稻各处理变化均不大，即使在 $\text{pH}=2.5$ 的酸雨处理下，调查的株高、叶面积，经统计检验与对照无显著差异 ($P>0.05$)，说明水稻生长对模拟酸雨抗性较强，不易受影响（曹洪发等，1989）。对于大麦在生长前期，模拟酸雨刺激了大麦的相对生长速率，而进入生长中期之后，模拟酸雨对大麦的 RGR 影响，多表现为抑制作用，特别是到了收获期，出现 RGR 随 pH 值的下降而降低的趋势。而模拟酸雨引起大麦株高变高，在处理第 2 周后，降水酸度低于 $\text{pH}=4.6$ 的各组大麦株高均大于对照组。 $\text{pH}=4.1$ 和 $\text{pH}=3.6$ 的模拟酸雨暴露组的大麦株高最高，与对照相比，约增加了 10%~20%；而 $\text{pH}=2.8$ 的模拟酸雨，对大麦株高的刺激作用有所减弱，该暴露组的大麦株高明显低于 $\text{pH}=4.1$ 和 $\text{pH}=3.6$ 暴露组，但仍高于对照组。同时模拟酸雨造成大麦分蘖率下降。 $\text{pH}=4.6$ 的模拟酸雨使大麦分蘖率下降 7.16%，而低于 $\text{pH}=4.1$ 的模拟酸雨则使大麦分蘖减少了 20.16%~22.63%。模拟酸雨降低了大麦的结穗率。与对照相比 $\text{pH}=4.6$ 至 $\text{pH}=2.8$ 的模拟酸雨降低了 0.74%~6.53%（冯宗炜，1999）。

总体来说。从衡量农作物生长的各项指标来看，酸雨对农作物的生长有抑制作用，但不同的作物对酸雨的抗性又不一样，且随着时间的延长，对酸雨的抗性有增强的趋势。虽然对于大麦酸雨能刺激其株高增高，但能抑制大麦的 RGR、分蘖数和结实率。

(1) 酸雨对农作物产量的影响

陈玉谷等进行了模拟酸雨对油菜生长影响的试验研究，结果表明，油菜花期对酸雨比较敏感，模拟酸雨对油菜开花、授粉、结荚有一定的影响，从而影响单株角果数、每荚粒数、千粒重等。冯宗炜等（1999）的研究结果表明，模拟酸雨降低了油菜、菜豆、胡萝卜和番茄的产量，随着降水酸度的增加，其油菜、菜豆、胡萝卜和番茄的产量逐渐下降。由此说明，模拟酸雨对产量的影响是明显的。酸雨的 pH 值不同，对农作物的影响程度也不一样。 pH 值为 3.5 的酸雨就明显地影响小麦和白菜的产量， pH 值为 3.0 的酸雨才使大豆产量减产， pH 值为 2.0 的酸雨对水稻产量不受影响。尽管水稻在试验期间接受的酸雨量最多，但产量几乎不受影响，反映出不同种类的农作物的差异性，这可能与农作物种类之间的生物学特性不同有关。就同一种农作物而言，产量降低的程度因雨水的酸度不同而有差异，酸度越高，产量降低的幅度越大。如小麦产量随酸雨 pH 值的降低而递减，大豆和白菜也有相同的趋势。酸雨可影响到大豆产量是因为主要影响大豆的百粒重，不同 pH 值各处理之间每株荚数变化不大，各株间籽粒数差异也没有明显变化，而百粒重随 pH 值的降低而降低，大豆产量与籽粒重之间呈高度相关。试验研究结果与 Evans 的研究结果有相似之处。酸雨对小麦产量的影响和大豆大致相同，主要表现在穗数、每穗粒数和粒重 3 个因子上，尤其对粒重影响显著。籽粒重随 pH 值降低而减少，两者之间呈显著相关 ($r=0.96$)。不同 pH 值的酸雨，对每穗粒数也有明显影响。Evans 等发现，植物在开花受粉期对酸雨的敏感性大于其他生育期，降水中酸雨浓度可影响受粉结实，说明酸雨胁迫因子，当酸雨浓度达到一定值时，就能造成结实率下降，每穗粒数减少。

(2) 酸雨对农作物品质的影响

模拟酸雨对番茄营养成分有一定影响，维生素 C 和蔗糖含量下降，还原糖、总糖和酸分有增加的趋势。其中维生素 C 降低较为明显，单从维生素 C 指标看，模拟酸雨可使番茄品质变劣（冯宗炜等，1999）。从油菜籽品质分析结果表明，模拟酸雨盆栽试验各级处理中，无论从含油量或脂肪酸组成看，它们之间的差异不明显，说明酸雨对油菜籽品质没有什么影响（陈玉谷等，1989）。不同 pH 值的模拟酸雨处理对大豆籽粒的蛋白质和脂肪含量两项主