

1

生态毒理学的基本概论

1.1 生态毒理学的定义、研究内容及其意义

1.1.1 生态毒理学的定义

生态毒理学 (Ecotoxicology; Ecological Toxicology) 是研究有毒物质对生态系统的作用与影响, 以及有毒物质在生态系统中的运转、循环与归宿规律的科学。生态毒理学的研究对象是环境中潜在的有毒物质, 研究的目标是鉴定、预测和分析环境中有毒物质潜在的影响。生态毒理学的研究成果可作为突发中毒事件处置、危险化学品安全评估、生态风险评估、环境质量评估、环境质量标准 and 有毒物质管理与相关法律法规制定的科学依据。

生态毒理学是毒理学与生态学相互渗透而形成的边缘科学。生态毒理学研究有毒物质对生态系统的影响, 生态学不仅是生态毒理学的基础, 也为生态毒理学理论的形成提供了一个框架。因此, 在一定意义上说, 生态毒理学既是生态学的一门分支学科, 又是毒理学的一门分支学科。

生态毒理学与基础毒理学之间的区别在于, 生态毒理学着重研究有毒物质对整个生态系统中的各种生物群体的影响, 而基础毒理学主要在个体水平上研究物

质的影响。毒理学是一门古老的学科，它通过大量地对单一物种特别是人类的观察和实验，早已积累了对生命机能及其相互关系的大量知识，对生态毒理学的形成起着重要作用。

生态毒理学的出现和发展，使毒理学从生物个体水平的研究，即进行毒物的化学结构、毒性及毒性机制的研究，发展到研究毒物对生态系统中各级水平的毒性效应，以及它们运动和行为的规律。因而，生态毒理学工作者必须超出已有的毒理学研究领域，运用生态学原理，采用新的研究手段和方法，系统地进行以下几个方面的研究：① 毒物进入（或存在于）环境中的总量；② 环境中毒物的残留及最终归宿 ③ 毒物及其代谢产物（或在环境中发生变化的产物）对种群及群落的毒性；毒物在生态系统中转移的范围、速度、逐级富集，及转移过程中生物降解或生物活化的条件和性质；⑤ 毒物对生态系统结构与功能的影响；⑥ 毒物在生态环境中的监测和预报 ⑦ 应用生态工程与生物技术减少或根除毒物的毒性和危害。

生态毒理学与环境毒理学也有一定的联系。环境毒理学是研究环境毒物对人、动物和植物的有毒有害作用，以及环境污染对人类和动植物产生的毒理学后果。而生态毒理学则是除了上述内容外，还要研究毒物在各个生物层次上对生物群体的影响，以及这些影响对生态系统平衡与非平衡的关系。在研究方式上，生态毒理学首先要摸清进入环境中的毒物的种类、性质、产生的速度和量，及其变化规律；其次要阐明毒物对各种生物群体的生物学作用，为保护环境和人类健康以及生物界的兴盛提供科学依据。由此可见，生态毒理学的发展离不开生态学、毒理学和环境化学等多学科的合作与努力（图 1-1）。

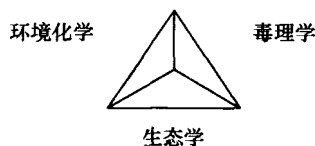


图 1-1 生态毒理学的学科构成

生态毒理学是 20 世纪 70 年代新发展起来的一个分支学科，并成为 21 世纪的一门正在发展的新兴学科，无论在理论方面还是方法论方面都处在探索阶段。可以肯定，加强生态毒理学研究，必将为我国的生物安全、生态安全和食品安全以及保护生态环境、加强环境管理做出重要贡献。当前的任务，一是要求毒理学与生态学工作者密切合作，共同努力，促进毒理学原理与我国实际相结合，形成中国特色的生态毒理学，解决基础理论薄弱问题和治理实际存在的生态问题；二是培养一批具有相当广泛知识的“横向人才”，即懂得生态学的毒理学家和懂得毒理学的生态学家，以满足社会发展的需要；三是建立各种类型的生态毒理学研究试验基地，建立预警体系，加强生态毒性灾害的预测预报；四是依照生态毒理学原理，积极采用生态工程等更多的新技术、新成果，为保护我国的生态环境，促进国民经济协调、稳

定和健康的发展。

1.1.2 生态毒理学研究的主要内容

1.1.2.1 毒物与污染物在物理环境中释放、分布、行为及其与物理、化学环境的相互作用

毒物与污染物包括毒物与污染物种类、状态，影响分布的因素和发生的变化。例如，用氯气对自来水消毒可使水中形成一些持久的有机氯物质，这些物质可能致癌。用臭氧处理水也可以形成氮氧化物，通过“ $O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$ ”的反应释放氧并减少在 16 ~ 28 km 高空的臭氧层，从而增加到达地面的短波辐射，增加皮肤癌的发病率。臭氧减少 $n\%$ ，则致癌活性增加 $2n\%$ 。 SO_2 与喷气式飞机所放出的 NO_2 都可以与上述 NO 同样的方式作用于臭氧。氟利昂 (Freon, Cl_2CF_2) 系列的致冷剂可达到同温层，受短波辐射分解释放出氯，通过“ $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$ ”的反应也可减少臭氧层。

1.1.2.2 毒物与污染物进入生态系统途径及其变化

毒物与污染物进入生态系统途径及其变化主要包括富集和代谢变化。

富集，即研究生物链的污染，特别是污染物在食物链中的转移。根据富集原理，鱼鳃和牡蛎的套膜可以机械地浓缩水中的污染微粒。现已发现澳大利亚和美国的某些受污染的海岸线的牡蛎，其套膜上皮癌的发病率比较高；加拿大的范库弗 (Vancouver) 海湾和美国的加利福尼亚海湾的某些严重污染点上的鱼类的鳃癌发病率比较高。给虹鳟鱼池中投放被黄曲霉毒素污染的饵料，会广泛发生鱼的肝细胞癌。不同的器官、组织还可选择性地积累污染物。例如，重金属在哺乳动物肾脏或软体动物的肝胰腺中积累较多，因此，需要测定这些污染物质的临界浓度和生物学半衰期。

毒物与污染物进入生物体内与酶系统接触，进行代谢，发生三种情况。

第一种情况，产生比原来毒物分子毒性小一些的物质，即去毒作用，称之为生物降解。例如，土壤中的一种变形虫 *Acanthamoeba castellanii* 能降解 DDT (Pollero, 1978) 现代研究的趋势是要尽可能使用能被生物降解的物质，从生态毒理学的观点来说，这是一条正确的原则。

第二种情况，产生比原毒物分子毒性更大的化合物，即生物活化作用，称之为生物毒化。例如，无机汞经微生物转化作用成为对高等哺乳动物具有神经毒性的甲基汞；在硝酸盐细菌作用下，硝酸盐形成亚硝酸盐，它不仅比硝酸盐毒性大，而且可与二级或三级胺类反应生成致癌的亚硝胺类。许多致癌剂和致突变剂先进行

代谢变化而具有致癌或致突变活性。例如，芳香胺的氨基经羟基化作用后，产生硫酸酯类，具有致癌活性。某些分子难于进行任何代谢变化，就积累在活机体中，增加毒性。例如，在除草剂和脱叶剂 2,4,5-T（三氯-2,4,5-苯氧基乙酸）生产过程中因管理不善而产生的杂质多氯对苯并二氧-8-羟基喹啉（polychlorinated parabenzo-dioxins）就是一种稳定、持久和易于生物积累的剧毒致畸物质。高分子栲丹宁（oak tannins）经牛的瘤胃微生物降解产生有毒的低分子酚类化合物，吸收后引起中毒。

第三种情况，与机体化学组成的反应，产生结合作用，或毒物残留。例如，甲壳类能从海水中积累无机砷达到 20~30 mg/kg 的浓度而不受毒害，很可能是砷与蛋白质相结合，否则这样高的浓度将是有害的。许多致癌或致突变剂特别是烷化剂一类，其致癌活性是由于与核酸大分子上一定位置的分子起反应。氧化乙烯可与无机氯化物反应生成有毒的氯醇，而无机氯化物在食物链中实际上是到处存在的。

1.1.2.3 毒物与污染物在生态系统中各种水平上的有毒效应

毒性表达的定性和定量形式

1. 急性或亚急性毒性。在一次性给予或在短时间内连续给予足够大剂量的化学物质后立即产生的或在短期内产生的毒性。常用 LD_{50} 、 LC_{50} 表示。

2. 慢性毒性。由小剂量重复吸收的比較长期的毒性，有时污染物的剂量小到不能引起急性毒性，但因反复吸收，毒性效应逐渐加重，经过比較长的时期后表现出来。表达形式有二种方式。

一是剂量累积。由于物理亲和力作用，芳香族卤素化合物在脂肪组织中的溶解度远远大于水，就易累积在体内脂肪组织中。重金属在化学亲和力的作用下，可与一种特殊的细胞成分结合，或者损害排泄器官以致难于从体内消除。

二是损伤累积。例如，用可致肝癌的偶氮染料甲基黄（对二甲酰基偶氮苯）饲养大鼠，每一个分别的剂量效应积累，似乎是一种“绝对不可逆的效应”的加和。关于致癌剂有无剂量阈值问题现在还有争论，因为分子生物学研究表明，与癌细胞增殖有关的核酸大分子的损伤是可以修复的。

3. “隐性”毒性。小剂量长时间吸收所产生的作用与大剂量短时间吸收所产生的作用，有非常不同的症状，称之为“隐性”毒性。要研究长时间吸收的剂量达到多少才表现出症状来，研究出现这些症状的各个剂量与引起急性效应的剂量有什么不同。例如，在饲料中拌入不同剂量的甲基汞饲养小鼠时，观察到同一症状——“尾的位置异常”，而在大剂量和较小剂量所出现的时间不同。

4. 致畸效应。污染物在子宫内造成对胚胎的毒性效应，产生畸形胚胎。某些具有遗传毒性的物质可产生突变。

5. 其他毒性。包括致癌、致突变效应、免疫抑制效应、行为效应、致敏效应等。各种因素对于毒性或有害表现的影响

1. 生物种类的影响。不同种的生物对于同一化学污染物有毒效应的感受性变化很大，因此，哺乳动物试验的结果外推到人就包含不肯定的因素，必须了解人与实验动物或其他生物的一致性和差异性。实验毒理学的研究结果还要结合流行病学的调查才能正确评价一个毒物。这方面事例很多。例如，青霉素的毒性对大鼠 LD_{50} 为 6 mg/kg 体重，而对小鼠却是 1 800 mg/kg 体重，大约小 300 倍。黄曲霉毒素对小鼠致肝癌不敏感，但 DDT 却很易使小鼠诱发肝癌。棕色鹈鹕母鸟体中残留的 DDE 可使其所产卵壳变薄，导致种群下降或灭绝，这种鸟一次所孵卵数较少，因此卵的孵化成功率对其种群维持就非常关键。而 DDE 残留对灰色苍鹭虽也可致卵壳变薄，但它一次能下更多的卵，可以卵的数量来弥补孵化上的损失，所以对其种群几乎没有毒性效应。

感受性的差别通常用代谢转化过程的差别来解释，但不一定都是如此。鸡对三元甲酚磷酸盐 (triorthocresol phosphate) 敏感，易发生麻痹，但在大鼠却不易发生同样性质的麻痹，也就是对这些化合物不够敏感。有的生物对某一类化合物具有抗性。例如，鹌鹑吃一种伞形科类植物的果实，其中含有毒芹碱，却不受害；但人吃了吃过此种果实的鹌鹑的肉却会中毒。马拉硫磷比对硫磷对哺乳动物的毒性小 150 倍至 200 倍，但它们对大多数昆虫的毒性却相等，这是寻找高效、低毒、低残留的新农药的一个比较好的例子。温血动物对除虫菊酯实际上不敏感，是很有价值的农药。蜗牛的血色素是血蓝蛋白，其辅基含铜，蜗牛对一氧化碳的毒性效应有抗性，是因为一氧化碳对铜色素的亲和力弱，而对含铁的血红蛋白类型的血色素亲和力强。这方面的研究，特别是其生化机理研究，在生态毒理学中占有重要的地位。还可以利用这种选择性来指示污染物，作为生物监测手段。例如，藻类和海星对铜很敏感，鲱鱼很易被黄曲霉毒素诱发肝癌。

2. 发育阶段的影响。胚胎对毒性效应的敏感性。在人类毒理学中已公认胎儿对毒物是特别敏感的。镇静药酞胺哌啶酮 (thalidomide) 是一个惊人的案例。这种药在 1957 年正式出售使用以前也做过常规的毒理试验，当时认为它是所有镇静药中毒性最小的，但后来有一位孕妇在胚胎原基形成阶段（即怀孕后第 23 天至 40 天）吃了此药，生出畸胎。许多国家在那段时期也出现了类似事件。从此才规定对一个新药的毒理试验必须包括致畸效应试验在内。对胚胎的毒性还不至于致畸，怀孕的大鼠注射一次非常低剂量的 N-亚硝基-N-甲基尿素后，产出的大鼠一直长到成熟才发生脑癌。这说明有些胚胎效应要隔一个很长的时期才会表现出来。

幼年的敏感性。在人类毒理学中已确知婴儿和幼儿对许多毒物特别敏感，是因为代谢上的不成熟性，缺乏某些解毒酶类，特别是肝微粒体酶。此外，也因中枢神经系统敏感性高，某些血浆蛋白组分缺少。鱼苗、雏鸟等生物的早期阶段具有较高的敏感性，这对于种群的繁殖与保护，显然具有关键性，因而有很大的生态毒理学意义，需要特别注意，加以特殊的检测。

毒物与污染物之间及各种因素之间相互作用的影响

人和生物在生物圈中都不是仅仅暴露于单一的污染物，而是受到任意施加在一起的许多因素的共同影响。这些因素之间会发生颉颃作用。例如，有机硫衍生物与臭氧或氮蒸气对高等哺乳动物有着颉颃作用。又如硒对于汞的毒性有颉颃作用。1978年 Chmeilnicka 和 Brzenicka 发现硒能减少长期口服汞化合物后所造成的对大鼠肾中金属巯基组氨酸三甲基内盐 (metallothionein) 生物合成的刺激作用。这些因素之间也会发生协同作用。如同时暴露于二氧化硫或烟草的烟雾之中；致癌的多环芳烃与正十二烷等溶剂的协同作用。有些物理因素如辐射能增加化学制剂的毒性。在这方面，研究酶的诱导作用和抑制作用具有很大价值。

建立剂量—效应关系的重要性

药理学和毒理学中的剂量—效应关系的原则，要求可能受到暴露活的机体所吸收的剂量必须小于毒性阈值。生态毒理学的研究不仅需要定性，而且需要定量，才有可能建立允许或耐受限值。人类毒理学在建立剂量—效应关系方面已很有成效，相比之下，生态毒理学迄今进行的研究大多还是定性的。需要有适当的采样和分析方法，对暴露的剂量要有专一而准确的测定。

1.1.3 研究生态毒理学的意义

1.1.3.1 全面认识毒物对生态系统的影响

基础毒理学是以个体水平研究为主来认识污染物的毒性危害，不足以达到全面地完整认识，难以判明毒害的深度和广度。例如，尽管水体中某一污染物的浓度很低，不足以造成对生活在水中的水生生物的明显毒害，但经过食物链的逐级富集，生物体内含量可以逐渐扩大到成千上万倍，最后进入人体就可以对人体造成危害。许多致癌剂都要先经过生物体的代谢转化才具有致癌活性。因此，很有必要从生态毒理学角度进行研究，才能查明其危害。

1.1.3.2 查明毒物直接与间接危害生物和人体健康的机制

环境保护的最终目的是保护人类的健康。毒理学的研究很自然地首先以发展人类毒理学为主体。但是，随着科学技术的进步与生产力的发展，以及生活水平和

生活质量的提高，对“健康”一词的定义现在也有了变化。世界卫生组织（WHO）章程对“健康”所下的定义是“一种完整的身体的、精神的和社会的幸福状态，而不仅是没有疾病和虚弱”。从这个定义出发，就应该研究直接有害于其他生物从而间接地有害于人类健康的污染物的各种效应，这些研究领域则属于生态毒理学范围。例如：

——污染可减少人类的食物来源。有毒工业废水可杀死河流、湖泊中大量鱼类，富营养化使水体缺氧，危害水生生物；氟烟或光化学烟雾使粮食和牲畜受害。

——污染物危害对农业有益的生物。蜜蜂、蚯蚓的减少导致农作物减产。

——某些污染物或其转化产物可使食物链中某些环节成为有毒的，影响食用价值。例如，甲基汞污染鱼类，有机氯杀虫剂进入牛乳。

——病原细菌可以对抗生素产生耐受性。动物体内的细菌（肠杆菌科、假单孢菌等）因饲料添加剂而产生对抗生素的耐受性，这种耐受性能通过质粒而转移到人体内的细菌上来，对人类健康是一种潜在的危险。甚至不一定要通过食物链，因为在自然条件下，细菌之间也可发生质粒转移，这些动物的排泄物排放入环境就有潜在危险。

——污染可能减少纺织工业或森林木材及皮毛种类等原料资源，影响穿用，甚至因森林破坏而发生严重的气候变化和侵蚀。污染也可造成人工建筑物的侵蚀，影响居住。

——自然界的生物学平衡可能被扰乱，或影响有美学和文化价值的物种的存在，从而导致人的整个生活质量下降。例如，卡逊（Rachel Carson）的著作《寂静的春天》中所谈到的农药对鸟类毒害问题。

——污染物可使人所希望保持的生态系统得以连续存活下去的关键性物种减少甚至丧失。分解者的种类，特别是土壤动物群和调节土壤枯枝落叶分解和消化作用的微生物群的减少。

1.1.3.3 为控制污染、制定环境标准和立法提供科学依据

应用生态毒理学研究的数据，可以提供科学分析的依据，进而提出控制污染危害的有效具体措施。特别是利用不同物种对同一污染物的敏感性不同，找寻对人低毒、无毒而对害虫高毒的杀虫剂；利用各种化学物质对生物毒性效应上的颉颃作用减轻污染的危害。

生态毒理学的研究成果，可以确定生物监测的准确方法，寻找污染对生物损害的早期指标，建立预警体系，实现早期预报，以利于采取保护措施。

生态毒理学研究还可为制订各种环境质量标准提供科学依据，例如渔业水质标准，污水灌溉标准，食品卫生标准等。许多国家的生态毒理学实验室承担新化学

物质的生态毒理学试验和综合评价，为政府主管部门的审批提供可靠的科学的法定依据。有关毒物控制与相关的法律法规的制定都离不开生态毒理学的研究工作。

1.2 生态毒理学简史

1.2.1 生态毒理学的诞生

“生态毒理学”(ecotoxicology)这一术语最先是由萨豪特(Thuhaut R)教授于1969年6月在一次国际会议上提出来的。他将“生态毒理学”定义为一门描述不同制剂对活的有机体，特别是对生态系统中的种群和群落的毒性效应的学科。他认为，生态毒理学的要素存在于两大领域：一是对环境的研究，源于生态学；二是对有毒化学物与个体有机体间相互作用的研究，也就是毒理学。

人类总要与他所处的环境相互作用，依靠环境提供建筑材料、衣服、食物等资源。毒理学在人类历史中起了非常重要的作用。例如，箭毒长期被用于猎杀动物作为食物（直到今天在偏远的非洲和南美一些部落仍保留有这一传统）。从古罗马水管的铅污染到现代的二战大屠杀所使用的毒气室等，这里有许多生态学和毒理学问题需要研究。

科学联合会国际理事会(ICSU)的环境问题科学委员会(SCOPE)成立后，由Thuhaut组织和主持了一个生态毒理学研究组。以后几度在国际学术会议上讨论生态毒理学学科的定义。1974年5月在加拿大魁北克举行了北大西洋公约科学委员会生态毒理学学术会议，着重讨论了重金属和有机卤素化合物的效应。1975年9月建立了国际生态毒理学和环境安全协会(ISEES)，成为国际环境安全学会的一部分，并出版了专门的学术刊物——《生态毒理学和环境安全》。从此，生态毒理学这一新学科的出现引起了国际学术界的广泛关注。

1.2.2 化学时代与生态毒理学的形成

进入化学时代的人类社会，常用的化学物质的数目越来越多。据估计，约有7万多种化学物质在全球社会中广泛应用于社会生产生活的各个领域，同时每年还以200~1000种新化合物的速度在增加。这些并不是自然产生的，而是人工生产的外来新化学物质不断增长的趋势，成为新世纪的一个显著特征。

历史上所有的人类社会都在制造废物，并将这些废物通过下水道污水以典型

的处理方式排放到江、河、湖、海等水体中，或者有选择地排到土地或坟地，在相当长的一段时间内自然降解。

这样的水处理在社会规模相对小的时候是容易办到的，但随着人类人口的增长，更大城市的建立，废物的处理变成一个日益棘手的难题，于是提出了适当处理废物的规章和制度。例如，在大约公元 500 年时，雅典的法律就不准在城墙以内倾倒垃圾。在罗马建造了导水管和下水道，并采取措施防止在最重要的水路上处理垃圾。这些古希腊和古罗马的法律，可能是我们所知的最早的法律上强制执行环境保护规章的一部分。

对于生态毒理学来说，工业革命是现代社会的一个转折点。在 18 世纪晚期，人类文明在许多国家发生了根本上的改变，由农业的文明转变为日益工业化的文明。人口统计学表明大量农村人口转入城市和工业中心，并得到了工作，增加了收入，改变了生活方式。大量的煤炭作为燃料生产出蒸汽动力，许多新发明的机器加速了生产。在那个时期，人们认识到生态毒理学方面的第一个问题，是在狭窄的地域内高度工业化的活动。由于工厂都建在离燃料源很近的地方，农村地区迅速转变为工业中心。煤炭的应用导致了地方性和地域性的大气污染。一位名叫 Percival Pott 的伦敦医生，发现扫烟囱工人中由于职业的原因导致癌症，特别是发生阴囊癌的比例很高。许多扫烟囱工人都要缓慢地在烟囱中爬行工作，他认为这是由于暴露在煤烟中的多环芳香烃等物质所致。

在 20 世纪初期，由于限制了煤炭的使用，另一个新能源——石油——被用于整个新工业，不仅因为它需要精炼，而且由于从中提炼出许多新的化学物质。

20 世纪很快成为石油时代，绝大多数工业都要依靠石油。汽车和石油燃料的应用，出现了含铅的抗爆剂燃料，之后引起了城市及主要交通线附近地区的广泛铅污染。为了应对日益增长的人口对粮食的需要，人类迎来了化学农业革命，化学肥料的发展驱动了农业生产。德国人 Fritz Haber 收取大气中的氮素制造氮肥的技术有了重大突破，并且在 1913 年开始投产。由于肥料的广泛使用开始了农业的化学时代，其结果是人类寿命的延长和人口的迅速增长。

在整个 20 世纪的前半部分，化学是科学的推动力，它创造了无数的新的化合物用于工业、农业和军事目的，其产品同时遍布世界上的每个家庭和工厂。

农药，包括杀虫剂和除草剂的使用，虽然成了对付害虫和杂草的“魔法子弹”，防止了害虫和杂草毁坏庄稼的危害，杀灭了传播人类和动物疾病的媒介。但是，最终也对人类的生活、健康和生存产生了重要影响，成为今天人类禁止生产和使用毒性很强的农药的一部分。

DDT（二氯二苯三氯乙烷，dichloro-diphenyl-trichloroethane）就是应用杀虫剂造

成生态后果的一个经典例子。 DDT 早在 1874 年合成 ,1939 年发现它的杀虫作用 , 二战期间用于军事用途 , 二战以后 , 世界卫生组织用 DDT 控制遍布亚洲的疟疾 , 之后 DDT 得以更广泛地应用。 尽管当时已经发现了它的副作用。 但在 20 世纪 60 年代 ,DDT 又广泛地用于农业生产 , 控制害虫。 鸟类因为吃了昆虫而在它们体内富集了大量的 DDT , 导致死亡或者不能繁殖。 生态毒理学家从北极到南极的生物体内都发现有 DDT , 并详细记述了它在全球范围的生物种群中存在的证据。 于是 , 一夜之间 DDT 变成了一个全球问题。 1971 年 美国禁止了 DDT 的绝大部分用途。 它的作用被其他农药所代替 , 但它所造成的损失已无法弥补 , 它的过度使用已造成了全球范围的环境污染 , DDT 大规模使用的时代从而结束。

二战结束后的一段时期 , 技术、通讯、运输快速发展 , 不同的化合物非常广泛地投入使用 , 其原材料的需求也相应增加。 用于新技术的各种金属大量增加 , 而且以前很少使用的金属如汞、镉 , 也大量使用。 这种做法 , 通常伴随着对环境和人口的重大副作用。

与 DDT 不同的另一个典型例子是 20 世纪中期发生在日本的水俣病。 20 世纪 50 年代中期 , 在日本的水俣湾附近首次发现这种疾病。 在此区域内 , 有一家制造乙醛的工厂将大量污水排到了海湾里。 这些废水中含有不同形式的汞 , 特别是甲基汞随着污水注入海湾。 据估计从 1932 年到 1970 年大约有 600 吨之多。 在海湾中 , 甲基汞被生物体所富集。 因为汞是亲脂性的 , 很容易被生物体的脂肪组织从水体中富集。 此地区最早引起人们注意的是当地的生物——鸟不能正常地飞翔 , 它们从空中原因不明地坠入海中。 猫经常死于抽搐。 20 世纪 60 年代 , 当地的居民开始生病了。 这种疾病好像影响到中枢神经系统 , 产生抽搐、流涎过多和步履蹒跚。 许多人 , 包括新生的婴儿 , 死亡时情况非常恐怖。 这些奇怪事件的原因最终被查明与汞的排放有关。 由于那些吃了源自水俣湾的食物的人 , 身体中富集了甲基汞。 怀孕的妇女症状虽然比其他人轻 , 但由于有些汞被传递给了婴儿 , 致使新生儿经常有神经失常、麻痹和发育迟滞。

生态毒理学家研究认为 , 生物富集现象导致了上述问题。 甲基汞通过当地的食物链传递 , 在鱼、鸟和其他以它们为食的生物 (如人、猫) 体内富集至高浓度 , 通过生物富集 , 最终导致了生物体的死亡。 与 DDT 的例子不同的是 , 汞是因故意排放工业废水而进入环境的。

除农药和各种金属外 , 许多新的化合物也被广泛应用于工业。 比如 , 多氯联苯 (polychlorinated phenyls , PCBs) 主要用于电子工业的绝缘液中 , 是 1929 年首次使用的。 氟利昂 (CFCs) , 广泛地用于冰箱和空调。 各种塑料大量使用多年以后 , 人们才首次认识到因它们的使用和处理上的疏忽造成的环境问题。 1962 年 , 卡逊出

版了一本影响广泛的书《寂静的春天》，第一次详细地向大众说明广泛的化学物质的使用（特别是农药）对野生动植物的意想不到的影响。

1.2.3 环境污染对生态毒理学发展的影响

在卡逊的《寂静的春天》一书里，揭露了许多在环境中可能达到有毒水平的化学物质。警示我们这些化学物质（包括微量金属），已差不多遍布全球。

历史的经验值得注意。首先，废物管理和处理的失当是使那些有潜在毒性的化合物传播到环境中的关键因素。

在 20 世纪的早期，污水的处理除了大城市有污水处理设施外，许多地区没有或很少进行预先处理就直接排到江、河、湖、海或陆地上，有的排到地上挖出的深坑里。当人们对有毒废物会污染环境的认识提高之后，改变了这样的处理方式。许多国家也越来越多地通过立法来加强和改善处理方式。污水处理方法需要减少潜在病原菌和过多的营养素进入环境和污染环境；垃圾处理需要考虑到分开废物流，以便提取可循环使用的材料，也要安全地处理可再使用的或具有潜在毒性的垃圾。

在 80 年代早期，美国环境保护局（USEPA），进行了大范围的普查来估计制造有毒废物的设施，并采取新的处理方法。例如，过去的垃圾掩埋法是将废弃物放置在土地上挖出的深坑里，并用土掩埋它。但是，掩埋垃圾后渗出的液体渗到了建筑物的地下室，不仅引起了生物机体神经和生育方面的问题，而且产生致癌作用。这样的案例使得与垃圾掩埋有关的立法变得严格。包括在处理前对废物进行分选（阻止在掩埋后出现化学反应）和制定了垃圾场设计标准。随着这些改变，出现了高温焚化法、深井射入固定法等可供选择的垃圾处理方法。然而，没有一个方法是绝对可靠的。焚化可使某些生成的化合物比原始垃圾的毒性更大。当 PCBs 和有机氯农药在焚化时，将会生成二噁英（dioxins）等产物，这是一类公认的垃圾化合物中毒性最大的化合物。

有毒废物污染来源分为点源污染和面源污染，即故意和非故意排放两类。

“点源污染”是指排放到环境中的废物有可辨认的来源（即有潜在毒性原料的来源）。通过下水道和排水口将污水排到江河或湖中的，一个工厂通过管道将废液排到环境中去的，都属于点源污染。由此可见，点源污染属于故意排放的污染。

“面源污染”是分散的，不能确定污染物是从哪一个特定的排出口和管道排出的，即来源不明的，属于非故意排放的污染。例如，暴风雨降水可将城市环境中的污染物冲入水体；进入海中的暴风雨降水来自城市的各个角落，包含的污染物可能

来自道路（如石油烃），花园和公园（如肥料和农药）以及工厂和商业区（如各种工业化学物质）。在这种情况下，污染物的真实来源就不好精确地定义。

环境污染的严重性和污染废物处理的复杂性，推动了生态毒理学的进一步发展。

1.2.4 生态毒理学概念的发展

1.2.4.1 回顾生态毒理学

Thuhaut 对生态毒理学的定义有许多跟随者。最近的定义为：它包括了对此学科研究起主导作用的两个方面。一方面认为有毒化学物质对生物体的危害，可通过使用调查所得的数据来研究。也就是通过回顾性的研究，可得出环境中有毒化学物质的水平，并运用这样的信息来决定它们在过去、现在和未来的影响。采用“历史的环境观点”的形式，观察一个已出现的情况，将其原因（如化学物质）和结果（如生物体对这些化学物质的反应）连接起来。另一方面是，通过预先的研究来预知化学物质的可能作用效果。这就需要运用特殊的测验，评估化学单质或混合物的可能影响。

回顾生态毒理学是指用那些以前获得的数据来理解环境中化学物质的毒性反应。本质上，回顾生态毒理学是一种“环境流行病学”。在医学中，流行病学是寻求确定各种疾病的起因和它们在种群中传播方式的一个分支学科。流行病学研究的一个最早的成功例子与 1849 年伦敦发生的霍乱流行有关。英国的一位医师约翰·斯诺（John Snow），认识到霍乱病人有一个共同的致病因素是他们都从一个地点获取饮用水。当他关掉抽水机时，霍乱就终止了流行。Snow 大夫做的就是通过对已感染此疾病的人的回顾性研究来认识疾病的原因和危害。

1.2.4.2 多学科的研究方法

生态毒理学为了调控可能造成污染的工业和人类活动的需要，必须综合化学、数学、生态学、生理学、生物化学、毒理学、药理学、流行病学、湖沼学、微生物学、地质学、气象学、海洋学、计算机建模以及管理科学等多学科的研究成果和研究方法，也必须将风险评估和风险管理概念引入生态毒理学中。因此，生态毒理学与上述学科有着密切的联系（图 1-2）。

1.2.4.3 评价是生态毒理学的主要任务

对生态毒理学最新定义是 Monaty (1988) 提出来的。他认为生态毒理学的主要任务是评价、预报环境中的外来物质的预期演变。这个定义包含出现在环境中的污染物的化学描述；监控这些污染物来评价环境中负荷增加了还是减少了；以及

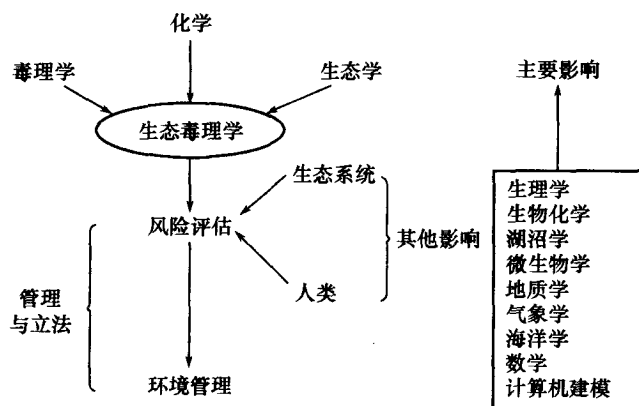


图 1-2 生态毒理学与相关学科的关系

用毒理学和生态学的现代方法来预告这些污染物的影响。

生物体由细胞组成，其中发生各种复杂的系列化反应是生命的基础。在较为复杂的动物和植物体内，相似的细胞可聚在一起成为组织，组织可组成器官，而器官就可负责一些特定的功能。生物体和组成它的细胞、组织、器官，需要食物和基本的营养素来维持生长和繁殖。这些原料当然得从环境中，或是以其他有机体为食物而获得。

动植物需要繁殖，同种个体相互接近组成了种群。在特定的区域内，种群和其他物种相互影响，组成了群落。而群落常以附近的物理、地理或气象的特征（如岩石海岸群落，珊瑚礁群落等）为基础。在另一个团体层次上，群落之间以及群落与它周围的广泛的环境间相互作用而组成了生态系统。生态系统可定义为一个地域性的群落，当然它也要与它的物理环境相互作用（如雨林生态系统，苔原，沙漠等）。在最高的层次，生物圈层次上，人们可以把地球上的所有有机体看成一个巨大的、全球的生态系统。

因此，生命在各层次范围上运行，在细胞内的分子或亚细胞水平内；在它自己的细胞或组织、器官水平内；在个体生物的水平上；在种群和群落水平上；最终在生态系统和生物圈的水平上（图 1-3）。

生态毒理学主要关注环境中活的有机体与有毒化学物间的相互作用。因此，我们可以从不同的水平上博弈毒理学，这些不同的关系列在了图 1-4 中。图中所述的内容正是生态毒理学最为关切的问题和最重要课题。

如果生态毒理学关注环境中的有毒物质，化学将会起到很重要的作用。化学将阐明化学物质所包含的性质，且通过对环境取样品进行明智的分析，可以帮助查

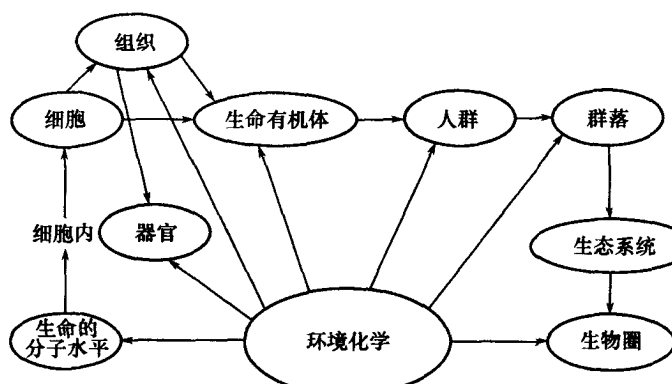


图 1-3 生物结构层次及其与环境中化学物质的作用

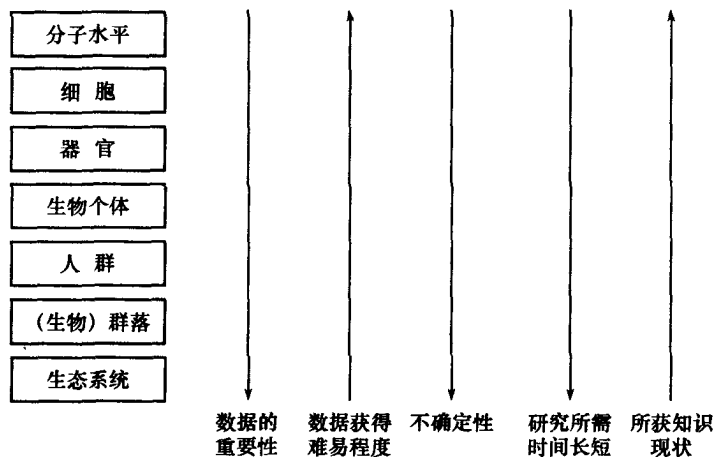


图 1-4 生态毒理学研究与不同水平生物层次的关系

明不同的污染源。通过加入环境中的废物也可得到这些污染源的许多信息。不同类型的工业产生不同类型的废物，而且有些废物可能是某些特定工业的典型产物。

化学分析也可提供化学物质在环境中各种状态的信息。它是通过分析不同的环境相来估计其中的污染负荷。污染负荷的信息给我们提出了进入和存在于环境中的特定污染物的总量，以及哪些环境因素会因为这些污染物的作用而有最大的污染危险的细节。因此，需要分析空气、水、土壤和活的有机体，研究数据将告诉我们一个特定的污染物对活的有机体的可能危害。

值得指出的是，并不是所有的污染物都对生物有作用，而有些污染物确实在生

物体内积累的程度超过其他种类。比如，有些污染物与土壤和沉积颗粒关系密切，而对活的有机体却没多少作用。其他的可能对生物是有作用的，但在生物体内却被快速地转换和降解了。还有其他的一些可能在环境中就已转化了，有的是通过非生物的转化（如光转化）有的是通过微生物的作用（如细菌、真菌），这样的转化是相当重要的，因为它可改变特定污染物导致的危险。有些污染物，一旦转化，将通过部分或完全的降解变为完全良性的化合物。在另一些情况下，转化会形成比原来释放到环境中的物质毒性更强的化合物。

通常把对环境样品的分析叫监控。许多年来，对环境的化学监控一直是生态毒理学研究的支柱。大多数政府机构都有大量关于空气、水、土壤、沉积物和生物区中各种化学物质的历史数据详细汇总。在生态毒理学研究的早期，特别是 20 世纪 60 年代到 70 年代，这些化学物质的研究主要靠提供时间和空间的污染物分布状态的数据。

当然，生物体可以从环境中转移或除去污染物，并将污染物在体内隐藏起来，这种现象叫生物摄入。虽然我们可通过化学技术测量污染物在生物体内的数量，但这些并不能认为是有机体对这些化学物质的反应。这种反应由化学物质的自然属性和有机体的实际摄入量而定。

1.2.4.4 生态毒理学的新分支——生物监测

测量因接触环境中的化学物质而发生的反应，已成为生态毒理学中一个快速发展的新分支，称为生物监测。许多不同技术用于这个目的。如测量酶活力的改变和细胞系列化和结构的改变；测量行为的变更和个体繁殖能力的改变；测量如呼吸作用、光合作用、运动和哺育行为等基础生理活动。

在个体器官水平上的反应叫“生物监测”；测量器官组织内的化学物质也叫“生物监测”。例如，美国的“蚌类”计划就是以此技术为基础形成的。它是用双壳贝类（特别是蚌类）作为江河口和海口排入污染的指示器。蚌类是此种目的的理想材料，它们通过过滤摄食，将特定的污染物富集到组织中。这对监测水中的污染来说，是非常有用的。因为许多污染物以非常低（却有毒理意义）的浓度存在于水中。蚌类作为化学污染物的浓缩器或是生物蓄积者，使化学分析变成了一项轻松的任务。蚌类不仅对显示微量金属的污染是非常有用的，而且对由特定有机化合物如农药和 PCB 等引起的污染同样是有用的。因为这些物质并不会在环境中很快改变，它们的基本性质因而可保持下来，并能够检出。

测量生物体因接触化学物质的作用和它们引起的各种反应是毒理学测试的指示终点。生态毒理学试图测量这些终点来建立环境中化学物质的浓度与它们引起生物体反应之间的联系，由于化学物质的损害能引起生物体产生特定反应，因此，

可将这些特定反应看成是一种指示剂和生物反应的标志物。

1.2.4.5 生态学数据与数据库

当个体对环境出现的化学物质有反应时，种群迟早也会对此有反应。污染源对个体生物的作用波及到各个层次，在时间进程中对群落和生态系统水平的影响也随之改变。在不同组织层次上进行生态毒理学研究所积累的数据，构成生态学数据。数以千万计的生态学数据经过计算机处理，建立许多各具特点的生态毒理学数据库，在网上共享。从研究与立法的需要来看，生态毒理学家需要收集因为接触化学物质而引起的种群变化、群落中种的多样性和其他相关参数改变的信息，需要收集毒性测试各生物层次的数据。因为，这些数据不仅是最后提供生态毒理学工作者撰写综合报告的可靠科学依据，而且是风险评估、环境评价、化学品管理者、环境管理者、立法者和政府越来越重视的信息资源，特别是对环境管理和立法有重要意义。

1.2.5 生态毒理学展望

生态毒理学研究所涉及的生物种类极为繁多，面临的问题十分复杂而现状却是仅仅研究过少数种类的生物，而且大部分限于急性和亚急性毒性研究。低剂量、长期暴露的慢性研究进行得很少，实验室研究与野外工作相结合的研究还仅仅是开始。要从事这一艰巨任务必须有各个学科之间的大协作。首先是生态学和毒理学各分支学科之间的协作。这种大协作还要求在世界范围内进行。在这种协作中，分析科学工作者将起特别积极的作用，因为污染物在环境中受到了极大的稀释，如果没有灵敏的、专一的分析方法，就不可能探测到污染物的存在和确定暴露的剂量，也不可能研究污染物及其降解产物通过生态系统的转移、生物学半衰期、排除速率等，更不可能测定污染物在生物圈中的化学生物动力学 (chemobiokinetics)。因为，我们需要在世界范围内调查出一份能够进入环境的污染物的清单，包括生产规模、使用方法，在气、水、土、生物各部分的分布量。

对污染物的生物学效应特别是有毒效应的知识也要加以修改补充，使之日趋完善。事实上，测定组成生态系统的动植物、微生物中的临界浓度，要比以人为对象在取样上方便得多，局限性小得多，这是有利的一面。

要广泛深入开展生态毒理学研究，首先必须制订出适当的研究方法，既有常规的测试 (急性、亚急性、慢性毒性试验) 并要求做到规范化，也有深入的研究，以进行器官和系统机能上的探索，或者生物化学机理的研究。这类研究需要运用解剖学、组织学、生理学、生物化学、免疫化学、分子生物学、遗传学等基础学科的方法，

这一点与人类毒理学的情况一样，十分重视各项参数的完整性。应当考虑一个特定的污染物对一个生态系统中特定组成的效应，从整体上来考察对一个生态系统的可能后果。因此，必须制订预报模式，实验室研究必须补充以规模大得多的野外研究。至于化学分析所提供的环境监测数据，应该以连续监测为基础。

由于污染物种类繁多，当决定了研究方法以后，就应按照轻重缓急，确定哪些污染物作为重点，优先研究它们的生物学效应。可以按照下列标准来选择重点：

(1) 污染物释放到环境中的数量；

(2) 在环境中持续存在的程度，即稳定程度；

(3) 污染物或其降解代谢产物在生态系统的积累能力，特别是在食物链环节中的积累能力；

(4) 污染物毒性潜力的性质和严重性。对致畸剂、致癌剂和致突变剂等要特别加以注意；

(5) 生物群落受到暴露的程度，特别是人类中的某些特殊人群，例如婴儿、幼儿及职业性暴露的工人。

值得指出的是，生态毒理学虽然是一个新的交叉学科，本身尚处在孕育发展之中，但也有其自己的分支。如在基础研究方面可分为理论生态毒理学、实验生态毒理学和应用生态毒理学；按照行业划分可分为工业生态毒理学、农业生态毒理学、矿区生态毒理学和城镇生态毒理学；根据环境介质的不同可分为大气生态毒理学、水生生态毒理学（又可分为淡水生态毒理学和海洋生态毒理学）和陆生生态毒理学；根据生物类型可划分为植物生态毒理学、动物生态毒理学、微生物生态毒理学和分子生态毒理学等。1972年萨金特(Sargent)将农业革命化后的生态系统称为人类生态系统(human ecosystem)，铃木继美定义人类生态毒理学(human ecotoxicology)是“从生态学的观点来研究人类毒理学”。人们职业、文化、生活方式上的差别的多样性与自然地理条件的多样性综合在一起，再加上多种化学污染物的相互作用，要阐明这种多样性及与毒理变化的关系并非易事。

生态毒理学有着广阔的领域，面临着复杂的任务，同时也具有很大的发展前途，它的发展有助于全面地、完整地在生态系统各个水平上阐明环境污染物的有毒效应，从而制订出有关的标准、残留限量，提出环境保护措施。随着我国社会主义现代化建设进展，环境科学必将有一个巨大的发展，在我国，积极开展生态毒理学的研究，已成为环境科学工作者的一个必要而迫切的任务。