

普通高等院校课程建设规划教材——应用技术类

环境化学教程

苑 静 唐文华 蒋向辉 编著

西南交大出版社

· 成 都 ·

凯里学院规划教材编委会

主 任 张雪梅

副主任 郑茂刚 廖 雨 龙文明

委 员 (按姓氏笔画排名)

丁光军 刘玉林 李丽红

李 斌 肖育军 吴永忠

张锦华 陈洪波 范连生

罗永常 岳 莉 赵 萍

唐文华 黄平波 粟 燕

曾梦宇 谢贵华

办公室主任 廖 雨

办公室成员 吴 华 吴 芳

总 序

教材建设是高校教学内涵建设的一项重要工作，是体现教学内容和教学方法的知识载体，是提高人才培养质量的重要条件。凯里学院 2006 年升本以来，十分重视教材建设工作，在教材选用上明确要求“本科教材必须使用国家规划教材、教育部推荐教材和面向 21 世纪课程教材”，从而保证了教材质量，为提高教学质量、规范教学管理奠定了良好基础。但在使用的过程中逐渐发现，这类适用于研究型本科院校使用的系列教材，多数内容较深、难度较大，不一定适合我校的学生使用，与应用型人才培养目标也不完全切合，从而制约了应用型人才的培养质量。因此，探索和建设适合应用型人才培养体系的校本教材、特色教材成为我校教材建设的迫切任务。自 2008 年起，学校开始了校本特色教材开发的探索与尝试，首批资助出版了 11 本原生态民族文化特色课程丛书，主要有《黔东南州情》、《苗侗文化概论》、《苗族法制史》、《苗族民间诗歌》、《黔东南民族民间体育》、《黔东南民族民间音乐概论》、《黔东南方言学导论》、《苗侗民间工艺美术》、《苗侗服饰及蜡染艺术》等。该校本特色教材丛书的出版，弥补了我校在校本教材建设上的空白，为深入开展校本教材建设积累了经验，并对探索保护、传承、弘扬与开发利用原生态民族文化，推进民族民间文化进课堂做出了积极贡献，对我校教学、科研和人才培养起到了积极的推动作用，并荣获贵州省高等教育教学成果一等奖。

当前，随着高等教育大众化、国际化的迅猛发展和地方本科院校转型发展的深入推进，越来越多的地方本科高校在明确应用型人才培养目标、办学特色、教学内容和课程体系的框架下，积极探索和建设适用于应用型人才培养的系列教材。在此背景下，根据我校人才培养方案和“十二五”教材建设规划，结合服务地方社会经济发展、民族文化遗产需要，我们又启动了第二批

校本教材的立项研究工作，通过申报、论证、评审、立项等环节确定了教材建设的选题范围，第二套校本教材建设项目分为基础课类、应用技术类、素质课类、教材教法等四类，在凯里学院教材建设专家委员会的组织、指导和教材编著者们的辛勤编撰下，目前，15本教材的编撰工作已基本完成，即将正式出版。这套教材丛书既是近年来我校教学内容和课程体系改革的最新成果，反映了学校教学改革的基本方向，也是学校由“重视规模发展”转向“内涵式发展”的一项重大举措。

凯里学院校本规划教材丛书的编辑出版，集中体现了学校探索应用型人才培养的教学建设努力，倾注了编著教师团队成员的大量心血，将有助于推动地方院校提高应用型人才培养质量。然而，由于编写时间紧，加之编著者理论和实践能力水平有限，书中难免存在一些不足和错漏。我们期待在教材使用过程中获得批评意见、改进建议和专家指导，以使之日臻完善。

凯里学院规划教材编委会

二〇一四年十二月

前 言

随着技术和经济的发展，人类利用和改造自然的能力大大加强，地球上过度和不公平的资源利用和开发都以环境破坏为代价，造成了全球性的森林破坏、土地沙化、土壤退化、海洋污染、农药污染、水资源缺乏、生物多样性破坏及全球气候变暖等环境问题。环境问题已经成为人类最为关注的焦点之一。由于大多数的生态环境问题都与化学物质直接相关，环境化学学科在掌握污染来源，消除和控制污染，为确定环境保护决策提供科学依据等方面都起着重要作用。因此，“环境化学”是环境、化学、化工及相关专业的基础理论课程。同时为保护我们共同的家园，与地球和谐相处，环境化学知识也适用于非环境专业的大中专院校学生和环境保护者。

为此，为贯彻应用型本科教育由“重视规模发展”转向“注重提高教学质量”的工作思路，适应当前我国高等院校应用型教育教学改革和教材建设的迫切需要；结合社会对环境知识普及的要求，以应用为目的，以“必需、够用”为度，注重内容的实用性和可读性，不盲目苛求基础理论的完整性、系统性；注重作为非环境专业的环境化学知识对学生的学习能力和读者的环境保护思想的培养，了解环境化学最新发展动态，从而使读者具备一定的基本技能，树立可持续发展观以及人与自然和谐观而编写此书。

本书的编写，注重内容的正确性、先进性和科学性，正确处理了传统学科与新兴交叉学科知识的关系。在内容编排中能充分运用传统化学学科的原理和方法解释环境化学问题，包括生物学、生物化学、毒理学、气象学、土壤学等多种交叉学科知识的融合。

本书的编写借鉴了许多专家和学者在环境化学问题方面的见解和编写经验（参考书目见本书参考文献）。在此向这些专家和学者一并表示衷心的感谢和崇高的敬意！

本书由苑静、唐文华和蒋向辉编著。本书的编写工作得到了许多老师和朋友的支持，在此，向关心和支持本书编写和出版工作的领导和朋友们表示衷心的感谢！

鉴于时间及编者水平所限，本书的编写难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014年6月

目 录

1 环境与环境化学	错误! 未定义书签。
1.1 环境	错误! 未定义书签。
1.2 环境化学及相关概念	错误! 未定义书签。
2 大气环境化学	错误! 未定义书签。
2.1 大气化学基础	错误! 未定义书签。
2.2 大气污染和大气污染物	错误! 未定义书签。
2.3 大气污染物的迁移和转化	错误! 未定义书签。
2.4 突出的大气环境问题	错误! 未定义书签。
2.5 大气污染综合防治	错误! 未定义书签。
3 水环境化学	错误! 未定义书签。
3.1 天然水的组成	错误! 未定义书签。
3.2 天然水体中的化学平衡	错误! 未定义书签。
3.3 水污染和水体污染物	错误! 未定义书签。
3.4 水体富营养化	错误! 未定义书签。
3.5 水污染防治对策和控制技术	错误! 未定义书签。
4 土壤环境化学	错误! 未定义书签。
4.1 土壤的组成与性质	错误! 未定义书签。
4.2 土壤环境污染	错误! 未定义书签。
4.3 土壤的重金属污染及其防治	错误! 未定义书签。
4.4 土壤的化学农药污染及其防治	错误! 未定义书签。
4.5 酚、氟在土壤中的迁移和转化	错误! 未定义书签。
4.6 土壤退化与防治	错误! 未定义书签。

5 生物环境化学	116
5.1 生物圈和生态系统	116
5.2 微生物对污染物的降解转化作用	126
5.3 环境污染物对人类的影响	133
6 典型污染物在环境各圈层中的转归与效应	错误! 未定义书签。
6.1 重金属类污染物	错误! 未定义书签。
6.2 有机污染物	错误! 未定义书签。
7 能源与资源	错误! 未定义书签。
7.1 能源、资源与可持续性	错误! 未定义书签。
7.2 常规能源	错误! 未定义书签。
7.3 矿产资源	错误! 未定义书签。
7.4 固体废物	错误! 未定义书签。
复习及思考题	错误! 未定义书签。
参考文献	错误! 未定义书签。

5 生物环境化学

5.1 生物圈和生态系统

地球上的所有生物体构成了生物圈，生物及环境中与其直接相关的部分称为生物部分，其余为非生物部分。生物学是一门研究生物的科学，以生物合成的化学物种为基础，这些物种以大分子形式存在。作为生物体，人类对环境最关心的是生物之间的关系。因此，生物学是环境科学和环境化学的重要组成部分。

5.1.1 生物圈

生物圈是指地球上所有生命活动的范围及其生存环境的整体。其范围的上限可达 15~20 km 高空，其下限可达海平面以下 10~11 km 深处。生物圈的形成是生物界和水圈、大气圈及岩石圈（土壤圈）长期相互作用的结果。地球上所有生命存在的地方均属生物圈。构成生物圈的生物即包括人类在内的所有动物、植物和微生物不断地与环境进行物质与能量交换。

生物圈存在应具备的条件：① 可以获得来自太阳的充足的光能。一切生命活动都需要能量，而这些能量的根本来源正是太阳光能。② 有被生物利用的大量液态水，几乎所有的生物体都含有大量的水分，没有水就没有生命。③ 有适宜生命活动的温度条件，在此温度变化范围内的物质存在着气态、固态、液态三种物态变化，这也是生命活动的必要前提。④ 提供了生命活动所需的氧气、二氧化碳以及氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁等矿物质营养元素。

细胞是生命的最小单位。最简单的生物是单细胞生物，如某些单细胞细菌、真菌及藻类和原生动物。但是大多数的生物都是由多个细胞构成的，在这些复杂的生物体中，不同的细胞有不同的功能。如藻类体内有叶绿素或其他辅助色素，能进行光合作用。在废水处理中常见的藻类有蓝藻、绿藻、硅藻三大类。原生动物是动物中最原始的、最低等的单细胞动物，个体很小，但却是一个完整生命体，它具有动物所必须有的营养、呼吸、排泄及生殖等机能。原生动物是活性污泥和生物滤池中生物膜的重要组成部分。在废水生化处理中，原生动物虽不如细菌那样重要，但具有吞食有机颗粒和游离细菌的能力，如最常见的纤毛类原生动物钟虫就可以在废水中以细菌及有机颗粒为食。

按照生物体同化作用方式的不同，生物分为自养型生物（能量来源的不同）、异养型生物（异化作用方式的不同）。异养型生物又分为需氧型生物、厌氧型生物、兼氧型生物。

(1) 自养型生物：生物体在同化作用过程中，能够直接把从外界环境摄取的无机物转变

为自身的组成物质，并储存能量，这种新陈代谢类型的生物叫做自养型生物。此类型生物能在外来能量的帮助下，以无机物二氧化碳为碳源，由 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 、 H_2S 等合成有机物，而不能直接利用有机化合物中的碳素营养。

(2) 异养型生物：生物体在同化作用的过程中，不能直接利用无机物制成有机物，只能把从外界摄取的现成的有机物转变成自身的组成物质，并储存能量，这种新陈代谢类型的生物，叫做异养型生物。例如，各种动物和绝大多数的细菌和一切真菌都属于这一类。人类的新陈代谢也是属于异养型的。

① 需氧型生物：需氧型生物体在异化作用的过程中，必须不断地从外界环境中摄取氧来氧化分解自身的组成物质，以释放能量并排出 CO_2 。需氧型生物包括了绝大多数的生物，如各种动、植物多属于这一类。好氧性细菌如硝化细菌、亚硝化细菌等也属于这一类。

② 厌氧型生物：厌氧型生物体在异化作用的过程中，在缺氧的条件下，使有机物分解，以获得进行生命活动所需要的能量。厌氧型生物包括动物体内的寄生虫，以及乳酸菌、酵母菌、甲烷细菌、反硝化细菌等。厌氧型生物的一个主要特征是在有氧存在时，其新陈代谢过程就会受到抑制。

③ 兼氧型生物：兼氧型生物体在异化作用的过程中，在有氧或缺氧的条件下，均可以进行正常分解代谢。兼氧型细菌属于这一类。

5.1.2 生态系统

5.1.2.1 生态系统的概念

生态系统是自然界一定空间的生物与环境之间相互作用、相互制约，不断演变，达到动态平衡、相对稳定的统一整体，是具有一定结构与功能的单位。

5.1.2.2 生态系统的组成、结构与类型

1) 组成

生态系统是由生物成分（生物群落）和非生物成分（环境）所组成的。

(1) 生物成分：生态系统中的生物成分，根据其在系统中物质与能量迁移转化中的作用不同，又可分为三个机能群：

① 生产者：含有叶绿素，能利用太阳辐射能和光能合成有机体的植物，包括某些藻类。

② 消费者：以生物有机体为食的各类异养型生物，包括各类动物。人类也是消费者。消费者又分为一级消费者、二级消费者和三级消费者。

③ 分解者：指依靠分解有机物维持生命的微生物。分解者将生物残体和排泄的有机物分解为无机物，在净化环境污染、维持自然生态平衡方面起着重要的作用。

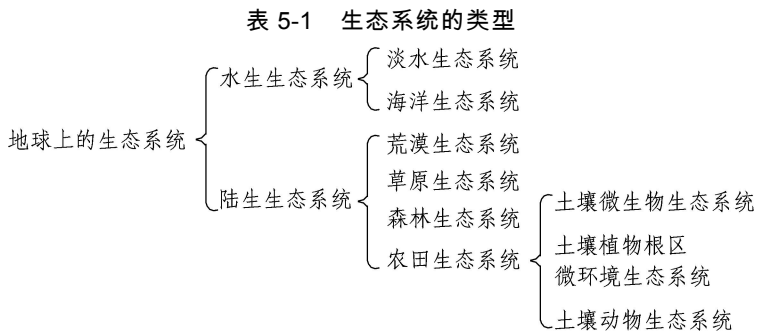
(2) 非生物成分：指各种环境要素，如阳光、空气、水、土壤、温度、矿物养分等。

2) 结构

(1) 生态系统的形态结构：生态系统的生物种类、种群数量、种的空间配置（水平分布、垂直分布）、种的时间变化等构成了生态系统的形态结构。其中生物的种类、数量及其空间位置是主要标志。

(2) 生态系统的营养结构：生态系统各组成部分之间建立起来的营养关系，构成了生态系统的营养结构。营养结构是生态系统中能量流动和物质循环的基础。不同生态系统的组成不同，其营养结构的具体表现形式也因之各异。

3) 类型 (表 5-1)



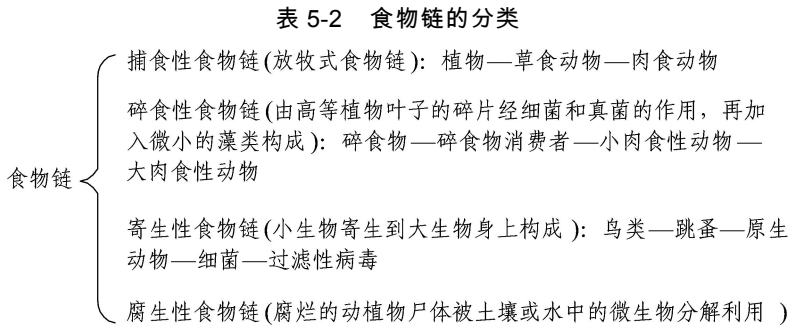
5.1.2.3 生态系统的功能

生态系统的功能主要表现在能量的单方向流动、物质的反复循环和一定的信息联系。

1) 食物链 (网) 和营养级

(1) 食物链：生态系统中，由食物关系把多种生物联结起来，一种生物以另一种生物为食；另一种生物再以第三种生物为食……，彼此形成了一个以食物关系连接起来的链锁关系，称为食物链。

按照生物间的相互关系，一般又可把食物链分成四类，见表 5-2。



(2) 食物网：在一个生态系统中，食物关系往往很复杂，各种食物链相互交错形成食物

网。能量流和物质流就是通过食物链或食物网进行的。

(3) 营养级：在食物链的各个环节，地位相同、起同样作用的一群生物称为一个营养级。生产者有机体为第一营养级，一级消费者为第二营养级，二级消费者为第三营养级，依次为第四、第五……营养级。一个生态系统的营养级通常为4~5级，一般不超过7级。人类处于最高营养级。

低位营养级生物是高位营养级生物的营养及能量的供应者，而地球上的一切能量来源是太阳能。但是，低位营养级的能量仅有10%~20%能被高一级营养级生物利用。因此，在数量上第一营养级就必须大大超过第二营养级，逐级递减，形成生物数目金字塔。

生物金字塔的意义：

(1) 农业是基础，种植业又是农业的基础，是发展养殖业和畜牧业的基础。过度放牧必将引起草原生态系统的破坏，如草场退化、土地沙漠化。因此，农业结构应符合生态学原理。

(2) 人类处于食物链的最高营养级，处于生物金字塔的顶点。因此，世界人口的总数量受食物供应的限制。人口过剩，食物短缺，人类生态系统的平衡被破坏。

(3) 利用食物链的限度关系，充分利用能量。青草内的碳水化合物对土壤的作用不是十分重要，应先用其做饲料，再用畜、禽类的粪尿制作沼气，沼渣、水作肥料，则可以有效地利用能量。如果把青草直接用作肥料是生物质能的一大浪费。

(4) 改变人类食物结构。人类的食物结构以植物为主食比以动物为主食经济有利；以草食动物为食比以肉食动物为食经济有利。即人类的食物链越短，则能量的利用率越高。

2) 生态系统中的能量流动和物质流动

进入大气层的太阳能，只有10%左右辐射到绿色植物上，还有大部分被反射回去，真正被绿色植物吸收利用的只占辐射到地面上的太阳能的1%左右。绿色植物利用这一部分太阳能进行光合作用，制造有机物，每年可达1500~2000亿吨，以供给消费者需要。能量通过食物链传递。动、植物死后的尸体或排泄物被分解者分解，把复杂的有机物转变为简单的无机物，在分解过程中把有机物中储存的能量散发到环境中去。同时，生产者、消费者、分解者的呼吸作用又都要消耗一部分能量，被消耗的能量以热的形式散发到环境中去（能量耗散结构）。这就是生态系统中的能量流和物质流。

3) 生态系统中的物质循环

(1) 水循环：水是生态系统中能量流与物质循环的介质，而其中的O、H又是生命有机体的重要组成物质的给源。水的循环对调节气候和净化环境也起着重要作用。水循环和其他物质的循环密切地交织在一起，对水循环的任何干扰，都会影响其他循环，甚至造成其他循环的瓦解，至少在局部范围内如此。所以，保护水循环的整体性是环境保护的一个中心问题。

(2) 碳循环：碳是有机分子的基本材料，是一切生物的物质组成基础。从目前的观点来看，空气中的CO₂浓度在逐步增加，这是碳循环不够平衡的结果，其后果是严峻的。

空气中CO₂减少的主要途径：① 光合作用；② 海水以及其他地面水的吸收溶解；③ 碳酸盐沉积。

空气中CO₂增加的主要途径：① 化石燃料以及动、植物残体的燃烧；② 动、植物的呼吸

作用；③ 微生物对有机物残体的分解作用；④ 水中溶解 CO_2 的解吸作用；⑤ 碳酸盐的热分解；⑥ 岩石的风化作用等。

(3) 氮循环：植物从土壤中吸收硝酸盐或铵盐，并在体内制成各种氨基酸，最后合成各种蛋白质。土壤中的硝酸盐可进入地下水层，污染地下水源，也可流入江、河、湖泊、海洋。而硝酸盐又可在反硝化细菌的作用下转变为 N_2 或 N_2O ，重返大气，完成氮的循环。

从氮循环的现状来看，每年被固定的氮合计约 $98.1 \times 10^6 \text{ t}$ ，而经反硝化重返大气的氮，以及沉积在海底的氮为 $85 \times 10^6 \text{ t}$ 。多余下来的固定氮分布在土壤、地下水、地表水之中。这可能是造成水体富营养化和地下水、地面水氮污染的主要原因。

5.1.2.4 生态平衡

在外来因素干扰下，能通过自我调节恢复到最初的稳定状态，则这种状态可称为生态平衡。生态平衡包括组成结构上的平衡、功能上的平衡、输入和输出物质和能量上的平衡。

生态系统之所以能保持相对的平衡状态，是因为生态系统本身具有自动调节的能力。但是这个调节能力是有限的，外界的干扰或冲击，或者内部变化超过这个限度，生态系统的平衡就可能遭到破坏，这个限度称为生态阈值。生态系统的结构越复杂，自动调节能力越强，生态平衡越稳定，抵抗外源物的干扰（如污染物的输入）能力越强，生态阈值越大。

人为因素引起的生态平衡破坏因素：① 人为因素使环境因素发生改变，主要表现为人类的生产、生活向环境中输入大量的污染物所引起；其次表现为对自然和自然资源的不合理开发利用所引起。② 人为因素使生物种类发生改变。如乱砍滥伐森林、过度放牧等都有可能使生态平衡遭受破坏。③ 人为因素使信息系统的破坏，也会使生态平衡遭受破坏。

5.1.3 生物污染的主要途径及分布

5.1.3.1 生物污染

生物污染是指大气、水环境以及土壤环境中各种各样的污染物质，包括施入土壤中的农药等，通过生物的表面附着、根部吸收、叶片气孔的吸收以及表皮的渗透等方式进入生物体内，并通过食物链最终影响到人体健康。把污染环境的某些物质在生物体内累积至数量超过其正常含量，足以影响人体健康或动植物正常生长发育的现象称为生物污染。对于生物体来讲，有些物质是有害或有毒的，有些物质则是无害甚至是有益的；但是大多数物质在超常量摄入时对生物体都是有害的。

1) 生物放大

生物放大是指在同一食物链上的高营养级生物，通过吞食低营养级生物蓄积某种元素或难降解物质，使其在机体内的浓度随营养级提高而增大的现象。生物放大的程度也用生物浓缩系数表示。生物放大的结果是食物链上高营养级生物体内某种物质的浓度显著地超过环境

中的浓度，因此生物放大是针对食物链的关系而言的。如果不存在食物链的关系，就不能称之为生物放大，而只能称之为生物富集或生物积累。如 1966 年有人报道，美国图尔湖和克拉斯南部自然保护区受到 DDT 对生物群落的污染。DDT 是一种有机氯杀虫剂，易溶解于脂肪而积累于动物脂肪内。在位于食物链顶级，以鱼类为食的水鸟体中的 DDT 浓度竟然比湖水高出近 76 万多倍。北极的陆地生态系统中，在地衣→北美驯鹿→狼的食物链中，也存在着对 ^{137}Cs 生物放大现象。

不同生物对物质的生物放大作用也有明显的差别，例如，海洋模式生态系统中研究藤壶、蛤、牡蛎、蓝蟹和沙蚕等五种生物对于铁、钡、锌、锰、镉、铜、硒、砷、铬、汞 10 种元素的生物放大作用，发现藤壶和沙蚕的生物放大能力较大，牡蛎和蛤次之，蓝蟹最小。但是生物放大并不是在所有的条件下都能发生。据文献报道，有些物质只能沿着生物链传递，不能沿食物链放大；有些物质既不能沿食物链传递，也不能沿食物链放大。这是因为影响生物放大的因素是多方面的。如食物链往往都十分复杂，相互交织成网状，同一种生物在发育的不同阶段或相同阶段，有可能隶属于不同营养级，具有多种食物来源，这就扰乱了生物放大。不同生物或同一生物在不同的条件下，对物质的吸收和消除等均有可能不同，也会影响生物放大的情况。例如，1971 年，Hame-link 等人通过实验发现，疏水性化合物被鱼体组织吸收，主要是通过水和血液中脂肪层两相之间的平衡交换进行的。后来，许多学者的研究也证实了这一结论的正确性，他们明确指出，有机化合物的生物积累主要是通过分配作用进入水生有机体的脂肪中。随后的许多实验结果也都支持了这一点，即有机化合物在生物体的积累不是通过食物链迁移产生的生物放大，而是生物脂肪对有机化合物的溶解作用。

2) 生物富集

生物富集是指生物机体或处于同一营养级上的许多生物种群，通过非吞食方式（如植物根部的吸收、气孔的呼吸作用而吸收），从周围环境中蓄积某种元素或难降解的物质，使生物体内该物质的浓度超过环境中浓度的现象，又称为生物学富集或生物浓缩。生物富集用生物浓缩系数表示，即生物体内某种物质的浓度和环境中该物质浓度的比值。生物富集对于阐明物质或元素在生态系统中的迁移转化规律，评价和预测污染物进入环境后可能造成的危害，以及利用生物对环境进行监测和净化等均有重要的意义。

生物浓缩系数可以从几到几万，甚至更高。影响生物浓缩系数的主要因素是物质本身的性质以及生物和环境等因素。物质性质方面的主要影响因素是降解性、脂溶性和水溶性。一般降解性小、脂溶性高、水溶性低的物质，生物浓缩系数高；反之，则低。如虹鳟对 2, 2', 4, 4'-氯联苯的浓缩系数为 12 400，而对四氯化碳的浓缩系数是 17.7。在生物特征方面的影响因素有生物种类、大小、性别、器官、生物发育阶段等，如金枪鱼和海绵对铜的浓缩系数，分别是 100 和 1 400。在环境条件方面的影响因素包括温度、盐度、水硬度、pH、氧含量和光照状况等。如翻车鱼对多氯联苯浓缩系数在水温 5 °C 时为 6.0×10^3 ，而在 15 °C 时为 5.0×10^4 ，水温升高，相差显著。一般重金属元素和许多氯化烃、稠环、杂环等有机化合物具有很高的生物浓缩系数。

$$\text{生物浓缩系数} = \frac{C_B (\text{某物质或元素在生物体内的浓度})}{C_E (\text{某物质或元素在周围环境中的浓度})}$$

3) 生物积累

生物积累是生物从周围环境（水、土壤、大气）中和食物链蓄积某种元素或难降解物质，使其在机体中的浓度超过周围环境中浓度的现象。生物放大和生物富集都是生物积累的一种方式。生物积累也用生物浓缩系数来表示。浓缩系数与生物体特性、营养等级、食物类型、发育阶段、接触时间、化合物的性质及浓度有关。通常，化学性质稳定的脂溶性有机污染物如 DDT、PCBs 等很容易在生物体内积累。例如，有人研究牡蛎在 50 $\mu\text{g/L}$ 氯化汞溶液中对汞的积累。观察 7 d、14 d、19 d 和 42 d 时，牡蛎体内汞含量的变化，结果发现其浓缩系数分别是 500、700、800 和 1 200，表明在代谢活跃期内的生物积累过程中，浓缩系数是不断增加的。因此，任何机体在任何时刻，机体内某种元素或难降解物质的浓度水平取决于摄取和消除这两个相反过程的速率，当摄取量大于消除量时，就发生生物积累。

科学研究还发现，环境中物质的浓度对生物积累的影响不大，但在生物积累过程中，不同种生物或同一种生物不同器官和组织，对同一种元素或物质的平衡浓缩系数的数值以及达到平衡的时间可以有很大区别。

综上所述，生物积累、生物放大和生物富集可在不同侧面为探讨环境中污染物质的迁移、排放标准和可能造成的危害，以及利用生物对环境进行监测和净化，提供重要的科学依据。

5.1.3.2 生物转化

生物转化是指污染物进入生物体后，在有关体内酶或分泌到体外的酶的催化作用下的代谢变化过程。其中包括生物降解和生物活化两种转化过程。

1) 生物降解

有机物质通过生物氧化及其他的生物转化，变成更小更简单的分子。如果有机物质降解成二氧化碳、水等简单无机化合物，为彻底降解；否则，为不彻底降解。多数污染物经生物转化后，水溶性提高，毒性也相对减弱或消失，有的分解中间产物与生物体内的物质相结合，生成易排泄物而迅速排出体外。

2) 生物活化

有的污染物在生物体内的代谢转化过程中转变为比母体毒性更大的生物活性物质，这种现象称为生物活化。例如，汞的甲基化就是典型的实例。

5.1.3.3 污染物对植物污染的主要途径及在植物体内的分布

植物对污染物的吸收是一个复杂的综合过程。其根部对污染物的吸收主要受到土壤 pH、污染物浓度以及环境理化性质的影响；而暴露于空气中的植物的地上部分对污染物的摄取，主要取决于污染物的蒸气压。植物受污染的主要途径有表面附着及植物吸收等，而污染物在植

物体内的分布规律则与植物吸收污染物的主要途径、植物的种类及污染物的性质等因素有关。

1) 表面附着

表面附着是指污染物以物理方式黏附在植物表面的现象。例如，散逸到大气中的各种气态污染物、施用的农药、大气中降落的粉尘及含大气污染物的降水等，会有一部分黏附在植物表面，造成对植物的污染和危害。表面附着量的大小与植物的表面积大小、表面形状、表面性质及污染物的性质、状态等有关。表面积较大、表面粗糙且有绒毛的植物其附着量较大，黏度较大、呈粉状的污染物在植物上的附着量也较大。

2) 植物吸收

植物对大气、水体和土壤中污染物的吸收方式可分为主动吸收和被动吸收两种。主动吸收即代谢吸收，它是指植物细胞利用其特有的代谢作用所产生的能量而进行的吸收作用。细胞通过这种吸收能把浓度差逆向的外界物质引入细胞内。例如，植物叶面的气孔可不断吸收空气中极微量的氟等，吸收的氟随蒸腾转移到叶尖和叶缘，并在那里积累至一定浓度后造成植物组织的坏死。植物通过根系从土壤或水体中吸收营养物质和水分的同时也吸收污染物，其吸收量的大小与污染物的性质及含量、土壤性质和植物品种等因素有关。例如，用含镉的污水灌溉水稻，镉将被水稻根部吸收，并在水稻的各个部位积累，造成水稻的镉污染。主动吸收可使污染物在植物体内得以百倍、千倍甚至数万倍地浓缩。被动吸收即物理吸收，这种吸收依靠外液与原生质的浓度差，通过溶质扩散作用实现吸收过程，其吸收量的大小与污染物的性质及含量大小、植物与污染物接触时间的长短等因素有关。

许多污染物质都是通过植物的土壤-植物系统进入生态系统的。由于污染物质在生物链中的积累直接或间接地对陆生生物造成影响，因而植物对污染物质的吸收被认为是污染物在食物链中的积累并危害陆生动物的第一步。植物吸收污染物后，其在植物体内的分布与植物种类、吸收污染物的途径等因素有关。植物从大气中吸收污染物后，污染物在植物体内的残留量常以叶部分布最多。例如，在含氟的大气环境中种植的番茄、茄子、黄瓜、菠菜、青萝卜、胡萝卜等蔬菜体内氟的含量分布符合此规律。

植物从土壤和水中吸收污染物，其残留量的一般分布规律是：根 > 茎 > 叶 > 穗 > 壳 > 种子。例如，在被镉污染的土壤中种植的水稻，其根部的镉含量远大于其他部位。试验表明，植物的种类不同，对污染物的吸收残留量的分布也有不符合上述规律的。例如，在被镉污染的土壤中种植的萝卜和胡萝卜，其根部的含镉量低于叶部。

5.1.3.4 污染物对动物污染的主要途径及在动物体内的分布

环境中的污染物主要通过呼吸道、消化道和皮肤吸收等途径进入动物体内，并通过食物链得到浓缩富集，最终进入人体。

1) 动物吸收

动物在呼吸空气的同时将毫无选择地吸收来自空气中的气态污染物及悬浮颗粒物，在饮水和摄入食物时，也将摄入其中的污染物。脂溶性污染物还能通过皮肤的吸收作用进入动物机体。例如，某些气态毒物如氰化氢、砷化氢以及重金属汞等都可经皮肤吸收。当皮肤有病损时，原不能经完整皮肤吸收的物质也可通过有病损的皮肤而进入动物体。

呼吸道吸收的污染物，通过肺泡直接进入动物体内大循环；消化道吸收的污染物通过小肠吸收（吸收的程度与污染物的性质有关），经肝脏再进入大循环；经皮肤吸收的污染物可直接进入血液循环。另外，由呼吸道吸入并沉积在呼吸道表面的有害物质，也可以咽到消化道，再被吸收进入机体。

污染物质进入人体的主要途径是通过饮食、呼吸和皮肤的吸收作用。

“病从口入”是指在进食被农药、重金属或病菌污染的粮食、蔬菜、肉类、禽蛋、水果或饮水的过程中，人体不知不觉中摄入了大量有毒物质和病菌，引发多种疾病。食物和饮水主要是通过消化道进入人体的。呼吸道是吸收大气污染物质的主要途径。固态气溶胶和粉尘污染物质吸进呼吸道后，可在气管、支气管及肺泡表面沉积。呼吸道吸收的污染物质可以直接进入血液系统并转移至淋巴系统或其他器官而不经肝脏的解毒作用，从而产生更大的毒性。

相比而言，人体皮肤对污染物质的吸收能力较弱，但也是不少污染物质进入人体的重要途径。皮肤接触的污染物质，常以被动扩散的方式相继通过皮肤的表皮及真皮，再滤过真皮中的毛细血管壁膜进入血液中。一般相对分子质量低于 300、处于液态或溶解态、呈非极性的脂溶性污染物质，最容易被皮肤吸收，如酚、醇和某些有机磷农药等容易通过皮肤，并在人体内发生转化与排泄作用。

有机污染物进入动物体后，除很少一部分水溶性强、相对分子质量小的毒物可以原形排出外，绝大部分都要经过某种酶的代谢或转化作用改变其毒性，增强其水溶性而易于排泄。肝脏、肾脏、胃、肠等器官对各种毒物都有生物转化功能，其中尤以肝脏最为重要。

无机污染物（包括金属和非金属污染物）进入动物体后，大部分参与体内生物代谢过程，转化为化学形态和结构不同的物质，如金属的甲基化、脱甲基化、配位反应等；也有一部分直接蓄积于体内各器官。

动物体对污染物的排泄作用主要通过肾脏、消化道和呼吸道，也有少量随汗液、乳汁、唾液等分泌液排出，还有的在皮肤的新陈代谢过程中到达毛发而离开肌体。有毒物质在排泄过程中，可在排出器官处造成继发性损害，成为中毒表现的一部分。另外，当有毒物质在体内某器官处的蓄积超过某一限度时，会对该器官造成损害，出现中毒表现。

2) 食物链作用

生物（包括微生物）能通过食物链传递和富集污染物。

水体中的污染物通过生物、微生物的代谢作用进入生物、微生物体内得到浓缩，其浓缩作用可使污染物在生物体内的浓度比在水体中的浓度大得多。例如，进入水体中的污染物，除了由水中生物的吸收作用直接进入生物体外，还有一个重要途径：食物链。浮游生物是食物链的基础。在水体环境中，常存在如下食物链：虾米吃“细泥”（实质上是浮游生物），小鱼吃虾米，大鱼吃小鱼。污染物在食物链的每次传递中浓度得到一次浓缩，甚至可以达到产生中毒作用的程度。人处于这一食物链的末端，人若长期食用污染水体中的鱼类，则可能由

于污染物在体内长期富集浓缩，引起慢性中毒。震惊世界的环境公害之一日本熊本县“水俣病”，就是因为水俣湾当地的居民较长时间内食用了被周围石油化工厂排放的含汞废水污染和富集了甲基汞的鱼、虾、贝类等水生生物，造成大量居民中枢神经中毒、甚至死亡。它是由含汞废水进入“海水-鱼-人”食物链而造成的对人体的严重毒害。

环境污染物不仅可以通过水生生物食物链富集，也可以通过陆生生物食物链富集。例如，农药、大气污染物可通过植物的叶片、根系进入植物体内得到富集，而含有污染物的农作物、牧草、饲料等经过牛、羊、猪、鸡等动物进一步富集，最后通过粮食、蔬菜、水果、肉、蛋、奶等食物进入人体中浓缩，危害人体健康。例如，日本的“痛痛病”事件（又称“镉米事件”）就是因为当地居民用被锌、铅冶炼厂等排放的含镉工业废水所污染的河水灌溉农田，使稻米中含有大量的镉（“镉米”），居民食用含镉稻米和饮用含镉的水而引发的镉中毒事件。

3) 污染物在动物体内的分布

污染物质被动物体吸收后，借助动物体的血液循环和淋巴系统作用在动物体内进行分布，并发生危害。污染物质在动物体内的分布与污染物的性质及进入动物组织的类型有关，其分布大体有以下五种规律。

(1) 能溶解于体液的物质，如钠、钾、锂、氟、氯、溴等离子，在体内分布比较均匀。

(2) 镉、铈、钍等三价和四价阳离子，水解后生成胶体，主要蓄积于肝和其他网状内皮系统。

(3) 与骨骼亲和性较强的物质，如铅、钙、钡、锶、镭、铍等二价阳离子在骨骼中含量极高。

(4) 对某种器官具有特殊亲和性的物质，则在该种器官中积累较多。如碘对甲状腺、汞对肾脏有特殊亲和性，故碘在甲状腺中蓄积较多，汞在肾脏中蓄积较多。

(5) 脂溶性物质，如有机氯化物（DDT、六六六等），主要积累于动物体内的脂肪中。

以上五种分布类型之间又彼此交叉，比较复杂。往往一种污染物对某一种器官有特殊亲和作用，但同时也分布于其他器官。例如，铅离子除分布在骨骼中外，也分布于肝、肾中；砷除分布于肾、肝、骨骼外，也分布于皮肤、毛发、指甲中。另外，同一种元素可能因其价态或存在形态不同而在体内蓄积的部位也有所不同。例如，水溶性汞离子很少进入脑组织，但烷基汞呈脂溶性，能通过脑屏障进入脑组织。再如，进入体内的四乙基铅，最初在脑、肝中分布较多，但经分解转变成成为无机铅后，则主要分布在骨骼、肝、肾中。

总之，污染物质在动物体内的分布是一个复杂的过程，直接影响污染物质对动物的毒害作用。

污染物进入人体的途径以及在体内的分布、代谢、储存和排泄过程如图 5-1 所示。

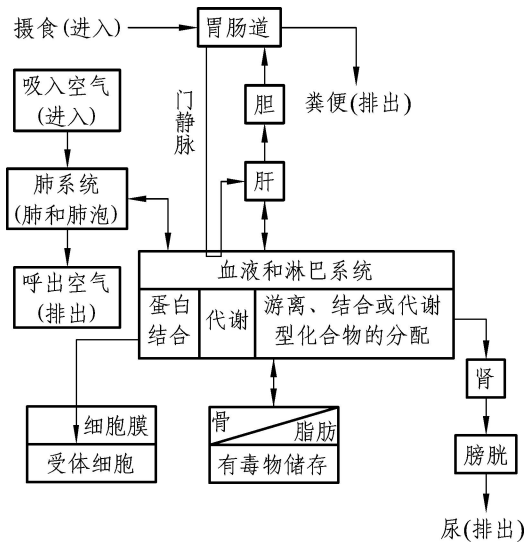


图 5-1 污染物进入人体的途径及在体内的分布、代谢、储存和排泄

5.2 微生物对污染物的降解转化作用

有机污染物的生物降解是一个依赖于微生物代谢作用进行转化的重要环境过程。通过生物降解，污染物的毒性也随之改变。有的可能促进转化成毒性强的物质，而有的则促进转化成毒性弱的物质，即有恶性转化（生物活化）和良性转化（生物解毒）两种作用。例如，无机汞化合物在微生物作用下，既能转化为毒性更大的有机汞，也能在另一类微生物作用下还原成毒性较小的单质汞。

微生物在环境中普遍存在，它可以通过酶活性催化反应提供能量，使一些原先反应速率很慢的反应，在有生物酶存在时迅速加快。微生物可以催化氧化或降解有机污染物质，这是环境中有机污染物转化的重要过程；同时微生物可转化重金属元素存在的形态，在重金属的迁移转化过程中也具有很重要的作用。如果没有微生物降解死亡的生物体和排出的废物，人们就会淹没在废弃物之中。因此，人们称微生物是生物催化剂，能使许多化学反应过程在环境中发生，同时生物有机体的降解又为其他生物生长提供必要的营养，以补偿和维持生物活性的营养库。

环境中微生物可以分为三类：细菌、真菌和藻类。细菌和真菌可以认为是还原剂类，能使化合物分解为更简单的形式，从而获得维持它们自身的生长和代谢过程所需要的能量。相对于高等生物来讲，细菌和真菌对能量的利用率是很高的。藻类是一大类低等植物的统称。藻类体内有叶绿素或其他辅助色素，能进行光合作用。藻类被划分为生产者，因为藻类能把光能转化为化学能储存起来。在有光照时，藻类可以利用光合作用从二氧化碳合成有机物，满足自身生长和代谢的需要。在无光照时，藻类按非光合生物的方式进行有机物质的代谢，利用降解储备的淀粉、脂肪或消耗藻类自身的原生质以满足自身代谢的需要。

5.2.1 生物酶的相关概念

酶是生物催化剂，能使化学反应在生物体温度下迅速进行。因此可以把酶定义为：由细胞制造和分泌的、以蛋白质为主要成分的、具有催化活性的生物催化剂。绝大多数的生物转化是在机体的酶参与和控制下完成的。依靠酶催化反应的物质叫底物。在生物酶作用下，底物发生的转化反应称为酶促反应。各种酶都有一个活性部位，活性部位的结构决定了该种酶可以和什么样的底物相结合，即对底物具有高度的选择性或专一性，形成酶-底物的复合物。复合物能分解生成一个或多个与起始底物不同的产物，而酶不断地被再生出来，继续参加催化反应。

酶的催化作用的特点：① 专一性，也就是一种酶只能对一种底物或一类底物起催化作用，而促进一定的反应，生成一定的代谢产物。如脲酶仅能催化尿素水解，但对包括结构与尿素非常相似的甲基尿素在内的其他底物均无催化作用。又如，蛋白酶只能催化蛋白质水解，但不能催化淀粉水解。② 高效性。例如，蔗糖酶催化蔗糖水解的速率比强酸催化速率快 2×10^{12} 倍；③ 酶具有多样性，酶的多样性是由酶的专一性决定的，因为在生物体内存在各种各样的化学反应，而每一种酶只能催化一种或一类化学反应，这就决定了酶的多样性。④ 生物酶的催化需要温和的外界条件。酶是蛋白质，因此环境条件（如强酸、强碱、高温等激烈条件）可以改变蛋白质的结构和化学性质，从而影响酶的活性。酶催化作用一般要求温和的外界条件，如常温、常压、接近中性的酸碱度。

酶的种类很多，根据酶的催化反应的类型，可将其分成氧化还原酶、转移酶、水解酶、裂解酶、异构酶和合成酶等。

有的酶需要辅酶（助催化剂），不同的辅酶由不同的成分构成，包括维生素和金属离子。辅酶的种类很多，约有 30 多种，主要有：

- (1) FMN 和 FAD：黄素单核苷酸和黄素腺嘌呤二核苷酸。
- (2) NAD^+ 和 NADP^+ ：辅酶 I 和辅酶 II。
- (3) 辅酶 Q（泛醌）：简写为 CoQ。
- (4) 细胞色素酶系的辅酶。
- (5) 辅酶 A：简写为 CoASH。

辅酶起着传递电子、原子或某些化学基团的功能。辅酶与蛋白质成分构成酶的整体。蛋白质成分起着专一性和催化高效率的功能。只有蛋白质成分有机地结合在一起，才会具有酶的催化作用。因此，如果环境因素损坏了辅酶，也会影响酶的正常功能。

5.2.2 微生物的降解转化作用

5.2.2.1 耗氧污染物的微生物降解

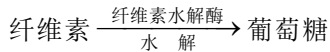
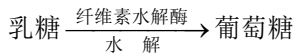
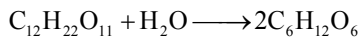
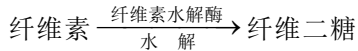
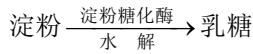
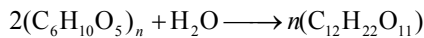
耗氧污染物包括糖类、蛋白质、脂肪及其他有机物质（或其降解产物）。在细菌的作用下，耗氧有机物可以在细胞外分解成较简单的化合物。耗氧有机物质通过生物氧化以及其他的生物转化，变成更小、更简单的分子的过程称为耗氧有机物质的生物降解。如果有有机物质最终

被降解成为二氧化碳、水等无机物质，就称有机物质被完全降解，否则称为不彻底降解。

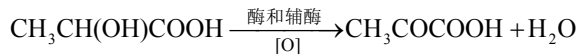
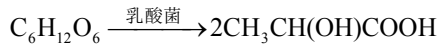
1) 糖类的微生物降解

糖类包括单糖如己糖 (C₆H₁₂O₆) —— 葡萄糖、果糖等和戊糖 (C₅H₁₀O₅) —— 木糖、阿拉伯糖等，二糖如蔗糖 (C₁₂H₂₂O₁₁)、乳糖、麦芽糖和多糖如淀粉、纤维素等 [(C₆H₁₀O₅)_n]。糖类是由 C、H、O 三种元素构成的。糖是生物活动的能量供应物质，细菌可以利用它作为能量的来源。糖类降解过程如下。

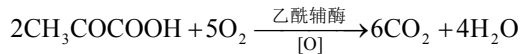
(1) 多糖水解成单糖。多糖在生物酶的催化下，水解成二糖或单糖，而后才能被微生物摄取进入细胞内。其中二糖在细胞内继续在生物酶的作用下降解成为单糖。降解产物中最重要单糖是葡萄糖。



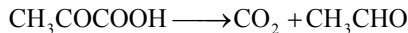
(2) 单糖酵解生成丙酮酸。细胞内的单糖无论是有氧氧化还是无氧氧化，都可经过一系列酶促反应生成丙酮酸，这是糖类化合物降解的中心环节，又称糖降过程，其反应如下：



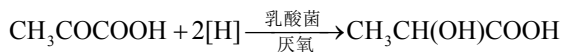
(3) 丙酮酸的转化。在有氧氧化的条件下，丙酮酸在乙酰辅酶 A 作用下转变为乳酸和乙酸等，最终氧化成二氧化碳和水。



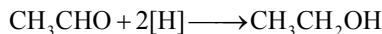
在无氧氧化条件下，丙酮酸往往不能彻底氧化，只氧化成各种酸、醇、酮等，这一过程称为发酵。糖类发酵生成大量有机酸，使 pH 下降，从而抑制细菌的生命活动，属于酸性发酵。发酵的具体产物取决于产酸菌种类和外界条件。



在无氧氧化条件下，丙酮酸通过酶促反应以其本身作为受氢体而被还原为乳酸。



或以其转化的中间产物作受氢体，发生不完全氧化生成低级的有机酸、醇及二氧化碳等。



从能量角度来看，糖在有氧条件下分解所释放的能量大大超过无氧条件下发酵分解所产

生的能量，由此可见，氧对生物体有效地利用能源是十分重要的。

2) 脂肪和油类的微生物降解

脂肪和油类是由脂肪酸和甘油合成的酯，由 C、H、O 三种元素组成。脂肪多来自动物，常温下呈固态；而油多来自植物，常温下呈液态。脂肪和油类比糖类难降解，其降解途径如下。

(1) 脂肪和油类水解。脂肪和油类首先在细胞外经水解酶催化水解成脂肪酸和甘油。

(2) 甘油和脂肪酸转化。甘油的降解与单糖降解类似，在有氧或无氧氧化条件下，均能被一系列的酶促反应转变成丙酮酸。丙酮酸经乙酰辅酶 A 的酶促反应，在有氧条件下最终转化成二氧化碳和水，而在无氧条件下则转变为简单的有机酸、醇和二氧化碳。

脂肪酸在有氧氧化条件下，经 β -氧化途径（羧酸被氧化，使末端第二个碳碳键断裂）及乙酰辅酶 A 的酶促作用最后完全氧化成二氧化碳和水。在无氧条件下，脂肪酸通过酶促反应，其中间产物不被完全氧化，形成低级的有机酸、醇和二氧化碳。

3) 蛋白质的微生物降解

蛋白质的主要组成元素是 C、H、O 和 N，有些还含有 S、P 等元素。微生物降解蛋白质的途径如下：

(1) 蛋白质水解成氨基酸。蛋白质的相对分子质量很大，不能直接进入细胞内。所以，蛋白质由胞外水解酶催化水解成氨基酸，随后再进入细胞内部。

(2) 氨基酸转化成脂肪酸。各种氨基酸在细胞内经酶的作用，通过不同的途径转化成相应的脂肪酸，随后脂肪酸经前面所讲述的过程转化成二氧化碳和水。

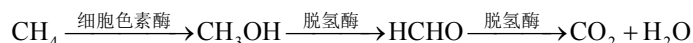
总而言之，蛋白质通过微生物的作用，在有氧的条件下可彻底降解成为二氧化碳、水和氨；而在无氧氧化下通常是酸性发酵，生成简单有机酸、醇和二氧化碳等，降解不彻底。

在无氧氧化条件下，糖类、脂肪和蛋白质都可借助产酸菌的作用降解成简单的有机酸、醇等化合物。若条件允许，这些有机化合物在产氢菌和产乙酸菌的作用下，可被转化成乙酸、甲酸、氢气和二氧化碳，进而经产甲烷菌的作用产生甲烷。复杂的有机物质的这一降解过程，称为甲烷发酵或沼气发酵。在甲烷发酵中一般以糖类的降解率和降解速率最高，其次是脂肪，最低的是蛋白质。

5.2.2.2 有毒有机物的生物转化与微生物降解

1) 石油的微生物降解

石油的微生物降解在消除碳氢化合物环境污染方面，尤其是从水体和土壤中消除石油污染物具有重要的作用。石油的微生物降解较难，且速度较慢，但比化学氧化作用快 10 倍左右。其基本规律是，直链烃易于降解，支链烃稍难一些，芳烃更难，环烷烃的生物降解最困难。微生物降解石油污染物的化学过程以甲烷为例，反应如下。



碳原子数大于 1 的正烷烃，其最常见降解途径是：通过烷烃的末端氧化，或次末端氧化，或双端氧化，逐步生成醇、醛及脂肪酸，再经相应的酶促反应，最终降解成二氧化碳和水。

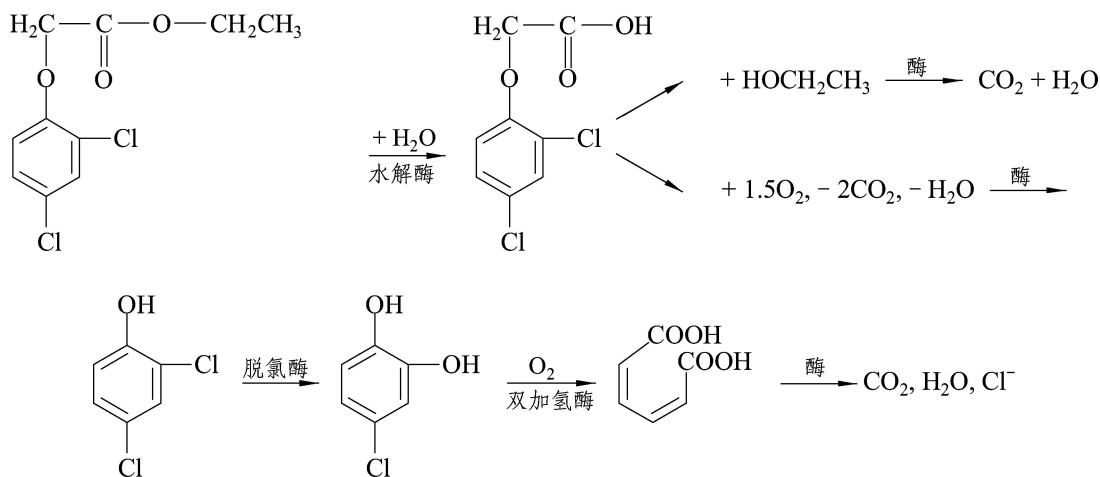
烯烃的微生物降解途径主要是烯的饱和末端氧化，再经与正烷烃相同的途径成为不饱和脂肪酸。或者是不饱和末端双键氧化成为环氧化合物，然后形成饱和脂肪酸，经相应的酶促反应，最终降解成二氧化碳和水。

2) 农药的生物降解

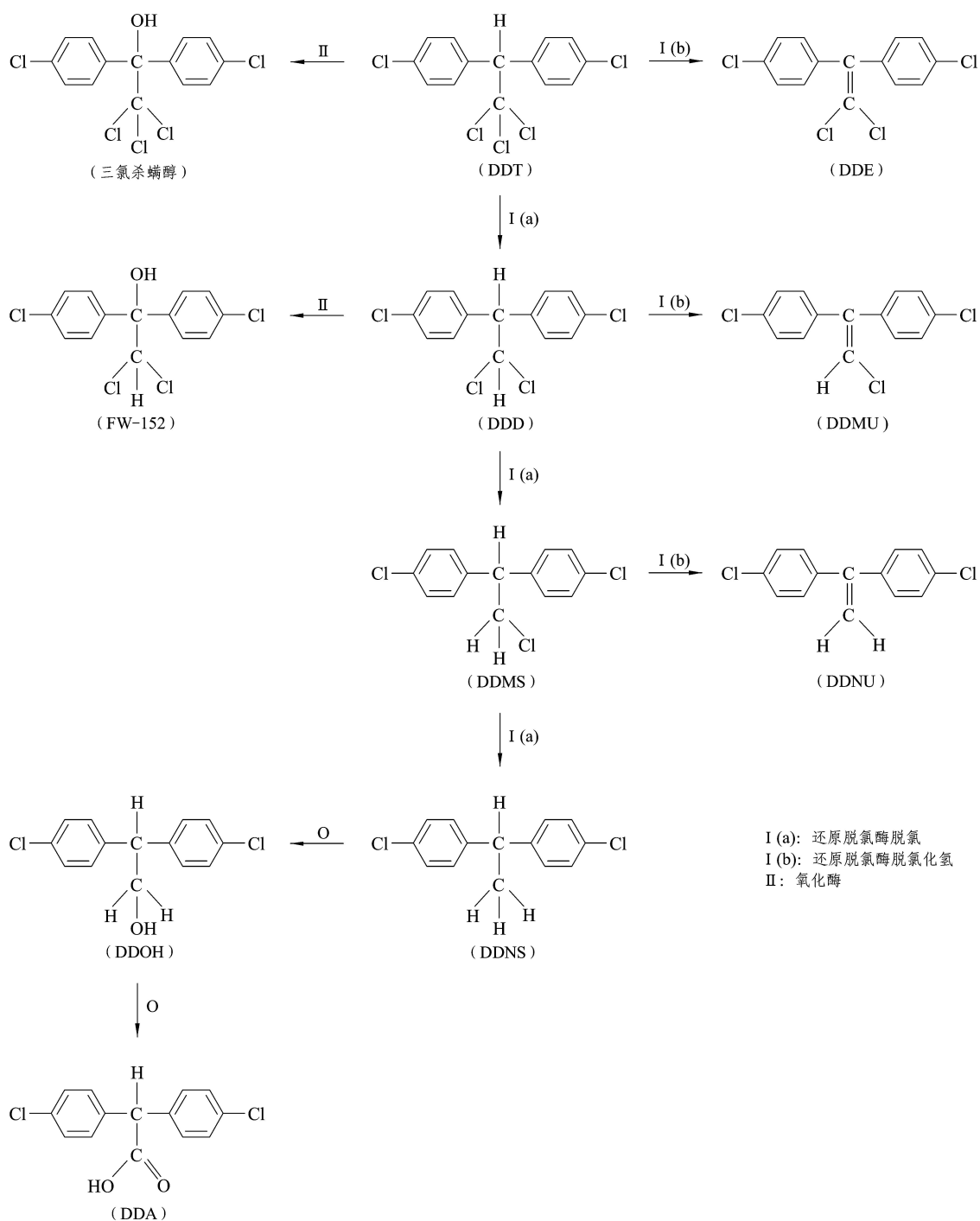
进入环境中的农药，首先对环境中的微生物有抑制作用；与此同时，环境中的微生物也会利用这些有机农药为能源进行降解作用，使各种有机农药彻底分解为二氧化碳而最后消失。农药的生物降解对环境质量的改善十分重要。用于控制植物的除草剂和用于控制昆虫的杀虫剂，通常对微生物没有任何有害影响。然而有效的杀菌剂则必然具有对微生物的毒害作用。环境中微生物的种类繁多，各种农药在不同的条件下，分解形式多种多样，主要有氧化、还原、水解、脱卤、脱烃、环的断裂。

环境中农药的降解是由以上各种途径的一种或多种完成的。现就一些典型的农药降解途径作一具体说明。

(1) 2, 4-D 乙酯的生物降解。苯氧乙酸及其衍生物常作为除草剂使用，其中的 2, 4-D 乙酯的生物降解途径如下所示。其他此类农药的降解途径与其类同。



(2) DDT 农药的生物降解。微生物降解 DDT 的简要图示如下所示。DDT 是一种人工合成的高效广谱有机氯杀虫剂，广泛用于农业、畜牧业、林业及卫生保健事业。1874 年由德国化学家宰特勒首次合成，直到 1939 年才由瑞士人米勒发现其具有杀虫性能。第二次世界大战后，其作为强力杀虫剂在世界范围内广泛使用，在农业丰产和预防传染疾病等方面作出了重大贡献。



人们一直以为 DDT 之类的有机氯农药是低毒安全的，后来发现它的理化性质稳定，在食品和自然界中可以长期残留，在环境中能通过食物链大大富集；进入生物体后，因脂溶性强，可长期在脂肪组织中蓄积。因此，对使用有机氯农药所造成的环境污染和对人体健康的潜在危险才日益引起人们的重视和不安。此外，由于长期使用，一些虫类对其产生了耐药性，导致使用剂量越来越大，造成了全球性的环境污染问题。鉴于此，DDT 已经被包括我国在内的

许多国家禁止使用。但由于其不易降解，在环境中仍然有大量的残留。

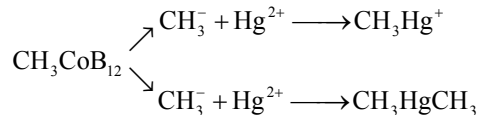
5.2.3 微生物对重金属元素的降解转化作用

环境中金属离子长期存在的结果，使自然界中形成了一些特殊微生物，它们对有毒金属离子具有抗性，可使金属元素发生转化作用。汞、铅、锡、硒、砷等金属或类金属离子能够在微生物的作用下发生转化。下面以汞为例说明微生物对重金属的转化作用。

汞在环境中的存在形态有金属汞、无机汞和有机汞化合物三种。各形态的汞一般具有毒性，但毒性大小不同，其顺序可以按无机汞、金属汞和有机汞的顺序递增。烷基汞是已知的毒性最大的汞化合物，其中甲基汞的毒性最大。甲基汞脂溶性大，化学性质稳定，容易被生物吸收，难以代谢消除，能在食物链中逐级传递放大，最后由鱼类等进入人体。汞的微生物转化主要方式是生物甲基化和还原作用。

5.2.3.1 汞的甲基化

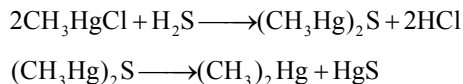
汞的甲基化产物有一甲基汞和二甲基汞。甲基钴氨素（ $\text{CH}_3\text{CoB}_{12}$ ）是金属甲基化过程中甲基基团的重要生物来源。当含汞污水排入水体后，无机汞被颗粒物吸着沉入水底，通过微生物体内的甲基钴氨酸转移酶进行汞的甲基化转变。在微生物的作用下，甲基钴氨酸中的甲基能以 CH_3^- 的形式与 Hg^{2+} 作用生成甲基汞，反应式为



以上反应无论在好氧条件下还是在厌氧条件下，只要有甲基钴氨素存在，在微生物作用下就能实现。

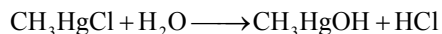
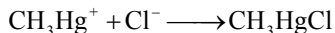
汞的甲基化既可在厌氧条件下发生，也可在好氧条件下发生。在厌氧条件下，主要转化为二甲基汞。二甲基汞难溶于水，有挥发性，易散逸到大气中，但二甲基汞容易被光解为甲烷、乙烷和汞，故大气中二甲基汞存在量很少。在好氧条件下，主要转化为一甲基汞，在 $\text{pH}=4\sim 5$ 的弱酸性水中，二甲基汞也可以转化为一甲基汞。一甲基汞为水溶性物质，易被生物吸收而进入食物链。

汞的甲基化是在微生物存在下完成的。这一过程既可在水体的淤泥中进行，也可在鱼体内进行。 Hg^{2+} 还能在乙醛、乙醇和甲醇作用下经紫外线辐射进行甲基化。这一过程比微生物的甲基化要快得多。但 Cl^- 对光化学过程有抑制作用，故可推知在海水中上述过程进行缓慢。据研究，一甲基汞的形成速率要比二甲基汞大 6000 倍。但是在有 H_2S 存在的条件下，则容易转化为二甲基汞，其反应为



这一过程可使不饱和的甲基完全甲基化。一甲基汞可因氯化物浓度和 pH 不同而形成氯化

甲基汞或氢氧化甲基汞:



在中性和酸性条件下, 氯化甲基汞是主要形态。

影响无机汞甲基化的因素有很多, 主要有以下几方面。

(1) 无机汞的形态。研究表明, 只有 Hg^{2+} 对甲基化是有效的, Hg^{2+} 浓度越高, 对甲基化越有利。排入水体的其他各种形态的汞都要转化为 Hg^{2+} 才能甲基化。

(2) 微生物的数量和种类。参与甲基化过程的微生物越多, 甲基汞合成的速度就越快。所以水环境中汞的甲基化往往发生在有机沉积物的最上层和悬浮的有机质部分。但是, 有些微生物能把甲基汞分解成甲烷和元素汞等 (反甲基化作用), 反甲基化微生物的数量则影响和控制着甲基汞的分解速度。

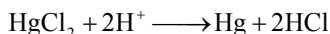
(3) 温度、营养物及 pH。由于甲基化速度与反甲基化速度都与微生物的活动有关, 所以在一定的 pH 条件下 (一般 pH 为 4.5~6.5), 适当升高温度, 增加营养物质, 必然促进微生物的活动, 因而有利于甲基化或反甲基化作用的进行。

(4) 水体其他物质。如当水体中存在大量 Cl^- 或 H_2S 时, 由于 Cl^- 对汞离子有强烈的配合作用, H_2S 与汞离子形成溶解度极小的硫化汞, 降低了汞离子浓度而使甲基化速度减慢。

甲基汞与二甲基汞可以相互转化, 主要决定于环境的 pH。据研究, 不论是在实验室还是在自然界的沉积物中, 合成甲基汞的最佳 pH 都是 4.5。在较高的 pH 下易生成二甲基汞, 在较低的 pH 下二甲基汞可转变为甲基汞。

5.2.3.2 还原作用

在水体的底质中还可能存在一类抗汞微生物, 能使甲基汞或无机汞变成金属汞。这是微生物以还原作用转化汞的途径, 如



汞的还原作用反应方向恰好与汞的生物甲基化方向相反, 故又称为生物去甲基化。常见的抗汞微生物是假单胞菌属。

5.3 环境污染对人类的影响

5.3.1 污染物质的毒性

5.3.1.1 毒物

毒物是指进入生物机体后能使其体液和组织发生生物化学反应的变化, 干扰或破坏生物

机体的正常生理功能并引起暂时性或持久性的病理损害，甚至危及生命的物质。这一定义受到很多限制性因素的影响，如进入机体的物质数量、生物种类、生物暴露于毒物的方式等。例如，钙是人及生物所必需的一种营养元素，但是它在人体血清中的最适宜营养浓度范围是90~95 mg/L，如果超出这一范围，便会引起生理病理反应。当血清中钙的含量过高时会发生钙过多症，主要症状是肾功能失常；而钙在血清中的含量过低时，又会发生钙缺乏症，引起肌肉痉挛、局部麻痹等。

其他一些物质或元素也存在同钙一样的情况。不同的毒物或同一种毒物在不同条件下的毒性是有差别的。影响毒物毒性的因素比较复杂，主要有毒物的化学结构及理化性质、毒物所处的机体因素、机体暴露于毒物的状况、生物因素、生物所处的环境等。

5.3.1.2 毒物的联合作用

在实际环境中往往同时存在多种污染物质，这些污染物对有机体同时产生的毒性，可能不同于其中任何一种毒物单独存在对生物体的毒害作用。两种或两种以上的毒物同时作用于机体所产生的综合毒性称为毒物的联合作用。毒物的联合作用主要包括协同作用、相加作用和拮抗作用。下面以死亡率作为毒性指标分别进行讨论，假设两种毒物单独作用的死亡率分别为 M_1 和 M_2 ，联合作用的死亡率为 M 。

1) 协同作用

毒物联合作用的毒性，大于其中各个毒物成分单独作用毒性的总和。在协同作用中，其中某一种毒物成分的存在能使机体对其他毒物成分的吸收加强、降解受阻、排泄延迟、蓄积增加或产生高毒代谢物等，使混合物的毒性增加。如四氯化碳和乙醇、臭氧和硫酸气溶胶等二者混合后，其混合物的毒性增加。协同作用的死亡率为 $M > M_1 + M_2$ 。

2) 相加作用

毒物联合作用的毒性，等于其中各毒物成分单独作用毒性的总和。在相加作用中各毒物成分均可以按比例取代另一种毒物成分，而混合物毒性均无改变。当各毒物的化学结构相近、性质相似、对机体作用的部位及机理相同时，它们的联合作用结果往往呈现毒性相加作用。如丙烯腈和乙腈、稻瘟净和乐果等。相加作用的死亡率为 $M = M_1 + M_2$ 。

3) 拮抗作用

毒物联合作用的毒性低于其中各毒物成分单独作用毒性的总和。在拮抗作用中，其中某一种毒物成分的存在能使机体对其他毒物成分的降解加速、排泄加速、吸收减少或产生低毒代谢物等，使混合物毒性降低。如二氯乙烷和乙醇、亚硝酸和氰化物、硒和汞、硒和镉等。拮抗作用的死亡率为 $M < M_1 + M_2$ 。

5.3.1.3 毒物的生物化学作用机制

毒物及其代谢产物与机体靶器官的受体之间的生物化学反应及其机制，是毒作用的启动过程，在毒理学和毒理化学中占据重要地位。毒作用的生化反应及机制内容很多，下面对三致性毒物加以简单介绍。三致性毒物是指那些进入人体后能致癌、致畸或致突变的毒物。三致性毒物在环境中普遍存在，其种类多得不可胜数。幸好在容量极大的环境介质中，它们的数量或浓度还是相当稀少的。但若在人体和其他生物体内长期累积，极有可能造成巨大的无法估量的后果。

1) 致突变作用

致突变性是指生物体中细胞的遗传性质在受到外源性化学毒物低剂量（或是慢性中毒水平）的影响和损伤时，以不连续的跳跃形式发生了突然的变异。具有致突变作用的污染物质称为致突变物。致突变作用分为基因突变和染色体突变两种。突变的结果不是产生了与意图不符的酶，就是导致酶的基本功能完全丧失。突变可以使个体生物之间产生差异，有利于自然选择和最终形成最适宜的新物种。然而大多数的突变是有害的，因此可以引起突变的致突变物受到了人们特殊的关注。

许多致癌性化学毒物也都具有致突变的作用。如致突变作用发生在一般体细胞时，则不具有遗传性质，而是使细胞发生不正常的分裂和增生，其结果表现为癌的形成。致突变作用如影响生殖细胞而使之产生突变，就有可能产生遗传特性的改变而影响下一代，即将这种变化传递给子代细胞，使之具有新的遗传特性。为了与致癌性相区别，一般所说的致突变性指的是上述后一种情况。凡能直接或间接影响机体的遗传物质从而导致基因结构发生永久性变化的化学物质，都可称为遗传毒物。具有致突变性的遗传毒物与致癌剂一样，广泛地分布在人们的生活环境之中。

常见的具有致突变作用的有毒物质包括亚硝酸胺类、苯并[α]芘、甲醛、苯、砷、铅、烷基汞化物、甲基硫磷、敌敌畏、百草枯和黄曲霉素 B₁ 等。

亚硝酸胺类化学物质是人体的最主要致癌物，且很容易通过人体内的生物化学反应合成产生。其前驱物是硝酸盐、亚硝酸盐和蛋白质、氨基酸等。有人提出，日本人患胃癌者众多，与日本人多吃腌菜和海鱼有关。因为咸菜中含较多硝酸盐和亚硝酸盐，而海鱼中含有较多胺类化合物，进入人体内的这两类化合物可通过亚硝基化作用后结合成亚硝酸胺而致癌。比如，二甲基亚硝酸胺在常态下是沸点为 152 °C 的黄色油状液体。它是一种典型的三致性毒物，即使是微量进入机体，也会使各种鼠类、家兔、鳟鱼、鸟类等动物体内诱发肝癌、肾癌、肺癌、血管癌等。胚胎对二甲基亚硝酸胺的致癌作用非常敏感，给怀孕动物饲以一定量的二甲基亚硝酸胺，可导致胚胎产生良性或恶性肿瘤且兼有致畸和致突变作用。由于它的主要体内代谢部位在肝脏，首先会表现出肝中毒，即引起肝小叶中心坏死以至引发肝癌。

苯并[α]芘是熔点为 252 °C 的黄色结晶物。它是一种最典型的三致性环境毒物，因为其存在极普遍，在环境中又极稳定，被认为是环境样品中多环芳烃类化合物存在与否的指示物。苯并[α]芘在煤焦油中多量存在，还存在于有关厂区的空气及汽车尾气、香烟烟雾、熏鱼和熏

肉等食品之中。它对很多种动物和人体的致癌作用已无异议。一个人在 40 年内累计摄入 80 mg 苯并[α]芘即可致癌。其在 1 000 支香烟中含量为 1.22~2.0 μg, 吸烟者比不吸烟者得肺癌的危险性要大得多。

最典型的致突变物质是几年前就进行过大量研究的一种诱变剂“三联体”, 其名称是三磷酸酯。它是一种阻燃化学品, 过去用于治疗小儿失眠。它除能致突变外, 还能引起癌变和实验动物不育症。

2) 致畸作用

遗传因素、物理因素、化学因素、生物因素、母体营养缺乏或内分泌障碍等引起的先天性畸形作用, 称为致畸作用。具有致畸作用的有毒物质称为致畸物。致畸性是指外源性环境因素对母体内胎儿产生毒性, 以致出现新生儿体形或器官方面畸变的现象。虽然新生儿中有些具有先天性缺陷, 但其中只有 5%~10%是由致畸因素引起的, 25%左右是由遗传造成的, 其他 60%~65%原因不明, 可能是遗传因素和环境因素相互作用的结果。目前已经确认, 有 25 种化学物质是人类致畸胎剂。但动物致畸胎剂却有 800 多种, 显然其中有许多可能是人类的致畸胎剂。

最典型的人类致畸胎剂的例子是“反应停”(塞利多米-苯太戊二酰亚胺)。反应停是 1960—1961 年在欧洲和日本广泛使用过的镇静安眠药。若在怀孕后 35~50 d 之间服用反应停, 会使未完全发育的胎儿长出枝状物。这种药物自 1957 年起开始在德国的医院和家庭使用, 看来并无任何毒副作用, 以致不需医师处方就可在药房购得。直至 1961 年德国一名小儿科医师提出警告, 指出这种新的镇痛催眠剂于妊娠初期服用, 很有可能产生畸形儿。

1961 年日本的一名新生儿罹患了四肢短小外形的海狗症。其母亲在妊娠初期的 5~7 周间曾服用“反应停”。在此后两年内, 包括德国和日本在内的 10 多个国家先后采取了停止市场供应和收回散出药品的措施, 但为时已晚。日本患海狗症的婴儿达 1000 名之多, 而世界上患者总数达 10 000 名。

可引起致畸性的其他药物或化学毒物还有很多。比如甲基汞对人的致畸作用也是大家所熟知的。除安眠药、镇痛药外, 还有抗生素、激素(不足)、维生素(不足或过量)及农药、甲基汞、硫酸镉等化学毒物。据报道, 2001 年 9 月 10 日, 在四川省南部县永定村出生一名“双面男婴”。生产孕妇在怀孕期间较多服用了以中草药为主的抗真菌类药物。放射性作用也是致畸的一种重要的外源性因素。1945 年美国对日本投掷原子弹。在距爆炸中心 1 200 m 处的 7 名孕妇因受核辐照, 日后都产下了畸形儿。在 1999 年的南斯拉夫战事中, 北约军事集团以 3 000 枚炸弹和 1 000 枚导弹连续 78 d 轰炸南联盟国土, 除造成全域化学污染外, 弹头中所含 23 t 贫铀会产生强烈的放射性污染。有关专家指出, 经过几年之后, 流产孕妇、患癌症者的人数将明显增加, 先天性残缺婴幼儿也会多量出现。并由此发出警告, 告诫该地域的妇女在最近几年内避免怀孕和生育; 劝告怀胎不足 9 周的孕妇堕胎, 以避免产出畸形儿。

致畸作用的生化机制总的来说还不清楚, 一般认为可能有以下几种: 致畸物干扰生殖细胞遗传物质的合成, 从而改变了核酸在细胞复制中的功能; 致畸物引起粒染色体数目缺少或过多; 致畸物抑制了酶的活性; 致畸物使胎儿失去必需的物质从而干扰了向胎儿的能量供给或改变了胎盘细胞壁膜的通透性。

3) 致癌作用

体细胞失去控制的生长现象称为癌症。在动物和人体中能引起癌症的化学物质叫致癌物。致癌性是环境毒物诱发人体内滋生恶性肿瘤或良性肿瘤的一种远期性作用。虽然肿瘤的病因学十分复杂,其中有些问题还不十分清楚,但可以确定的是多数肿瘤的发病与不良生活环境因素有关,而其中化学性毒物因素又占有重要地位。通常认为致癌作用与致突变作用之间有密切的关系。实际上,所有的致癌物都是致突变剂,但尚未证实它们之间能够互变。因此,致癌物作用于 DNA,并可能组织控制细胞生长物的合成。据估计,人类癌症 80%~90%与化学致癌物有关,在化学致癌物中又以合成化学物质为主,因此化学品与人类癌症的关系密切,受到多门学科和公众的极大关注。

致癌物的分类方法很多,根据性质划分可以分为化学(性)致癌物、物理(性)致癌物(如 X 射线、放射性核素)和生物(性)致癌物(如某些致癌病毒)。按照对人和动物致癌作用的不同,可以分为确证致癌物、可疑致癌物和潜在致癌物。

(1) 确证致癌物是经人群流行病学调查和动物试验均已证实确有致癌作用的化学物质。

(2) 可疑致癌物是以确定对实验动物有致癌作用,而对人致癌性证据尚不充分的化学物质。

(3) 潜在致癌物是对实验动物致癌,但无任何资料表明对人有致癌作用的化学物质。目前确定为动物致癌的化学物达到 3 000 多种,确认为对人类有致癌作用的化学物有 20 多种,如苯并[α]芘、二甲基亚硝胺等。

根据化学致癌物的作用机理可以分为遗传性致癌物和非遗传性致癌物。遗传性致癌物可细分为两种。一种是直接致癌物,即能直接与 DNA 反应引起 DNA 基因突变的致癌物,如双氯甲醚。另一种是间接致癌物,又称前致癌物,它们不能与 DNA 反应而需要机体代谢活化转变,经过近致癌物至终致癌物才能与 DNA 反应导致遗传密码的修改,如苯并[α]芘、二甲基亚硝胺、砷及其化合物等。

非遗传致癌物不与 DNA 反应,而是通过其他机制影响或呈现致癌作用。包括促癌物,可以使已经癌变的细胞不断增殖而形成瘤块,如巴豆油中的巴豆醇二酯、雌性激素己烯雌酚等。助致癌物可以加速细胞癌变和已癌变细胞增殖成瘤块,如二氧化硫、乙醇、十二烷、石棉、塑料、玻璃等。此外还有其他种类的化合物,如铬、镍、砷等若干种金属(类金属)的单质及其无机化合物对动物是致癌的,有的对人也是致癌的。

化学致癌物的致癌机制非常复杂,仍在探究之中。关于遗传性致癌物的致癌机制,一般认为有两个阶段:第一是引发阶段,即致癌物与 DNA 反应,引起基因突变,导致遗传密码改变。第二是促长阶段,主要是突变细胞改变了遗传信息的表达,增殖成为肿瘤,其中恶性肿瘤还会向机体其他部位扩展。

5.3.2 有毒重金属的影响

5.3.2.1 有毒重金属

有毒重金属对人体健康的影响可以通过两种形态：化合态和元素态实现。下面主要讲述一些毒性较大的重金属。

1) 镉 (Cd)

镉对几种重要的酶有负面影响，也能导致骨骼软化和肾损害。吸入镉氧化物尘埃或烟雾将导致镉肺炎，特征是水肿和肺上皮组织坏死。

2) 铅 (Pb)

铅分布广泛，形态有金属铅、无机化合物和金属有机化合物。铅有多种毒性效应，包括抑制血红素的合成，对中央和外围神经系统以及肾有负面效应，其有效毒效应已被广泛研究。

3) 铍 (Be)

铍是一种毒性很强的元素，它最严重的毒性是引起肺纤维化和肺炎。这种疾病能潜伏 5~20 年。铍还是一种感光乳剂增感剂，暴露其中将导致皮肤肉芽肿病和皮肤溃烂。

4) 汞 (Hg)

汞能通过呼吸道进入人体内，通过血液循环进入脑组织渗透血-脑屏障。汞破坏脑代谢过程，导致颤动和精神病理特征，如胆怯、失眠、消沉和易怒等。二价汞离子 (Hg^{2+}) 损害肾脏。有机金属汞化合物如二甲基汞毒性更大。

5.3.2.2 有毒重金属的作用机理

一种重金属是否会使生物体中毒，与该重金属离子的性质、浓度、摄取方式、生物体的机体种类和健康状况等因素都有关系。重金属可以通过消化道、呼吸道和皮肤吸收三个途径进入生物体内。当饮用水和食品遭到重金属污染时，可经由消化道进入人体。例如，在有汞污染的水体中饲养鱼，鱼体内会富集甲基汞；土壤或灌溉水受到了镉污染，生长的稻米中镉含量会显著升高。对于挥发性较强的重金属化合物，如汞蒸气，容易被人吸收到体内，由于肺部阻挡金属入侵的机能不如消化道，因此造成的毒害往往更严重。使用含重金属化合物的物品和试剂，也可使重金属沾染到人的皮肤上，通过皮肤吸收到体内。

从分子水平上概括重金属中毒的机理，主要有三种情况：① 重金属妨碍了生物大分子的重要生物机能；② 重金属取代了生物大分子中的必要元素；③ 重金属改变了生物大分子具有活性部位的构象。重金属进入生物体内就会很快被吸收到血液中，然后运送到各个内脏器官。有些脏器具有封闭金属离子的屏蔽作用，如血-脑屏障、胎盘屏障，可对大脑和胎儿起到保护作用。细胞膜也具有一定的屏障作用。一般来说，重金属无机化合物不易通过这些屏障，而重金属有机化合物的有机基团部分增大了整个分子的脂溶性，使它们很容易穿过上述屏障，并在组织器官中蓄积，造成严重的毒害。

迄今为止，在所有遭受重金属毒害的离子中，发生在日本的震惊世界的水俣病和骨痛病

事件是最典型和影响最大的。这两次事件分别是由汞和镉两种重金属元素引起的，这两种金属也因此被列在重金属“五毒”之首。

5.3.3 有毒有机物的影响

1) 烷烃

气态的甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷和异丁烷被看成是简单的窒息剂，同空气混合减少了人体吸入空气中的氧气。与烷烃有关的最常见职业病是皮炎，由皮肤脂肪部分分解引起，表现为发炎、干燥和鳞状皮肤。吸入5~8个碳的直链或支链烷烃蒸气会导致中枢神经系统消沉，表现为头昏眼花和失去协调性。暴露在正己烷和环己烷环境中将引起髓磷脂的丧失以及神经细胞轴突的衰退。这将导致神经系统多种失调，包括肌肉虚弱及手脚感觉功能的减弱。在体内正己烷代谢为2,5-己二酮。这种第一类反应的氧化产物能在暴露个体的尿液中观察到，被用作暴露于正己烷中的生物指示。

2) 烯烃和炔烃

乙烯(C_2H_4)是一种广泛使用的气体，无色、略有芳香味，表现为简单窒息剂以及对动物有麻醉作用和对植物有毒害作用。丙烯(C_3H_6)的毒理性质与乙烯相似。无色无味的1,3-丁二烯对眼睛和呼吸道黏膜有刺激性；在高浓度下，能导致失去知觉甚至死亡。乙炔(C_2H_2)是无色有大蒜味的气体，它表现为窒息作用和致幻作用，导致头疼、头昏眼花以及胃部干扰。

3) 苯

吸入人体内的苯很容易被血液吸收，脂肪组织从血液中很强烈地吸收苯。苯具有独特的毒性，可能主要是由反应中生成的活泼短寿期的环氧化物引起的。苯能刺激皮肤，逐渐较高浓度地暴露能导致皮肤红斑、水肿和水泡等疾病。在1h内吸入含 7 g/m^3 苯的空气将导致严重中毒，对中枢神经系统有致幻作用，逐渐表现为激动、消沉、呼吸停止以及死亡。吸入含 60 g/m^3 苯的空气，几分钟就能致死。长期暴露在低浓度苯环境中会导致不规则的症状，包括疲劳、头疼和食欲不振。慢性苯中毒导致血液反常，包括白细胞降低、血液中淋巴细胞反常增加、贫血等，以及损害骨髓。苯还可以导致白血病和癌症的发生。

4) 甲苯

甲苯是无色液体，毒性中等，通过吸入或摄取进入体内。皮肤暴露的毒性低。低剂量的甲苯可引起头疼、恶心、疲乏及协调性降低；大剂量的暴露引起致幻效应而导致昏迷。

5) 萘

萘与苯的情况类似，萘的暴露能导致贫血，红细胞数、血色素和血细胞显著减少，尤其

对于那些有先天遗传的易感人群，危害更大。茶对皮肤有刺激性，对易感人群会引起严重的皮炎。吸入或摄取茶会引起头疼、意识混淆和呕吐。在严重中毒的情况下，会因肾衰竭而死亡。

6) 多环芳烃

多环芳烃大部分被认为是致癌物质，最典型的多环芳烃是苯并[α]芘。

7) 醇类

由于工业品和日常消费品的广泛使用，人们暴露于甲醇、乙醇和乙二醇中很普遍。甲醇能导致多种中毒效应，发生事故或作为饮料乙醇代用品摄入，在代谢过程中氧化成甲醛和甲酸。除导致酸毒症外，这些产物影响中枢神经系统和视觉神经。致命剂量急性暴露起始表现为轻微醉意，然后昏迷、心跳减缓、死亡。亚致命剂量暴露能使视觉神经系统和视网膜中心细胞退化，从而导致失明。

乙醇通常通过胃和肠摄取，但也易以蒸气形式被肺泡吸收。乙醇在代谢中氧化比甲醇快，先氧化成乙醛，然后是二氧化碳。乙醇有多种急性效应，源于中枢神经系统消沉。人体摄入乙醇达到一定浓度时会出现昏睡和陶醉，超过一定浓度时将会导致死亡。乙醇也有很多慢性效应，最突出的是酒精上瘾和肝硬化。

乙二醇可以刺激中枢神经系统，使之消沉，还能导致酸血症。

8) 苯酚

苯酚被广泛用作伤口和外科手术的消毒剂，是一种原形质的毒物，能杀死所有种类的细胞。自从被广泛使用以来已经导致了惊人数目的中毒事件。苯酚的急性中毒主要是对中枢神经系统的作用，暴露 1.5 h 就会致死。苯酚急性中毒能导致严重的肠胃干扰、肾功能障碍、循环系统失调、肺水肿以及痉挛。苯酚的致命剂量可以通过皮肤吸收达到。慢性苯酚暴露损害关键器官，包括脾脏、胰腺和肾脏。其他酚类的毒理效应与苯酚类似。

9) 醛和酮

醛和酮是含有羰基 ($\text{C}=\text{O}$) 的化合物。醛类最重要的是甲醛。甲醛是一种有辛辣、令人窒息气味的无色气体，常见的是被称为福尔马林的商品，含少量的甲醇。吸入暴露是因为由呼吸道吸入甲醛蒸气，其他暴露通常是因为福尔马林。连续长时间的甲醛暴露能引起过敏，对呼吸道和消化道黏膜有严重的刺激。动物实验发现甲醛可导致肺癌。甲醛的毒性主要是因为其代谢产物甲酸。

酮类比醛类的毒性小。有愉快气味的丙酮是一种致幻剂，可以通过溶解于皮肤的脂肪导致皮炎。对甲基乙基酮的毒性效应，目前了解不多，被怀疑是导致鞋厂工人神经失调的原因。

10) 羧酸

甲酸是一种相当强的酸，对组织有腐蚀性。尽管含有 4%~6% 乙酸的醋是许多食物的调

味品，接触乙酸（冰醋酸）对组织腐蚀性极强。摄入或皮肤接触丙烯酸能使组织严重受损。

11) 醚

一般醚类化合物毒性相对较低，因为含有活性较低的醚键（C—O—C），其中 C—O 键不易断裂。挥发性的乙醚暴露通常是吸入的，进入人体内的乙醚约 80% 不能代谢而通过肺排出体外。乙醚能使中枢神经消沉，是一种镇静剂，被广泛用作外科手术的麻醉剂。低剂量的乙醚能催眠、发醉和致昏迷，高剂量将会导致失去意识和死亡。

12) 硝基化合物

最简单的硝基化合物是硝基甲烷，为油状液体，能导致厌食、腹泻、恶心和呕吐，损害肾脏和肝脏。硝基苯为浅黄色油状液体，能通过各种途径进入体内。其中毒作用与苯胺类似，把血红细胞转换成高血蛋白，使之失去载氧能力。

