

全国“粮食工程”专业系列规划教材

粮食质量安全学

马 莺 崔 杰 主编

11-43



科学出版社
www.sciencep.com

全国“粮食工程”专业系列规划教材

粮食质量安全学

马 莺 崔 杰 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

“粮食质量安全学”是粮食工程专业一门重要的专业基础课。本书是根据该专业的教学特点,并参考了食品安全学教学要求而编写的。全书共分6章,重点论述了粮食作物种植、粮食储藏、粮食加工等过程对粮食及粮食制品安全性的潜在影响及其控制因素,论述了粮食生产和加工过程中的质量控制体系、粮食和粮食制品质量安全控制技术以及食品安全监测与预警的基本知识。

本书既可作为粮油工程及相关专业本科生的教材,也可作为从事粮食生产、加工方面专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

粮食质量安全学/马莺,崔杰主编. —北京:科学出版社,2010.8

(全国“粮食工程”专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-028762-5

I. 粮… II. ①马…②崔… III. 粮食-质量管理-高等学校-教材
IV. F326.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第165322号

责任编辑:王国栋 席慧 吴美丽 孙青 / 责任校对:张怡君

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年8月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—2 500 字数:380 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

全国“粮食工程”专业系列规划教材编写委员会

顾 问 殷涌光 (吉林大学)
夏文水 (江南大学)
刘静波 (吉林大学)
李里特 (中国农业大学)
杨同舟 (东北农业大学)

主 任 江连洲 (东北农业大学)

副主任 王兴国 (江南大学)
李新华 (沈阳农业大学)
石彦国 (哈尔滨商业大学)

委 员 (按姓氏笔画排序)

于国萍 于殿宇 马 莺 马 涛
肖志刚 张秀玲 张 敏 周凤英
周慧秋 郭顺堂 程建军 翟爱华

《粮食质量安全学》编写人员

主 编 马 莺 崔 杰

副 主 编 汤华成 李志军 李 良

参编人员 (按姓氏笔画排序)

井 晶 张 华 李 琳 张英春

杨 鑫 徐伟丽 崔艳华 董爱军

前 言

粮食与食品的安全保障是我国发展的基本问题，由于粮食质量安全问题的产生和形成有着深刻的经济、社会与道德根源，所以，解决这一问题对保证人民群众的身体健康和社会的稳定具有重要的意义。

“粮食安全”（food security）是指粮食的供应是否充足、稳定以及所有的人是否都能获得满足生活和发展所必需的粮食。为此联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization, FAO）将粮食安全定义为“保障任何人在任何时候都能得到为了生存和健康所需要的足够食品”。此定义进一步丰富了粮食安全的内涵，粮食安全主要包括三个方面：粮食数量安全、粮食质量安全和粮食来源的可持续性安全。粮食数量安全是从数量的角度要求粮食的供应、需求和购买力三者平衡，强调的是人类的基本生存权利；粮食质量安全则要求粮食的营养结构合理、优质卫生、健康安全，强调的是人类维持健康生活的权利；粮食来源的可持续性安全要求粮食的获得要注重生态环境的良好保护和资源利用的可持续性，强调的是资源、环境和生态的可持续性，是更高层次的安全问题。

粮食质量安全是指一个单位范畴（国家、地区、企业或家庭）从生产或提供的粮食制品中获得营养充足、卫生安全的食物以满足其正常生理和心理需要。粮食质量安全包括食用品质、营养品质、卫生指标、感官品质和储藏品质等方面。因此，本书侧重点为整个粮食生产和加工环节中的质量安全问题。

一般来讲，安全的粮食产品大致可分为三个层次，即无公害粮食产品、绿色粮食产品和有机粮食产品。有机粮食产品在生产加工过程中绝对禁止使用农药、化肥、激素等人工合成物质，并且不允许使用基因工程技术。有机粮食产品要求最高，生产难度最大；绿色粮食产品次之，是中间过渡类型；无公害粮食产品则是一种基本要求，普通粮食产品都应该达到这一要求。

由此可见，安全粮食就是指长期食用不会给身体带来危害的粮食。提高粮食安全性的目的，就是要降低粮食对人体危害的风险。粮食安全性是各国政府都在努力追求的发展目标。粮食安全性问题发展到今天，已远远超出传统的粮食卫生或粮食污染的范围，而成为关联整个食物链的问题。

影响粮食质量安全的因素有很多，按照性质大致可分为化学性危害、物理性危害和生物性危害。化学性危害是指粮食作物在种植中滥用农药、化肥、催熟剂等，粮食生产加工过程中不适当使用添加剂以及食品包装容器和工业废弃物的污染；物理性危害是指粮食在生长、收割、晾晒、加工、储藏、运输、销售过程中混入物理杂质，如杂草的种子、麦秆、泥土、砂石、金属碎屑等而影响粮食的品质和质量安全；生物性危害是指粮食从农田到餐桌过程中的微生物污染，如食源性细菌病原体、食源性病毒、食源性寄生虫等。按照危害产生的途径，影响粮食质量安全的因素存在于从种植到消费的各个环

节,包括种植环节、加工环节、储藏环节、运输环节、销售环节和监管环节等。在每个环节、每个过程中都可能发生化学性危害、物理性危害或生物性危害。

提高粮食质量安全性要从以下几个方面采取措施。一是在粮食生产和加工管理上要完善粮油农产品质量分级立法、行政管理、标准制定、认证认可、监督检查,推行科学的质量管理方法、检验方法和先进技术,不断提高粮食质量管理和检测水平是保障粮食质量安全的重要手段之一。二是在农业种植上首先要加强农业环境保护,从源头上确保粮食质量安全;其次粮食成熟后应及时收获,避免粮食收获后发生发芽、发热、霉变等不良结果造成粮食的食用品质降低。三是加强粮食在储藏期间和加工运输期间的质量安全管理。四是提高农民生产的组织化程度,按标准化进行生产,提高生产规模和质量;严格按照有关法律、法规的规定,进一步统一市场准入的质量标准,保证市场准入标准的统一性、科学性;以与国际接轨为目标,结合国情建立统一、规范的认证体系;完善标识制度,对进入市场的粮食除了要标明商标、名称、等级、出厂日期外,还要标明产地、农药肥料名称及用量和次数、收获日期、重金属含量、转基因标识等。五是应按照从生产到销售的每一个环节均可相互追查的原则,建立粮食生产、经营记录制度,实现粮食质量安全的可追溯并建立承诺制度;完善信息发布制度,增强质量安全意识,提高中国粮食市场的诚信度。

粮食质量安全涉及整个粮食生产、加工、销售链条中的质量安全隐患和质量控制问题,涉及种植业、农药、化肥、环境污染及控制、粮食储运、食品安全学、毒理学等多学科领域。由于目前国内外尚无粮食质量安全学方面的专著和教材可借鉴,本书编者在参考了国内外文献的基础上将上述相关知识融会贯通,形成了具有粮食质量安全课程特色的教材体系,希望本书对粮食工程专业的粮食质量安全教学有一定的帮助。

最后感谢全国“粮食工程”专业系列规划教材指导委员会对本书大纲制定给予的指导和帮助;感谢科学出版社高等教育出版中心农林与生命科学分社在本书的出版过程中所做的大量细致的工作。

本书由马莺和崔杰担任主编,汤华成、李志军和李良担任副主编,全书分别由首都医科大学李志军、黑龙江八一农垦大学汤华成、东北农业大学李良、哈尔滨工业大学马莺、崔杰、井晶、李琳、张华、张英春、杨鑫、徐伟丽、崔艳华和董爱军编写,各位编者在编写过程中付出了大量心血,在此特表示衷心的感谢。

限于编者的能力和水平,书中不足之处,敬请同行和读者批评指正。

马 莺

2010年6月26日于哈尔滨

目 录

前言

第一章 农业生产过程中的粮食安全性	1
第一节 环境污染对粮食作物的影响及危害	1
一、环境污染物	1
二、环境污染物对粮食作物生长的影响及潜在的危害	3
第二节 农药和化肥过量施用对粮食作物安全性的影响	12
一、农药过量施用的危害	12
二、化肥过量施用的危害	16
三、农药污染和化肥污染的控制	18
第三节 农业生产过程控制	19
一、农业生产过程中环境因素的控制	19
二、粮食作物品种选配	20
三、栽培技术	21
四、田间管理	24
第四节 转基因粮食作物的安全性分析	25
一、转基因作物概述	25
二、转基因粮食作物潜在的安全性问题	27
第五节 农业生产过程中的安全性评价	29
一、评价体系	29
二、评价内容	30
三、评价方法	33
思考题	38
第二章 粮食储藏过程中的安全性评价	39
第一节 储粮害虫的防治及其安全性评价	39
一、储粮害虫	39
二、害虫防治	42
三、电离辐射的安全性	47
四、储粮保护剂的安全性	50
五、储粮熏蒸剂的安全性	53
六、生物杀虫剂的安全性	57
第二节 粮食微生物的安全性	62
一、微生物对粮食品质的影响	62
二、粮食中的霉菌毒素	64

第三节 陈化粮的安全性	72
一、陈化粮的特性	72
二、陈化粮的安全隐患及检测	74
思考题	76
第三章 粮食加工过程中的安全性评价	77
第一节 生产过程对粮食产品安全性的影响	77
一、粮食加工过程中空气污染的控制	77
二、粮食加工过程中水污染的控制	78
三、粮食加工过程中重金属污染的控制	80
四、粮食加工过程中的品质控制	81
第二节 添加剂对粮食及其制品安全性的影响	85
一、粮食及制品中常用的添加剂	85
二、粮食制品中部分添加剂的安全性隐患	92
三、食品添加剂使用规范	100
第三节 粮食包装材料的污染	101
一、包装材料的安全性	101
二、纸质包装材料	104
三、塑料包装材料	109
思考题	122
第四章 粮食安全质量体系	123
第一节 食品安全管理	123
一、良好操作规范	123
二、卫生标准操作程序	126
三、危害分析与关键控制点	134
第二节 食品质量管理体系	140
一、ISO9000 质量管理体系	140
二、ISO22000: 2005 食品安全管理体系	143
第三节 无公害食品、绿色食品、有机食品	144
一、无公害食品	144
二、绿色食品	146
三、有机食品	149
思考题	152
第五章 粮食质量安全控制技术	153
第一节 粮食仓储害虫的检测	153
一、直观检测法	153
二、取样检测法	153
三、诱集检测法	156
四、其他检测法	157

第二节 粮食中微生物的检测	158
一、常规检测方法	158
二、快速检测方法	159
第三节 粮食中农药残留量的检测	163
一、农药残留检测中的样品前处理技术	163
二、农药残留的化学检测方法	172
三、农药残留的生物化学检测方法	174
四、农药残留的生物检测方法	175
五、农药残留的仪器分析检测方法	180
第四节 粮食中真菌毒素的检测	184
一、黄曲霉毒素的检测	184
二、赭曲霉毒素 A 的检测	189
三、伏马菌素的检测	191
四、玉米赤霉烯酮的检测	194
五、T-2 毒素的检测	196
六、呕吐毒素的检测	198
第五节 粮食中有毒有害物质的检测	200
一、粮食中重金属的检测	200
二、粮食辐照残留的检测	203
三、粮食中添加剂残留及违禁添加剂的检测	208
四、粮食中熏蒸剂残留的检测	211
五、粮食包装材料、容器有毒迁移物的检测	213
第六节 转基因粮食的检测	217
一、免疫化学检测技术	217
二、PCR 检测方法	219
三、生物传感器和基因芯片	221
思考题	222
第六章 食品安全监测与预警	223
第一节 食品安全综合评价的理论与方法	223
一、食品安全状态的综合评价理论	223
二、食品安全状态的评价指标体系	224
三、安全评价方法	230
第二节 食品安全状态监测	230
一、基于模糊数学的食品安全状态监测	231
二、基于神经网络的食品安全状态监测	231
三、基于支持向量机的食品安全状态监测	232
第三节 食品安全的预警及快速反应方法	233
一、针对从疫区及污染地区进口食品的风险预警——A 类预警	233

二、病原微生物、禁用物质类危害物的风险预警——B类预警	234
三、限量类危害物的风险预警——C类预警	237
四、危害物施检频率预警——D类预警	242
第四节 食品安全动态监测方法	245
一、概述	245
二、动态监测方法	245
思考题	249
主要参考文献	250

第一章 农业生产过程中的粮食安全性

本章要点：本章重点介绍了大气污染、水体污染、土壤污染、农药和化肥的过量施用对粮食作物安全的影响；对转基因粮食作物潜在安全性进行了分析；并对农业生产过程控制以及安全性评价方法进行了论述。

粮食作物一般是谷类作物（包括稻谷、小麦、大麦、燕麦、玉米、谷子、高粱等）、薯类作物（包括甘薯、马铃薯、木薯等）和豆类作物（包括大豆、蚕豆、豌豆、绿豆、小豆等）的统称。粮食作物不仅为人类提供食粮和某些副食品，以维持生命的需要，还为食品工业提供原料，为畜牧业提供精饲料和大部分粗饲料。因此，在粮食生产过程中保证粮食食品的安全性至关重要。

第一节 环境污染对粮食作物的影响及危害

一、环境污染

（一）大气污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程排入大气并对人类或环境产生有害影响的那些物质。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，主要包括工业废气，即气体状态污染物（包括二氧化硫、氮氧化物、氟化物、一氧化碳、汽车尾气、酸雨等）和气溶胶状态污染物（包括雾、烟、尘等）两大类。这些污染物的主要来源为矿物质燃烧、工业生产、机动车运行、自然生态破坏及二次污染等。

1. 工业废气

随着工业的迅速发展，工业生产过程中排放的工艺尾气也在迅速增加。工艺尾气随着最终产品、原材料使用、生产工艺、操作管理水平等因素的不同而有很大的区别，这种区别主要表现在排空物质的性质、数量和排放方式等方面。例如，炼焦厂的二氧化硫、苯并[a]芘，硫酸厂的二氧化硫、酸雾，氨基酸厂的氯化氢，化工厂的氯气、氨气等。工艺尾气在总的大气污染物中所占的比例虽然不大，但大多为有毒有害排空物，在不利于大气污染物扩散的条件下，很容易造成较为严重的局部污染。机动车尾气属于流动污染源，主要成分有碳氢化合物、一氧化碳、氮氧化物、铅、苯并[a]芘、固体颗粒物等，在排放量、危害作用方面都相对较轻，其污染主要发生在车辆相对集中的地方。但近年来，随着机动车辆的迅速增加，机动车尾气已经成为一些大中城市的主要大气污染物。

此外，大气中还存在由二次污染所产生的二次污染物，它们是由直接排放的污染物

相互之间或者与大气中现有的成分之间,在适当条件下经过一系列的物理化学反应所形成的与原有直接排放物在性质上完全不同的新的大气污染物,对大气质量的影响也比较大。例如,碳氢化合物在条件适当的大气中可以生成醛、酮、臭氧等二次污染物。硫氧化物、氮氧化物也存在二次污染的问题。

2. 气溶胶状态污染物

在大气污染物中,气溶胶是指空气中固体颗粒状物质和液体粒子,或固体粒子和液体粒子在气体介质中的悬浮体。固体颗粒是指因自然现象,如大风、火山爆发、森林火灾、陨石流星烧毁等产生的各种各样的悬浮物,有粉尘、火山灰、烟尘、宇宙尘埃以及飘逸的植物花粉、细菌等。液体粒子是指水汽凝结物,如水滴、云雾、油雾和冰晶等。

煤烟粉尘是燃煤过程中排放出来的固体颗粒物,由炭黑颗粒、煤粒和飞灰组成,粒径一般为 $0.05\sim 10\mu\text{m}$,主要成分是二氧化硅、氧化铝、氧化铁、氧化钙和未经燃烧的碳微粒等。

金属飘尘是指大气中粒径小于 $10\mu\text{m}$,能在空气中长期飘浮的固体粒子。铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、锌(Zn)、镍(Ni)、砷(As)和汞(Hg)等重金属是构成金属飘尘的主要成分。

沥青烟雾的化学成分复杂,除含碳粒外,还含有有机化合物,如苯酚、萘和多环芳烃3,4-苯并芘(高达 $2.5\%\sim 3.5\%$)等致癌物质。

(二) 水体污染物

水体污染根据污染物的不同而主要分为化学性污染、物理性污染和生物性污染三大类。其中,影响粮食作物安全的水体污染主要是化学性污染(来源于工业废水),其污染物种类包括无机有毒污染物和有机有毒污染物;其次是生物性污染,其污染物种类包括生活污水、禽畜饲养场、医院等排放的废水中的病菌、一些病毒和某些寄生虫等病原体。

1. 无机有毒污染物

无机有毒污染物包括各类重金属(Hg、Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Se、As、Mo、Mn等)和氰化物、氟化物等。重金属在自然水中通常含量很低,采矿和冶炼是其主要污染源,此外,部分工业企业排放的污水中也大量含有这些重金属污染物。重金属污染物的一个重要特点就是在水体中不能被生物降解,只能发生各种形态之间的相互转化以及分散和富集。重金属在水中的变化规律主要为沉淀、络合与螯合、氧化还原及吸附。

2. 有机有毒污染物

有机有毒污染物包括苯酚、多环芳烃和各种人工合成的具有积累性的稳定的有机化合物,如多氯联苯、邻苯二甲酸酯、多氯代二苯并二噁英/呋喃、氯苯、氯酚、有机农药等,主要来源于防腐、消毒、炼油、制药、造纸、煤气、焦化、皮革、食品工业及化学工业排出的废水,这些有机有毒污染物有的可以被水或土壤中的微生物分解,但更多

的物质能在环境中积累而长久不会消失，是水体污染的重要来源。

有机有毒污染物在水体中虽然含量甚微，但生态毒理学研究结果证明，它们中有些极难被生物分解，对化学氧化和吸附也有阻抗作用，在急性及慢性毒性试验中往往并不表现出毒性效应，但却可以在水生生物、农作物和其他生物体中迁移、转化和富集，并具有“三致”（致癌、致畸、致突变）作用，在长周期、低剂量条件下，往往可以对生态环境和人体健康造成严重的，甚至是不可逆的影响。

3. 病原体

病原体主要是指生活污水、医院、禽畜饲养场及屠宰、制革、洗毛、生物制品等企业排放废水中的病毒、病菌和寄生虫等。已确认的病原体中，至少有 24 种细菌、7 种病毒、5 种原生动物和 6 种寄生虫。这些病原体在污水中的含量取决于污水来源地区居民的健康状况、污水处理工艺等因素。水体受到病原体的污染会传播疾病，如血吸虫病、霍乱、伤寒、痢疾、病毒性肝炎等。历史上流行的瘟疫，有的就是水媒型传染病。

（三）土壤污染物

引起土壤自然功能失调、质量恶化的物质，统称为土壤污染物。土壤污染物的来源极其广泛，大致可分为工业污染源、农业污染源和生物污染源 3 类。土壤污染的发生途径有 3 个：一是农用施肥（含污泥利用）、农药施用和污灌，污染物质进入土壤，并随之积累；二是土壤作为废物（垃圾、废渣和污水等）的处理场所，大量的有机、无机和生物病原体等污染物进入土壤；三是土壤作为环境要素之一，大气或水体中的污染物迁移和转化而进入土壤。因此，土壤中的污染物与大气和水体中的污染物很多是相同的，且土壤污染物的种类繁多而复杂。按污染物的性质大致可以分为有机污染物、重金属污染物及城市污水、污泥和垃圾中的病原微生物 3 类。对于粮食作物来说，有毒化学物质的污染最为严重。而在有毒化学物质对土壤的污染中以重金属污染和农药污染最为突出。

二、环境污染物对粮食作物生长的影响及潜在的危害

粮食作物的生长发育和结实与周围环境条件存在着密切关系。不同的生长发育时期对周围环境条件（如水分、温度、光照等）的要求也不相同。环境条件的明显变化将会直接或间接地影响农作物的生长发育和产量。衡量粮食作物生长的指标主要有相对生长速率（relative growth rate, RGR）、净同化率（net assimilation rate, NAR）、叶面积、株高、生物量（或干物重）和生育期等。

（一）重金属污染物

粮食生产中重金属污染物的来源主要是未经处理的污水和大气中的金属飘尘。当用含有大量重金属元素的污水灌溉时，重金属元素在土壤中富集和扩散，并且有难降解、毒性强、具有积累效应和转化为甲基化化合物的特点。大气中的金属飘尘，如 Pb、Cd、Cr、Ni、Zn、As 和 Hg，可沉积或随雨雪降到地面，落到作物叶子上或进入土壤。部

分通过叶片进入作物体内，部分通过土壤经根部吸收进入作物体内，并在其体内富集，影响粮食作物的品质和安全性。

1. 粮食作物对重金属的吸收和富集规律

粮食作物的重金属污染主要是通过根系从土壤中吸收、富集重金属污染物造成的。生长在污染土壤上的粮食作物，虽然能够通过根系分泌作用等机制不同程度地排斥重金属进入体内，但是这种保护作用并不是完全彻底的，特别是有些对重金属具有富集作用的粮食作物或品种，其体内积累了大量的重金属，并在粮食作物的可食部分富集，直接进入食品。

随着污灌区土壤中重金属的积累，粮食作物及其农产品中的重金属含量即使未超标，但也受到不同程度的污染。例如，重金属 Pb、As、Cd 在小麦植物体中总的分布趋势是根>茎叶>穗，且水稻、小麦籽实中重金属元素含量受土壤 pH 的影响，pH 越低，Cd、Pb、Cu、Zn 含量越高，pH 越高，吸收量越少；As 含量则与之相反。

2. 重金属污染对农作物生长发育的影响

土壤受 Cu、Ni、Zn、Co 等元素的污染能引起植物的生长和发育障碍。而 Cd、Hg、Pb 等元素的污染主要是在作物可食用部分蓄积。土壤中 Cd 胁迫对植物代谢的影响更加显著，胁迫引起作物体内活性氧自由基剧增，超出了活性氧清除酶的歧化-清除能力时，使根系代谢酶活性降低，严重影响根系活力。随胁迫时间的延长，超氧化物歧化酶（superoxide dismutases, SOD）活性受到影响而急剧下降，从而使其他代谢酶活性也受到影响，最终使植株死亡。用含 Zn 的污水灌溉农田会对粮食作物，特别是小麦的生长产生较大影响，导致一些器官的外形变化，如花色改变、叶形改变或植株发生个体变态，变得矮小或硕大。当土壤中含 As 量较高时，作物的最初症状是叶片卷曲、枯萎，进而根系发育受阻，最后植株根、茎、叶全部枯死。

土壤中存在过量的 Cu 也能严重地抑制作物的生长和发育。当小麦和大豆遭受 Cu 的毒害时其生长受到严重影响。重金属元素的复合污染对作物的生长发育也有一定影响。同一浓度下，重金属对小麦根伸长的抑制率明显大于对种子发芽的抑制率。

Hg 进入土壤后 95% 以上能迅速被土壤吸持或固定，这主要是由于土壤的黏土矿物和有机质有强烈的吸附作用，因此，Hg 容易在表层积累，并沿土壤的纵深垂直分布递减。土壤中 Hg 的存在形态有金属汞、无机态汞与有机态汞，不同的形态在一定条件下相互转化。粮食作物吸收和积累汞的能力是水稻>玉米>高粱>小麦。Hg 不但能在作物体内累积，还会对作物产生毒害，引起 Hg 中毒，严重情况下引起叶子和幼蕾掉落。

重金属还能影响种子萌发、蒸腾作用及物质的合成。种子中积累的 Cd 对种子萌发的抑制效应比外源 Cd 强得多，并且随着 Cd 处理浓度的增加，种子中蛋白水解酶、淀粉水解酶及脱氢酶的活性都受到抑制，从而影响种子中储存营养物质的转化，降低种子的发芽率。低浓度重金属刺激细胞膨胀，气孔开度增加，导致蒸腾加强，当污染浓度超过一定值，重金属胁迫可诱导 ABA 增加，引起气孔关闭，蒸腾降低，当重金属毒害严重时，叶片枯萎或出现伤斑，蒸腾作用急剧下降。细胞内的重金属离子能与酶活性中心

或蛋白质中的巯基结合，取代某些必需元素，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} 的位置，导致生物大分子构象改变、酶活性丧失以及必需元素的缺乏，进而干扰细胞内物质的合成与运输。

3. 重金属污染物的危害

有毒重金属（Cd、Hg、Pb、Cr、As 等）为持久性毒害污染物（persistent toxic substances, PTS），是一类具有很强毒性，在环境中难以降解，并可通过食物链在动物和人体中累积、富集和放大的污染物。

(1) Cd 污染

Cd 具有很强的生物毒性，而且属于积蓄毒性元素，引起慢性中毒的潜伏期可达 10~30 年之久。Cd 是作物的非必需元素，Cd 进入作物体内并积累到一定程度，就会表现出毒害症状。Cd 主要是通过破坏叶片的叶绿素结构，降低叶绿素含量，使叶片发黄，严重时几乎所有叶片都出现褪绿现象，叶脉组织成酱紫色、变脆、萎缩，叶绿素严重缺乏时表现为缺铁症状。Cd 能在人体中存留很多年，长期食用高 Cd 浓度的植物食品，将导致慢性中毒。Cd 在人体中主要蓄积于肾脏和肝脏中，当超过一定含量时会引起骨痛病、肾损伤、致癌、致畸等。例如，20 世纪 60 年代，日本富士县神通川流域发现了由 Cd 污染引起的“骨痛病”。人体摄入 Cd 的量有 70% 来自食物链中的植物，而在亚洲地区，稻米是人体 Cd 的主要贡献者。许多国家对 Cd 的摄取量做了限定，世界卫生组织（World Health Organization, WHO）暂定每人每周 Cd 摄入量为 0.4~0.5mg。Cd 在体内被吸收后，首先到肝脏，与金属硫蛋白结合，再经血液输送到肾脏。Cd 在人体内的半衰期为 6~18 年。普通正常人体内含 Cd 量为 30~45mg，其中 33% 在肾脏，14% 在肝脏，2% 在肺，0.13% 在胰腺。当 Cd 在人体内累积到一定的程度，便会损害人体的健康。Cd 的危害主要表现在以下 7 个方面：①Cd 除干扰某些微量元素 Cu、Co 和 Zn 的代谢外，还与蛋白质分子的巯基结合，抑制许多酶的活性，从而影响人体正常的代谢功能，使人的体重减轻；②Cd 刺激人体的胃肠系统，致使食欲不振，导致人体的食物摄入量下降；③Cd 影响骨骼的钙质代谢，使骨质软化、变形或骨折；④Cd 累积于肾脏、肝脏和动脉中，进而取代含锌酶中的 Zn，从而抑制含锌酶的生化活性，导致尿蛋白症、糖尿病和水肿病；⑤Cd 中毒可能还导致骨癌、直肠癌、食管癌和胃癌的诱发；⑥Cd 易造成流产、新生儿残废和死亡；⑦Cd 可导致贫血或高血压的发生。

(2) Hg 污染

重金属 Hg 是作物生长发育的非必需元素，是对作物具有显著毒性的污染物质。Hg²⁺ 不仅能与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合，而且还能取代金属蛋白中的必需元素（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} ），导致生物大分子构象改变，酶活性丧失、必需元素缺乏，干扰细胞的正常代谢过程。Hg²⁺ 同时还能干扰物质在细胞中的运输过程。Hg²⁺ 胁迫还与其他形式的氧化胁迫相似，能导致大量的活性氧自由基产生，自由基能损伤主要的生物大分子（如蛋白质、DNA 等），引起膜脂过氧化。Hg²⁺ 达到一定浓度时会抑制植物种子萌发。

Hg 对生物体的负效应影响程度取决于生物个体的敏感性。Hg 在沉积物中的活动

性及水中生物体对 Hg 的生物富集行为依赖于一定的理化因素, 包括 pH、氧化还原条件和温度都会产生一定的影响, 这些因素也影响了 Hg 甲基化过程的速度。Hg 作为有毒污染物对人类造成过重大危害, 20 世纪 50 年代, 发生在水俣病就是因为人们食用了受甲基汞污染的鱼后而发病受害。金属汞的急性中毒症状为糜烂性支气管炎、间质性肺炎; 无机离子型汞的急性中毒症状为消化道溃疡、循环性休克、急性肾功能衰竭。无机汞的慢性中毒症状为食欲不振、体重减轻、乏力、记忆力减退、自信丧失、失眠、震颤、过敏及精神障碍。低级烷基汞的中毒症状为感觉异常、向心性视野狭窄、听觉损害、语言障碍、步行障碍、震颤、腱反射异常、流涎、出汗及轻度精神障碍。

(3) Pb 污染

Pb 是作物生长发育的非必需元素, 当 Pb 被动进入作物根、茎或叶片后, 在其中积累, 影响作物的生长发育, 使作物受害。Pb 对作物根系生长的影响是显著的, 能减少根细胞的有丝分裂速度, 这也是造成作物生长缓慢的原因, 致使作物地上部分生物量随后下降, 叶片失绿明显, 严重时逐渐枯萎, 植株死亡。此外, Pb 的积累也直接影响细胞的代谢作用, 其效应是引起活性氧代谢酶系统的破坏。高浓度 Pb 还使种子萌发率和胚根长度、上胚轴长度降低, 甚至出现胚根组织坏死等。

Pb 是一种严重危害人类健康的重金属元素, 不具有生物学上的有益功能, 它可以影响神经、造血、消化、发育、心血管、内分泌、免疫、骨骼等各类器官, 影响婴幼儿的生长和智力发育, 损伤认知功能、神经行为和学习记忆等脑功能。生命早期的 Pb 暴露不仅危害儿童期智能和行为发育, 而且造成成年后心血管异常、骨质疏松等。婴幼儿和儿童的血铅水平与智商 (intelligence quotient, IQ 值) 显著相关。

(4) As 污染

环境中的 As 及其化合物具有一定的迁移性, 易以灰尘形式溶入雨水、河流和地下水中, 因此, 地下水中的 As 污染被认为是对人类的一种严重威胁。As 是一种重要的污染物, 在各种环境介质中均有暴露, 它能与人体细胞中的巯基结合, 使细胞代谢失常和死亡, 从而导致神经炎、神经麻痹、血溶性贫血及血管坏死。尽管许多食物 (如牛奶、乳制品、牛肉、猪肉、家禽和谷类) 中的 As 有 65%~75% 主要以无机态形式存在, 但鱼、水果和蔬菜中的 As 主要以有机态形式存在, 无机态 As 含量不足 10%。对于人体来讲, 慢性的 As 长期暴露会对神经系统、皮肤、动脉血管产生不良影响, 同时还会引起皮肤癌和膀胱、肾、肺、肝、结肠等内脏部位癌症的发生。

(二) 多环芳烃

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH) 是指分子中含有两个或两个以上苯环结构的化合物, 是煤、石油、煤焦油等有机化合物的热解或不完全燃烧产物, 具有致畸、致癌、致突变和生物难降解的特性。多环芳烃在环境中虽是微量的, 但分布广, 人们可通过大气、水、食品、吸烟等途径摄取, 是人类癌症的重要起因。这类有毒物质几乎都能吸附在粒径小于 $7\mu\text{m}$ 的可吸入粒子上, 能直接通过呼吸道、消化道、皮肤等被人体吸收, 或通过食物链在动物和人体内累积, 而且人们在呼吸含有多环芳烃的空气或食用含有多环芳烃的食品或蔬菜时, 其致癌作用一时不易发现, 平均潜伏期长,