

农药环境毒理学研究

蔡道基 主编



中国环境科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农药环境毒理研究/蔡道基主编. - 北京: 中国环境科学出版社, 1998
ISBN 7-80135-656-X

I. 农… II. 蔡… III. 农药毒理学: 环境毒理学-研究 IV. S481

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 33559 号

中国环境科学出版社出版发行

(100036 北京海淀区普惠南里 14 号)

化学工业出版社印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 2 月 第 一 版 开本 787×1092 1/16

1999 年 2 月 第一次印刷 印张 25

印数 1—1000 字数 590 千字

定价: 68.00 元

序

中国是一个人多地少的农业大国，耕地面积仅占世界耕地总面积的 6.8%，但要养活约占世界 1/4 的人口。因此，提高粮食产量，保证农业的可持续发展，是我国一项稳民心安天下的战略任务。

农药是一种特殊商品，它对消灭病、虫、草、鼠害，保证农业的丰收起着重要作用。据有关资料统计，因施用农药每年挽回的粮食损失约占粮食总产的 1/3。若不使用农药，现有的农业产量，将会大幅度减产。然而农药又是一种对生态环境有害的有毒化学品，它从生产、贮运、直至使用的全过程都有可能造成对生态环境的危害。而且农药的使用是直接喷洒在人类食用的各种作物、蔬菜和果树上，遍及全国所有农田，它是有毒化学品中毒性最大、影响面最广、对人类生活关系最为密切的面源“污染物”，稍有使用不当，不仅污染生态环境，还将危及人体健康。早年被各国广泛使用的有机氯农药，曾对全球环境造成的严重污染，危害损失巨大，现已被禁用，这就是一例。由于农药对人类生活具有利弊共存的双重性，因此各国政府与各国的科技工作者都十分重视农药对生态环境影响的研究与管理工作；为了加强农药的环境管理，将农药对生态环境的危害影响控制在人类可接受的最低水平，英国于 1952 年颁布了《农药环境预防条例》，美国于 1972 年制定了《联邦环境农药法规》，联合国粮农组织于 1985 年颁布了《农药登记环境指南》，我国于 1989 年制定了《化学农药环境安全评价试验准则》，1997 年颁布了《中华人民共和国农药管理条例》。

农药品种繁多，性质与功能各异。农药环境毒理学是研究农药的环境行为、生态效应、环境管理和污染防治的学科分支，是环境科学与农药科学的组成部分。其目的是评价农药对生态环境的安全性，为农药的合理使用，防止农药的污染和指导开发高效、低毒、低残留的新农药品种提供科学依据。南京环境科学研究所农用化学品污染生态研究室是国家环境保护总局下属从事农药环境研究与管理的专业机构，近 20 年来，该研究室的研究人员，通过大量的研究工作，为建立我国农药环境毒理学的学科领域奠定了坚实的基础，制定了第一部《化学农药环境安全评价试验准则》，为新农药开发中的环境安全评价、防止农药对地下水的污染、避免农药对各类环境生物及珍稀生物的危害影响，做了大量开拓性工作。

《农药环境毒理学研究》一书，是在蔡道基教授主持下，该室全体科研人员对该学科领域长期研究成果的选编。本书通过各项研究工作，全面、系统地阐述了农药环境毒理学的研究、目前我国主要使用农药品种在环境中的行为特征、对生态环境的危害影响及其农药环境安全性评价与管理对策等内容。本书汇集了国家六五、七五、八五期间 6 项国家科技攻关项目、10 项国家环保局与江苏省科委下达的科研项目以及 10 余项国外合作项目的成果。它的出版对推动我国农药环境毒理学的研究，加强农药的环境管理，防止农药对生态环境的污染，将会起到积极作用。

金鉴明

中国工程院院士

内 容 简 介

本书通过各项研究工作，系统介绍了农药环境毒理学学科领域的研究内容与方法，为新农药的开发与安全使用、保护生态环境提供了可参考的资料。

本书第一篇介绍了农药在环境中的残留与降解，吸附与移动等环境行为特征；第二篇介绍了农药对各种环境生物的毒性及其测试方法；第三篇介绍了农药对生态环境的安全评价方法与实例；第四篇介绍了农药的环境管理与污染防治对策；第五篇介绍了农药在农田生态系统中的残留及有关的残留分析方法。

本书可供从事农药科学、环境科学研究以及大专院校等有关的科技工作者与教育人员参考。也可供各省市各级植保与环保部门、农药生产厂家等阅读、参考。

目 录

第一篇 农药的环境行为	(1)
农药与环境	(3)
甲基异柳磷等四种农药在土壤中的吸附特性	(18)
单甲脒等四种农药在土壤薄层上的移动性能	(23)
涕灭威对地下水污染敏感区预测与区划试点	(27)
氯唑磷在土壤中的降解与移动	(49)
农药在水体与土壤表面的挥发作用	(53)
克百威等三种农药的水解测定	(59)
农药在水体与土壤表面的光降解	(63)
溴氰菊酯的光解、水解与土壤降解	(67)
涕灭威在土壤中的降解特性	(71)
农药在土壤中的降解	(78)
甲基异柳磷等四种农药在环境中的化学行为	(83)
农药分配系数及其在环境研究中的应用	(88)
农药分配系数与其水溶解度的相关性	(93)
第二篇 农药的生态效应	(99)
有机氯农药在生态环境中的归趋与危害	(101)
溴氰菊酯对鱼塘浮游动物危害影响	(107)
拟除虫菊酯农药对水生生物的毒性	(113)
鱼类对四种农药的回避反应研究	(118)
农药对鱼类慢性毒性测定及评估初探	(121)
农药对水蚤毒性及安全评价初探	(124)
农药对藻类的毒性与危害性评估	(128)
甲基异柳磷等四种农药对蛙类的毒性	(134)
甲基异柳磷等四种农药对蜜蜂的危害性评估	(137)
灭幼脲 3 号杀虫剂对鱼、蜂、蚕的危害性评估	(140)
农药对天敌赤眼蜂的毒性与危害性评估	(143)
溴氰菊酯对家蚕的毒性	(146)
农药对家蚕慢性毒性研究	(150)
杀虫双对家蚕后丝腺超微结构的影响	(156)
化学农药对禽、鸟的毒性与评价	(158)
农药对鹌鹑的慢性毒性	(163)
农药对蚯蚓的毒性与危害性评估	(168)
农药对土壤微生物活性影响	(175)
甲基异柳磷等四种农药对土壤呼吸影响	(180)

除草剂对土壤微生物活性、土壤氨化作用和硝化作用影响·····	(186)
除草剂对植物光合作用和吸肥能力影响初探·····	(191)
利用紫露草微核技术测定农药的毒性·····	(194)
吡虫啉对环境生物的毒性与危害性评估·····	(198)
卫生用农药对居室环境影响评估·····	(204)
第三篇 农药环境安全性评价 ·····	(211)
化学农药环境安全评价准则·····	(213)
吡虫啉对生态环境的安全评价·····	(227)
稻田使用溴氰菊酯农药对水生生物的安全评价·····	(231)
溴氰菊酯复配农药对稻田鱼塘生态系的安全评价·····	(239)
稻田使用好年冬农药对水生生物安全性评价·····	(245)
稻田使用米乐尔对水生生物安全性评价·····	(253)
模拟预测铁灭克对地下水污染影响·····	(260)
米乐尔对地下水的影响研究·····	(265)
运用模拟生态系统评价果尔在稻田使用的安全性·····	(275)
绿磺隆在土壤中的残留与危害·····	(278)
绿磺隆对水稻的残留危害剂量·····	(283)
绿麦隆在麦田土壤中残留动态及其对后茬作物的影响·····	(287)
第四篇 农药环境管理 ·····	(293)
我国农药环境污染及管理现状·····	(295)
加强对化学农药环境安全的监督管理工作·····	(300)
克百威对我国东北地区国家重点保护鸟类的危害性评估·····	(304)
克百威对生态环境的危害影响与管理·····	(308)
我国农药生产、使用状况及其影响因子分析·····	(311)
合理使用农药防止对地下水污染·····	(323)
农药污染与人体健康·····	(327)
第五篇 农药残留与分析方法 ·····	(333)
化学农药环境行为参数快速估测方法研究·····	(335)
高效液相色谱柱后衍生化法用于氨基甲酸酯类农药的测定·····	(347)
农药分配系数测定方法比较研究·····	(352)
脲类除草剂分配系数的测定·····	(356)
乙氧氟草醚在水和土壤中的残留分析方法·····	(361)
浓硫酸纯化-气相色谱法测定土壤中溴氰菊酯·····	(364)
土壤中绿磺隆残留量生物测定方法·····	(366)
绿磺隆在小麦和土壤中的残留动态·····	(371)
精禾草克在大豆地中的残留动态·····	(375)
流水式农药鱼类毒性试验·····	(380)
化学农药对鱼类和鸟类损伤的微核测试方法·····	(384)

第一篇

农药的环境行为

- 农药与环境
- 甲基异柳磷等四种农药在土壤中的吸附特性
- 单甲脒等四种农药在土壤薄层上的移动性能
- 涕灭威对地下水污染敏感区预测与区划试点
- 氯唑磷在土壤中的降解与移动
- 农药在水体与土壤表面的挥发作用
- 克百威等三种农药的水解测定
- 农药在水体与土壤表面的光降解
- 溴氟菊酯的光解、水解与土壤降解
- 涕灭威在土壤中的降解特性
- 农药在土壤中的降解
- 甲基异柳磷等四种农药在环境中的化学行为
- 农药分配系数及其在环境研究中的应用
- 农药分配系数与其水溶解度的相关性

农药与环境

农药是农业生产中必须的生产资料，又是一类对环境有害的有毒化学品，因此在农药的生产、贮运、供销和使用整个过程中如何处理好这对矛盾，是保证农业持续发展和保护生态环境的重大课题。农药又是一门涉及多学科的边缘科学，只有通过多学科、多部门的共同努力，开发高效、低毒、低残留、高选择性的农药品种，制定安全的农药使用技术与管理制，才能充分发挥农药在防治病、虫、草害中的功效，将其对生态环境的危害抑制到最小程度。

1. 我国农药生产和使用情况

1.1 农药的生产情况

我国是一个农业大国，对农药的需求量很大，使用农药的历史悠久，早在公元前7~5世纪就有用莽草、蜚炭草、牡菊、嘉草等防治虫害的记载，但至本世纪40年代以前，在漫长的岁月中，使用的农药品种都是一些天然的矿质或植物性农药；1946年开始生产少量有机合成农药滴滴涕，1949年开始生产六六六，当时的产量只有几十吨。50年代后，随着工农业生产的发展，农药工业发展迅猛，从50年代初至80年代末，农药的产量几乎成直线上升，至90年代农药的产量已稳定在25万t左右（以有效成分计，下同，见图1），农药生产的能力已达到了55.5万t。我国农药的年产量仅次于美国（1990年53.57万t），居世界第二位，并已从农药进口国，转变成农药出口国，1995年出口农药7.08万t（以实物计）。

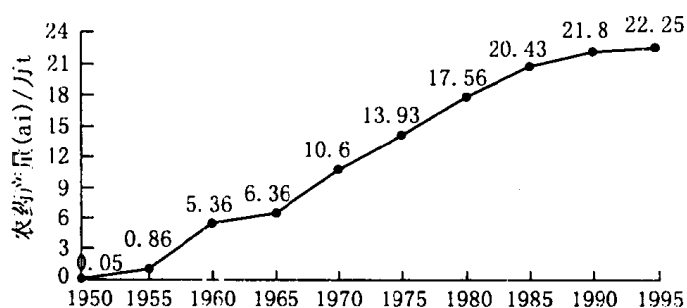


图1 中国历年农药产量

1.1.1 有机氯农药的生产历史

随着科学技术的发展和人们对环境意识的提高，农药品种不断在更新，1996年我国已登记的农药品种国内409个，国外264个，复配品种国内750个，国外82个；80年代以前，我国生产的农药以有机氯农药为主，六六六和滴滴涕两个农药的产量就占总产量的31.1%，六六六由甲、乙、丙、丁等四个异构体组成，其中有杀虫作用的有效

体丙体六六六仅占 14%，而其它三种异构体，既无杀虫效果，又对环境的危害性比丙体六六六更大，因此在评价六六六对环境影响时，应把四种异构体都估算在内，1980 年六六六原粉的总产已达 28.64 万 t，超过了当年农药以有效成分计的总产 17.6 万 t。截止 1982 年底，全国六六六原粉的累计总使用量约 400 万 t，滴滴涕约 50 万 t，1983 年有机氯农药停产后六六六和滴滴涕的库存量约 50 万 t，这些库存农药用完时，全国历年使用有机氯农药的总负荷量已达 50kg/hm²。有机氯农药是一种高残留、生物富集性很强的农药，滴滴涕在水体中被鱼类摄入后的富集倍数可高达几十万倍之多，它可以通过食物链传递污染整个生态环境，危害人体健康，1982 年江苏无锡地区人体脂肪中滴滴涕含量 29.37mg/kg，六六六含量 32.05mg/kg，人奶中滴滴涕含量是 0.54mg/kg，六六六含量 0.60mg/kg，远超过了世界各国人体脂肪中有机氯的检出值。当时在各种农副产品中六六六，滴滴涕的残留量普遍超标，农畜产品的出口贸易严重受阻。针对上述情况，1983 年我国禁止了有机氯农药的生产。

根据最近的检测结果，停用后环境中有机氯农药的残留量已明显下降。

表 1 有机氯农药在土壤中的残留量 (mg/kg)

地区	南通棉区		无锡稻区	
	六六六	滴滴涕	六六六	滴滴涕
1980	0.799	11.730	0.364	0.318
1992	0.032	1.230	0.045	0.053

我国规定六六六和滴滴涕的土壤环境质量标准，一级为 $\leq 0.05\text{mg/kg}$ ，二级为 0.1mg/kg ，三级为 1.0mg/kg 。江苏南通棉区以往以使用滴滴涕为主，无锡稻区以使用六六六为主，两地都是 80 年代我国有机氯农药使用最高地区之一，从表 1 可以看出，当时这两地区土壤中六六六和滴滴涕含量都明显超标，停用 10 年后到 1992 年，两地土壤中六六六残留量平均下降了 16.6 倍，土壤质量已恢复到一级标准；滴滴涕的残留量平均降低了 7.8 倍，无锡地区已恢复到接近于一级标准，南通地区由于以往土壤污染过于严重，至 1992 年时仍处理污染状态。滴滴涕在环境中的降解速率比六六六慢，恢复时间也长。

有机氯农药停用后，由于环境质量的改善，农产品与食品中的农药残留状况已有明显好转，据卫生部食品卫生监督检验所 1992 年对全国 355 件各类食品中六六六，滴滴涕残留量的调查结果（张莹等，1996），六六六超标的只有两件，合格率 99.44%，滴滴涕的合格率 100%。根据各个历史时期的检测统计结果，在 70 年代有机氯农药使用高峰期，人体从食品中摄入的六六六每公斤体重每天为 $5.06\mu\text{g}$ ，1992 年已降至 $0.22\mu\text{g}$ ，下降了 23 倍；滴滴涕由 70 年代摄入量每公斤体重每天为 $2.13\mu\text{g}$ ，1992 年降至 $0.54\mu\text{g}$ ，下降了 4 倍；有机氯农药在人体内摄入量的降低，必将减轻对人体健康的不利影响。至 90 年代，出口农副产品中的农药残留量亦已基本达标。由此可见，解决农药对生态环境的污染问题，首先应抓好农药生产的源头，如果将有残留危害的农药品种撒向农田，污染了整个生态环境，治理起来就十分困难，有了好的农药品种，即使局

部地区遭到了污染，也容易治理。

1.1.2 高毒农药的生产情况

有机氯农药在我国停用后，取代有机氯农药的有机磷类、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类农药有了较大发展，这些农药虽不像有机氯类农药有积累残留问题，但在这些农药中有不少品种属高毒农药，高毒农药的广泛使用，又带来了对外环境的急性危害问题。按照我国农药卫生毒理分级标准，对大鼠口服急性毒性半致死量 LD_{50} 值小于 5mg/kg 的属剧毒农药； LD_{50} 值 5~50mg/kg 的属高毒农药； LD_{50} 值 50~500mg/kg 的属中毒农药； LD_{50} 值大于 500mg/kg 的属低毒农药。按此分类标准，我国目前生产的杀虫剂、杀鼠剂中有一批属于剧毒与高毒的农药品种。

表 2 目前生产的剧毒与高毒农药品种

农药名称	LD_{50} (mg/kg)	农药名称	LD_{50} (mg/kg)
杀虫剂		克百威	8~14
甲胺磷	20~30	涕灭威	1.0
对硫磷	4~13	灭多威	17.0
甲基对硫磷	9~25	杀鼠剂	
氧乐果	30~60	大隆	<0.72
久效磷	8~23	杀鼠灵	3.0
甲拌磷	2~6	杀鼠速	2~25
水胺硫磷	25	安妥	6~8
甲基异柳磷	28.4	敌鼠	3.0
磷胺	17~30	磷化锌	40.0

在这些高毒农药中，有些还是目前生产量最大的农药品种，1996 年仅甲胺磷一个品种的生产量已达 7.231 万 t，几乎占到农药总量的 1/3。在发达国家，由于农业机械化水平与管理水平较高，农药一般都用机械化喷施，因此高毒农药的施用，一般不会造成多大的急性中毒事故，而我国目前情况，高毒农药被农户购入，分散的贮存于千家万户，加之施用时一般都用人工手动机械喷施，这样就很容易造成各种各样的中毒事故。据卫生部劳动卫生与职业病研究所 1992 年~1996 年对 26 个省、市、自治区的不完全统计（陈曙暘，1997 年），报告农药中毒 243749 例（其中致死 24612 例），其中生产性中毒 61102 例（其中致死 392 例），占总中毒人数的 24.7%；在几百种农药品种中，造成农药生产性中毒事故的主要品种是甲基对硫磷、甲胺磷和氧乐果等 3 种有机磷农药，各占农药生产性中毒总数的 33.6%、18.4%、4.5%。至 1996 年由于甲基对硫磷使用量的减少，其中毒比例已降至 26.5%，而甲胺磷的中毒比例上升到 25.9%。高毒农药的大量使用与滥用，造成了部分农产品的污染，近年来各地发生的蔬菜污染中毒事件，多数是滥用甲胺磷所致。

日本是目前农药使用最高的国家，平均用药量达 14.27kg/hm²，我国 1995 年全国平均用药水平为 2.33kg/hm²。日本的用药量虽高，但它早在 1991 年就规定 LD_{50} < 30mg/kg 的甲基对硫磷，对硫磷等高毒农药不准登记使用，加之日本对农药的严格管理，所以农药的中毒与污染事故发生率就较低。为了防止高毒农药的中毒事故，联合国环境规划署与世界粮农组织已于 1995 年将久效磷、甲胺磷、磷胺、对硫磷、甲基对硫

磷等 5 种高毒农药列入了国际贸易中对某些危害化学品和农药采用“事先知情同意程序”(Prior Informed Consent, 简称 PIC)。目前我国的农药工业已基本具备取代这些高毒农药的生产条件, 因此尽快禁止上述几种对人畜及生态环境危害最大的高毒农药品种, 这将成为类同于 1983 年禁止有机氯农药生产, 在我国农药发展史上又一件具有划时代意义的大事。

1.1.3 生物农药的发展前景

生物农药是指对防治对象无直接毒性, 只是起调节生长或干扰正常的性功能, 用来防治有害生物的一类天然化合物, 或与天然化合物性质完全相同的人工合成物(张子明, 1996)。生物农药包括生物化学农药与微生物农药两大类; 在生物化学农药中有信息素、激素、天然的植物或昆虫生长调节剂及酶制剂等; 微生物农药包括自然界存在的用于防治病、虫、草、鼠害的真菌、细菌、病毒和原生动物或遗传修饰的微生物制剂等。

由于生物农药纯属于天然物质, 又具有无直接毒性与专性强的特点, 应用生物农药防治病、虫、草害时, 一般对环境与非靶标生物无危害影响, 因此有人常称之为无公害农药, 并期待全部用生物农药来取代化学农药。

据统计, 1990 年全世界的农药总销量为 273.5 亿美元, 生物农药 1.2 亿美元, 占 0.44%, 在生物农药中应用最成功、最广的是苏云金杆菌(Bt), 占生物农药的 92%。我国自 1960 年开始生产苏云金杆菌, 年产量约 3 万 t, 另有抗生素农药每年约几千吨。

对任何一种农药的公正评价, 都应从利弊两方面分析, 世上很难有完美无缺的产品。化学农药具有高效、广谱、快速与使用时较少受环境条件制约等优点, 但它是人工合成物质, 曾给人类和生态环境带来了各种各样不良影响。生物农药属天然物质, 它的应用对人类和生态环境无多大的副作用, 但它却缺少像化学农药所具有的优点, 因此发展速度缓慢。今后农药的发展方向应该是, 各类农药都应尽力克服自身缺点, 发扬其优点, 利弊互补。今后生物农药会得到比以往较大速度的发展, 但在相当长的历史时期内, 化学农药在整个农药生产中仍将占主导地位。

1.1.4 农药厂的规模与布局

对环境而言, 农药是面源污染物, 撒向全国各地, 农药厂的“三废”是点源污染物, 影响厂际周边环境。目前我国生产农药的厂家太多、太分散、又大部分集中在东南沿海、人口密集的水网地区, 据不完全统计主要的农药企业有 300~400 家, 还有很多未正式登记的小厂。农药工业的特点是, 生产技术要求高, 生产的产品毒性大, “三废”污染严重。农药厂的生产规模小, 而且技术力量薄弱, 生产资金短缺, 不可能在环保设施上有足够投资, 三废不达标排放现象十分严重。近年来, 由于高效、超高效除草剂的迅猛发展, 未经合格处理的废水、废气、甚至是废渣的排放, 造成的污染事故时有发生, 1994 年沈阳有一农药厂生产磺酰脲类除草剂的污水, 因未达标排入了灌渠, 造成附近 500 多公顷水稻严重危害事故, 当时灌渠水中绿磺隆的检出浓度 $0.5\mu\text{g/L}$, 受污染农田土壤中绿磺隆检出量为 $2.0\mu\text{g/kg}$, 虽然检出量都很低, 但因绿磺隆对水稻的敏感性太强, 其敏感性阈值只有 $0.2\sim 0.5\mu\text{g/kg}$, 因此稍有不慎就会造成严重危害。又如 1997 年吉林四平市有一家生产阿特拉津除草剂的工厂, 将污水排入河道, 流入辽宁境内, 适逢水稻栽秧季节, 农民用河水灌溉稻田后, 造成 2600 多公顷水稻受害的特大污

染事故，经济损失巨大，当时河水中阿特拉津的检出浓度为 0.052~0.064mg/L，稻田土壤中为 0.07~0.23mg/kg，国外一些国家规定三氮苯类除草剂如西玛津在水环境中的标准只有 0.003mg/L。目前我国农药生产技术已达到了一定的水平，农药产量已基本满足农业生产需要，但在农药品种结构与生产规模上，必须加快改造，才能很好解决高毒农药的危害与农药“三废”的污染问题。

1.2 农药的使用情况

农药的品种很多，功能各异，按防治对象分有杀虫剂、杀菌剂、除草剂、杀线虫剂、杀软体动物剂、杀鼠剂、植物生长调节剂等。我国幅员辽阔，各地的自然条件，耕作制度和作物品种差异又很大，因此农药对生态环境影响的因素与表现形式也多种多样。在诸影响因素中，以农药品种，用量与使用技术对环境影响的关系最为密切。

1.2.1 全国各省、市、自治区农药使用情况

1995 年我国农药的使用总量 22.25 万 t，我国耕地平均用药量 2.33kg/hm²（欧洲 1995 年平均用药量为 3.3kg/hm²），用药量最高的是浙江省平均为 9.96kg/hm²，比全国平均用量高 4.3 倍，已接近日本的水平；全国农药用量最低的是内蒙古，平均用量为 0.36kg/hm²，与全国平均用量相比低 6.4 倍。浙江与内蒙古相比差 27.4 倍。按各省、市、自治区农药用量水平大小划分成 5 个等级，用药量 >6kg/hm² 为高用药量组；3~6kg/hm² 的为较高用药量组；1.5~3.0kg/hm² 的为中用药量组；0.75~1.5kg/hm² 为较低用药量组；<0.75kg/hm² 的为低用药量组。

表 3 全国各省、市、自治区农药施用水平（单位：kg/hm²）

>6.0		3.0~6.0		1.5~3.0		0.75~1.5		<0.75	
省市	用量	省市	用量	省市	用量	省市	用量	省市	用量
浙江	9.96	湖南	4.92	北京	2.93	陕西	1.10	青海	0.71
上海	9.85	江苏	4.37	湖北	2.89	贵州	0.90	宁夏	0.64
福建	7.69	山东	3.97	河北	2.43	山西	0.81	甘肃	0.58
广东	7.12	广西	3.62	辽宁	2.39	吉林	0.77	新疆	0.49
		安徽	3.15	全国	2.33			黑龙江	0.41
				江西	2.21			内蒙古	0.36
				四川	1.71				
				天津	1.66				
				海南	1.66				
				河南	1.62				
				云南	1.51				

注：按 1995 年农药用量，1994 年各省、市、自治区的耕地面积求出的单位面积用药量。

从表 3 可以看出：全国各地的用药水平极不平衡，农药用量的地带性分布现象十分明显。农药用量最高的省市，主要分布在东南沿海一带，这些地区不仅是经济发达，而且是高温、多雨、农作物种类多，复种指数高，适宜于病、虫、草害的繁衍，因此用药水平就高，由此引起的各类农药污染事故也多；农药用量水平低的地区，主要分布在地广人稀的东北及西北的边远地区，这些地区的气候比较干寒，种植作物品种比较单一，复种指数低，病虫发生率较轻，因此用药量较少，农药对生态环境危害发生率也较低。

然而，在这些地区由于地广、草荒较为严重，相比之下除草剂的用量就较多，加之近年来不少超高效除草剂在这些地区的推广应用，与农业改制的推进，除草剂对当茬作物与后茬作物危害问题十分突出。就全国范围防治病、虫、草害的需要而言，农药的用量还会增加，特别是除草剂的需求量会有较大幅度的增加，目前我国化学除草面积约 3500 万 hm^2 ，仅占耕地面积的 1/3，在世界农药市场中，除草剂的销售量已达到了农药总销售量的 50% 左右，而我国至 1994 年除草剂的比重仅占 12.9%。但从农药的发展趋势分析，单位面积内的农药用量将随着高效、超高效新农药品种的出现会不断地降低；据统计分析，在 40 年代治虫时的用药量需 7~8 kg/hm^2 ，到 50~70 年代新一代农药的用量已降至 0.75~1.5 kg/hm^2 ，至 70 年代以后出现的一些高效与超高效农药的用量只需 0.015~0.075 kg/hm^2 ，还有许多农药的用量已低于 0.015 kg/hm^2 。农药活性的提高，用量的降低，就可以减轻毒物对环境的负荷量。

事物总是一分为二，高效、超高效农药的出现，它们的用量虽低，降解也快，在环境中的残留极微，但由于这类农药的生物活性太高，其作用机理与防治对象又不能完全做到专一，在使用中不可避免地会伤及无辜；因此对一些高活性、低残留、长暴露化学品对生态环境的危害问题，又成了环境科学中的一个热点。美国 EPA 于 1996 年 5 月专门成立了内分泌干扰物的专家特别委员会，专门筛选研究对人与野生动物的荷尔蒙有干扰的各类农药与化学品，以求防止对人类与动物的生长发育与繁衍带来的不利影响。

1.2.2 农药的合理使用

农业生产离不开农药，病、虫、草害都需要农药防治，据统计，世界粮食产量如不使用农药将会遭受病、虫、草害损失情况，稻谷产量损失 47.1%，小麦 24.4%，玉米 35.7%，这三种主要粮食作物的平均损失量为 35.7%（见表 4）。

表 4 世界粮食产量病、虫、草害损失估计

作物	虫害损失 (%)	病害损失 (%)	草害损失 (%)	累计损失 (%)
水稻	17.5	9.0	10.6	47.1
玉米	13.0	9.6	13.1	35.7
小麦	5.0	9.5	9.8	24.4
其它谷类作物	6.2	8.8	12.4	27.4
马铃薯	6.0	22.2	4.1	32.3

1997 年我国粮食总产 4925 亿 kg，人均粮食约 400kg；世界人均粮食加拿大最高为 1825kg，其次是丹麦为 1716kg，美国为 1149kg。如不施用农药，因受病、虫、草害的影响，人均粮食在现有基础上就会降低 1/3。这对不同国家会带来不同的后果，对于人均粮食高的国家，只要采取适当措施，就可承受这种压力，如丹麦已决定于 1998 年 8 月起全面禁止化学农药的使用。而对于粮食相对短缺的大国，若同样采取这一措施，其后果则不堪设想。但减少农药用量，避免农药对生态环境的危害，则是各国共同努力的方向。据 D. Pimented 等人研究指出，在美国由于农药的使用，对环境和社会每年造成经济损失为 81.23 亿美元。

由表 5 可以看出，农药的危害影响是多方面的，在美国农药对鸟类资源的危害损失估价最高，其次是对地下水资源的污染损失。在不同国家，农药的污染危害情况及对危害损失的估价，将会随着各国农药的具体使用情况、管理水平与价值观的不同而异，在

发展中国家，农药对公共健康损失的比重将会增大。

毒理学研究认为：环境中的任何一种物质都具有一定的毒性，但是否会造成危害，关键是决定于各类物质对各种生物影响的剂量。近二三十年来，人们从各个学科领域研究农药的毒性、毒理，以及毒性危害与剂量的关键，力求在农药使用中，将农药对人类及生态系统的影响剂量控制在可接受的范围内。为此，在深入研究农药的毒性与毒理的基础上，制定出农药的各种限制标准，如农药的日允许摄入量标准，最大残留限量标准，合理使用标准，以及各种环境标准等。

表 5 农药对美国社会 and 环境的危害损失估价（单位：亿美元）

公共健康损失	7.87
禽畜死亡和污染损失	0.30
天敌危害损失	5.20
农药抗性损失	14.00
蜂及传粉损失	3.20
作物损失	9.42
水产损失	0.24
鸟类损失	21.00
地下水污染损失	18.00
政府预防危害管理费	2.00
合计	81.23

日允许摄入量（acceptable daily intake, ADI）：是指人体长期每天摄入某种农药，对健康不引起可觉察有害作用的剂量。ADI 值是通过动物的慢性毒性试验求得的最大无作用剂量，除以安全系数，用相当于人体每千克体重每日允许摄入农药的毫克数表示〔单位：mg/（kg·d）〕。按以下公式计算：

日允许摄入量（ADI）= 动物最大无作用剂量/安全系数

因人与动物之间，以及人群个体之间对毒物反应敏感性的差异，所以用动物试验求得的农药的最大无作用剂量，一般要除以 100 的安全系数，对一些可能有特殊毒性的农药，其安全系数可定为 1000~5000，甚至更高。有了 ADI 值以后，就可进一步求算农产品与食品中农药的最大残留限量。

最大残留限量（maximum residue limit, MRL）是农畜产品中农药残留法定的最大允许浓度。它是根据人体对农药的日允许摄入量，人群膳食结构中每日进食各种食物的数量，以及平均人体重等参数，用以下公式求得（单位，mg/kg）：

最大残留限量（MRL）= ADI × 人体平均重（kg）/ 进食量（kg）

人体平均重量，中国一般以 60kg 计，进食量因求算 MRL 值的食物对象的不同，各种食物的进食量也随之而异，我国一般按下列数量分别求得：粮食 0.5kg，蔬菜 0.3kg，水果 0.1kg，油 0.05kg，其它 0.2kg。

有了农药在各种农产品上的最大残留限量标准以后，就可通过田间农药残留试验，求得农药的安全使用条件，制定出农药的合理使用标准，对每种农药在各种作物上施用都规定其允许施用的数量，施用次数，及最后一次施药离收获期允许的时间间隔期。

至 1997 年我国有 140 种农药品种，在 19 种作物上已制定了 300 项合理使用标准，这对防止农药对农产品的污染起着巨大作用。在一般情况下，只要按照合理施用标准使

用农药，生产的粮食、蔬菜、水果等各类农产品，均可符合现行的食品卫生标准，食用后对人体无危害影响。

据有关调查结果表明：由于贯彻了农药合理使用等各项农业措施，农产品的污染状况已有明显好转，但各地不按照规定乱用、滥用、误用农药情况还相当普遍，各种各样的污染问题时有发生，据 1995 年 7 月至 1996 年 8 月对黑龙江、广东、江苏等 19 个省市自治区的不完全统计（顾宝根，1997），各地区发生作物药害面积 13 多万公顷，经济损失近 5 亿元，如将全国各地对各种作物的大小药害事故全加在一起，总经济损失估计近 10 亿元。受害作物主要是水稻、棉花、玉米、油菜、水果等；导致危害的农药品种，主要是一些高效与超高效的除草剂，占总受害面积的 80% 左右。如 1995 年安徽和县使用胺苯磺隆除草剂不当，造成 300 多公顷油菜死亡，同年黑龙江友谊农场，在施用过普杀特除草剂的大豆地上改种水稻，土壤中残留的普杀特造成了 260hm² 后茬水稻的危害。

我国目前生产的农药多数是仿制农药，上述的 ADI、MRL 值标准多数是参照国外标准，随着科学的发展，人们对各种毒物危害性认识的提高，各种标准不断在修改，要求愈来愈严，因此面临着农药合理使用标准也应相应的改变，只有这样才能使生产的产品符合新规定的各类食品卫生标准。

表 6 欧洲联盟农药残留 MRL 值的变化 (单位: mg/kg) *

农药	农产品	1982 年	1993 年	下降倍数
敌敌畏	各种植物性产品	0.1	0.01	10
硫丹	粮、果、菜	0.2~0.5	0.01~0.1	1~50
乙酰甲胺磷	果	1.0	0.02	50
马拉硫磷	果、菜	0.5~3.0	0.1	5~30
杀扑磷	果、菜	0.2	0.1	1
苯菌灵	果、菜	5.0	0.1	50
溴螨酯	果、菜	1.0~3.0	0.1	10~30
三氯杀螨醇	果、菜	0.5~2.0	0.1	5~20
氯菊酯	果、菜	0.5	0.05	10
氰戊菊酯	果、菜	3.0	0.05	60
溴氰菊酯	果、菜	5.0	0.05	100

* 1998 年 1 月 1 日起实施。

最近欧洲共同体对农产品中的农药残留限量 (MRL) 有了新的规定 (见表 6)，一般比原有标准下降了 1 个数量级左右，特别需要注意的是，在我国普遍施用，一般认为是低毒的拟除虫菊酯类农药的残留标准下降倍数更大。

以上讨论的主要是农药的生产和使用，及其在农田生态系统中的残留与危害问题。施于农田的农药必将有一部分通过迁移扩散进入农田以外的自然环境之中，并对自然生态系统产生各种各样的危害影响。因此安全使用农药不仅要保护好农田生态系统，还要保护好整个自然生态系统，这是农药环境毒理学需要研究、环境科学工作者需要解决的重大任务。

2. 农药对生态环境的影响

为了确保农药对生态环境的安全性，农药从研制开始，到生产使用，直至农药在环境中消失的全过程，都需要有农药环境毒理学研究、农药对生态环境的安全性评价，以及农药的环境监测与环境管理工作的参与与配合。

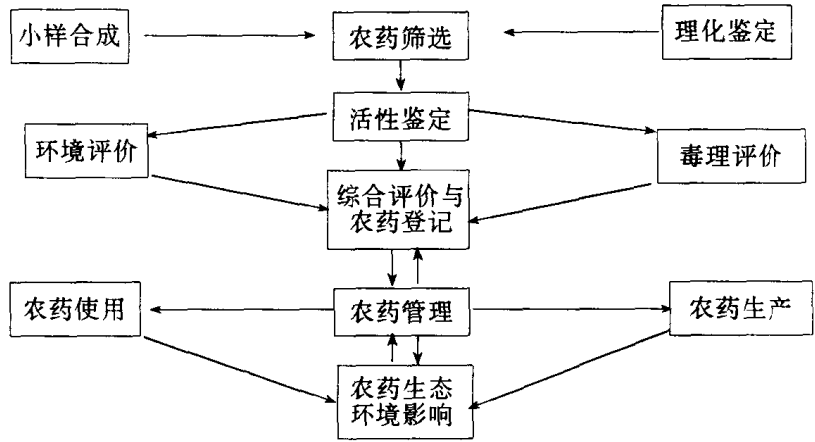


图2 农药的开发与生产使用程序

农药的环境安全评价分农药登记时的预评价与登记使用后的现状评价两个阶段，从图2可以看出，在农药的开发阶段，在农药的筛选中对已确认有活性的物质，需通过卫生毒理学与环境毒理学的预评价合格，再经过综合评价方能取得农药登记资格。农药的环境毒理学预评价工作，一般都在模拟试验条件下进行，因受试验条件的限制，它不可能反映出农药使用后对生态环境影响的全部情况，如农药对地下水的污染问题，以及农药对整个生态系统危害影响等问题，只有当农药大面积使用一段时期后，才能暴露出来。因此，在农药生产和使用后还须进一步做好农药对生态环境影响的现状监测与评价工作，对在现状评价中发现有严重问题的农药品种，在农药的再登记中可予以撤销登记资格，或对其使用条件作一些新的限制性规定。一个农药品种，在开发与生产使用过程中，经过对环境安全性预评价与现状评价，登记与再登记的反复过程，其安全性问题就得到了充分的保证。

农药环境毒理是研究农药的环境行为、生态效应、环境管理和污染防治的学科分支，是环境科学与农药科学的组成部分。其目的是评价农药对生态环境的安全性，为农药的合理使用，防治农药的污染和指导新农药的开发和登记提供科学依据。

2.1 农药的环境行为

农药的环境行为是农药在环境中发生的各种物理和化学现象的统称，包括农药在环境中的化学行为与物理行为。化学行为主要是指农药在环境中的残留性，及其降解与代谢过程；物理行为是指农药在环境中的移动性，及其迁移扩散规律。

2.1.1 农药的残留性

农药的残留性是指农药施用后在环境及生物体内残存时间与数量的行为特征，它主要决定于农药的降解性能，但也与农药的物理行为移动性有一定关系。农药残留期的长