

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20150324013

于彩虹, 李春燕, 林荣华, 等. 农药对陆生生物生态毒性及风险评估[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(6): 21-28

Yu C H, Li C Y, Lin R H, et al. Eco-toxicity and risk assessment of pesticide on terrestrial organisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(6): 21-28 (in Chinese)

农药对陆生生物的生态毒性及风险评估

于彩虹¹, 李春燕¹, 林荣华^{2,*}, 宗伏霖², 姜辉², 瞿唯钢²

1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083

2. 农业部农药检定所, 北京 100125

收稿日期: 2015-03-24 录用日期: 2015-05-27

摘要: 农药的使用会对非靶标生物造成影响, 由此世界各国都采取了风险控制手段以预防农药造成的生态危害。本文综述了欧洲、美国和日本针对农药开展的陆生生态系统风险评估方法, 包括陆生非靶标生物、风险评估模型、风险评估的基本方法及生态毒性的评价指标。同时分析了农药登记管理对陆生生物的生态毒性及风险评估中存在的科学问题, 且提出了方法学的发展方向。

关键词: 农药; 陆生生态系统; 生态毒性; 风险评估

文章编号: 1673-5897(2015)6-021-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Eco-toxicity and Risk Assessment of Pesticide on Terrestrial Organisms

Yu Caihong¹, Li Chunyan¹, Lin Ronghua^{2,*}, Zong Fulin², Jiang Hui², Qu Weigang²

1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. Institute for the Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China

Received 24 March 2015 accepted 27 May 2015

Abstract: Intensive application of pesticides could result in eco-toxicities on non-target organisms, and ecological risk management of pesticides is a key measure to prevent adverse ecosystem consequences. This study herein mainly focused on reviewing ecological risk assessment of pesticide on terrestrial organisms with respect to model test species, models, methodologies and end-points used in different countries. In addition, the authors analyzed the limitations in presenting registration protocols of eco-toxicity tests and risk assessment for pesticides regarding to terrestrial organisms, and put forward prospective solution.

Keywords: pesticides; terrestrial ecosystem; eco-toxicity; risk assessment

农药对发展农业生产、促进农作物优质高产, 保障人类粮食需求做出了巨大贡献^[1], 但长期、大量不合理使用农药, 对陆生生态系统及其中的有益生物造成了不同程度的危害^[2]。而陆生生态系统为包括

人类在内的所有物种提供了生存的机会。因此, 有必要评估农药危害对于陆生生态系统的影响。由于人类活动和农业中农药的使用, 各种单一结构和功能的生态系统的混合使得陆生生态系统更为复杂,

基金项目: 国家自然科学基金(31471803, 31171912); 公益性行业(农业)科研专项(201203022)

作者简介: 于彩虹(1973-), 女, 教授, 研究方向为环境生物学、生物化工、水污染控制, E-mail: caihongy2013@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: linronghua@agri.gov.cn

有关农药影响评估已成为安全评估中最重要的问题之一。世界各国都在积极探索采用各种技术和手段对农药进行风险评估,以预防和降低农药对环境的影响^[3]。以欧洲各国和美国为首的许多国家已形成监管程序,将环境风险评估作为农药登记注册要求中不可缺少的环节^[4-5]。但是生态环境中存在大量未知敏感程度的生物物种,且目前各国对陆生生物的生态毒理学知识比较匮乏,所以导致陆生生态系统风险评估变得更加困难。

1 陆生生物风险评估概述

1.1 风险评估的对象

根据生物多样性公约,生态系统是一个由植物、动物和微生物群落的动态复杂性和它们的非生命环境交互作用构成的功能单位^[6]。对于陆生生态系统,其风险评估对象是生物体。而根据生物体在生态系统中执行的功能不同,可归纳为3个部分:(1)生产者,绿色植物为主;(2)消费者,吸收营养的生物体;(3)分解者,以排泄物和尸体为食并能矿化排泄物和尸体的生物体。

1.2 风险评估概念模型

风险评估概念模型的基础是介质与受体之间的相互作用^[7]。模型见图1,上层代表暴露,下层代表受体。农药到达最初的暴露介质(土壤、大气、水和

叶面),并向环境中扩散,最终到达生态受体(生物体)。评估过程应对暴露介质和环境中受体间的相互关系及农药的环境动力学和食物链予以考虑。

1.3 风险评估的基本要求

总体上,风险评估是针对农药在生态系统中的暴露量与农药对于目标物种的毒性进行比较评估。即危害商值 $HQ = \text{预测生态系统中暴露农药量} / \text{农药对目标生物毒性}$ 。当农药在生态系统中暴露量小于农药对目标生物的一定毒性,则存在的风险较低;农药在生态系统中暴露量大于农药对目标生物的一定毒性,则存在风险。根据风险水平和分级,确定风险可接受程度,采取必要的措施,以降低风险。欧美等国家风险评估过程包括问题阐述、暴露评估、效应评估、风险表征的4个环节。在暴露评估和效应评估阶段,按照由简单到复杂、由室内模拟到田间实际的原则,设置了分级评估方法(Tier)。暴露评估各个地区或国家基本一致,即通过室内理化性质检测或田间实际监测,获得预测暴露量(predicted environmental concentration, PEC)。而由于不同地区在栖息地、农业形式、气象与气候、文化、思想、价值观、工业和人类社会的其他方面存在差异,效应评估的目标物种和所需的实验数据有所不同,表1列出了美国、日本以及欧洲一些国家的生态毒性评估的目标物种和数据要求^[8-13]。

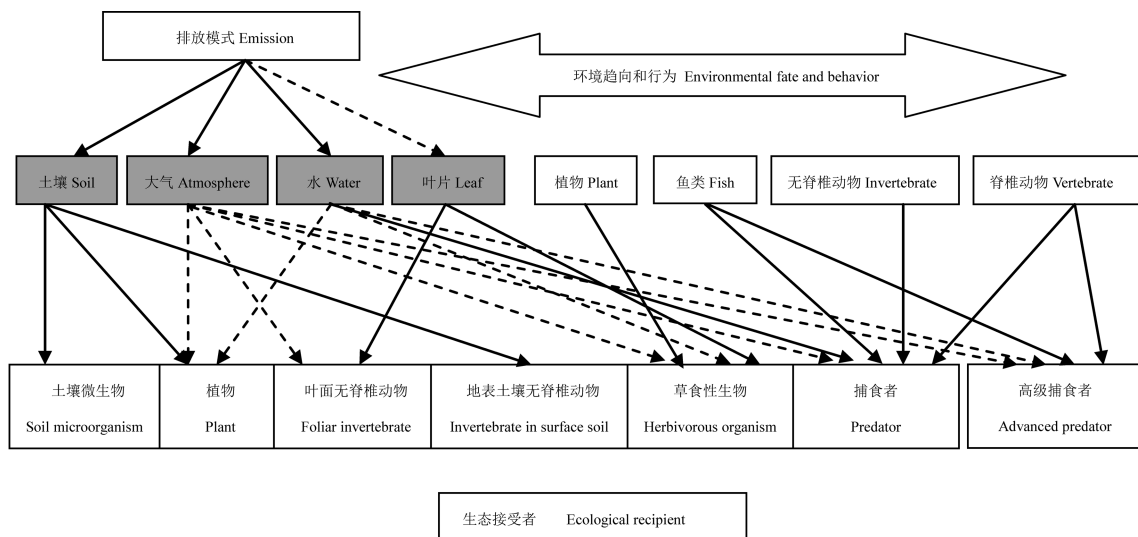


图1 陆生生态系统风险评估的概念模型

注:化学物质到达初始暴露区域(灰色部分),分布于环境中并到达生态受体。

Fig. 1 Conceptual model for hazard and risk assessment for the terrestrial ecosystems

Note: The chemical reaches the initial exposure area (grey parts) and is distributed in the environment, which gets into the ecological receptor finally.

表 1 欧盟 (EU)、美国 (US) 和日本农药注册户外使用生态毒性的数据要求^[8-13]Table 1 Data requirements in pesticide registration for representative outdoor use patterns in European Union (EU), America (USA) and Japan^[8-13]

分类 Taxon		数据要求 Data requirements	欧盟 EU	美国 USA	日本 Japan
鸟类 Bird		急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	R	R	R
	一级 First tier	短期:5 日饮食研究 Short term: 5 day diet study	CR	R	CR
		长期:繁殖研究 Long term: study on reproduction	CR	R	NR
		诱饵、微粒或处理的种子的回避/适应性实验 Avoidance/adaptation tests of bait, granule or treated seeds	CR	NR	NR
脊椎动物 Vertebrate	高级 High tier	围栏/笼子实验 Enclosure/cage test	CR	NR	NR
		野生鸟类:田间实验 Wild birds: field test	CR	CR	NR
哺乳动物 Mammal	一级 First tier	急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	R	R	NR
		长期:繁殖研究(或致畸性研究) Long term: study on reproduction or teratogenicity	R	R	NR
		野生哺乳动物:急性研究 Wild mammals: acute study	NR	CR	NR
	高级 High tier	围栏/笼子实验 Enclosure/cagetest	CR	NR	NR
无脊椎动物 Invertebrate		急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	R	NR	
	一级 First tier	急性:急性触杀研究 Acute:acute contact study	R	R	R*
	蜜蜂 Honeybee	蜜蜂幼雏饲养研究 Young bee breeding research	CR	NR	NR
		残留实验 Residue test	CR	CR	NR
	高级 High tier	围栏/笼子实验 Enclosure/tunnel test	CR	NR	NR
其他节肢动物 Other arthropod		田间实验 Field test	CR	CR	CR
	一级 First tier	标准实验室研究 GLP study	R	NR	R
	高级 High tier	扩展的实验室/老化残留研究 Extended/residue study	CR	NR	NR
		田间实验 Field test	CR	NR	CR
蚕 Silkworm	一级 First tier	急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	NR	NR	R
	高级 High tier	残留实验 Residue test	NR	NR	CR

续表1

分类 Taxon	数据要求 Data requirements	欧盟 EU	美国 USA	日本 Japan
蚯蚓 Earthworm	一级 Acute: acute study 慢性:繁殖研究 Chronic: study on reproduction	R	NR	NR
	高级 Field test	CR	NR	NR
	一级 Study on nitrification and mineralization of soil	R	NR	NR
土壤生物 Organism in soil	高级 Field test	CR	NR	NR
	一级 跳虫/革螨:繁殖研究 Springtails/gamasid mites: study on reproduction	CR	NR	NR
	高级 垃圾袋实验 Garbage bag test	CR	NR	NR
植物 Plant	一级 筛选数据(如:植物毒性,出苗/营养活力研究) Screening data (e.g., study on plant toxicity, emergence / vegetative activity)	R	R	NR
	高级 田间实验 Field test	CR	CR	NR

注:R,需要;CR,必要时需要;NR,不需要;* ,急性经口或急性接触研究。

Note:R, Required; CR, Conditionally required; NR, Non-required; * Acute oral or contact study.

2 不同地区(欧盟、美国和日本)陆生生物风险评估

对注册农药进行风险评估时发现,不同地区生物群存在特殊性。本文将分别介绍欧洲、美国和日本的农药对陆生生物风险评估方法。

2.1 欧盟

欧洲对于农药风险评估研究始于 20 世纪 80 年代,1999 年欧盟 91/414 法规明确规定需要评估农药对包括陆生生物(蜂、鸟、蚯蚓、非靶标节肢动物)等非靶标生物的风险^[14]。2000 年欧盟毒理学、生态毒理学和环境科学委员会(CSTEE)提出,以科学为基础适当地对陆生生物进行风险评估^[15]。CSTEE 对风险评估的主要目标是与人类相关的生态系统的结构和功能,因此保护目标停留在种群或群落水平,对高生态领域的风险评估关注度仍然不够^[16]。欧洲和地中海植物保护组织(EPPO)、环境毒理学会和化学学会(SETAC)、欧洲食品安全局(EFSA)等组织和科学工作者经过大量的研究,提出了将鸟类、哺乳动物、蜜蜂、非靶标节肢动物、蚯蚓、土壤微生物、非靶标植物等作为评估目标,尽量代表陆生生态系统的不同层次,使生态系统的风险评估更加科学,可操作性更强。欧盟不仅对生物群的评估使用不同指标,

并提出对农田和其他农用物资中生存的生物体进行评估。表 2 列出了欧盟评估的生态受体和相关指标^[8-10],并对其中一些有益的或有生态价值的受体建立较完善的风险评估体系,如:鸟类、哺乳动物、蜜蜂和非靶标节肢动物等。

(I) 鸟类和哺乳动物

鸟和哺乳动物主要通过经口途径暴露,这是最频繁和暴露量最多的途径,且是最重要的途径。

由于鸟类具有长途旅行,能够适应并在受干扰的栖息地生存及对许多环境污染物高度敏感等特点,故进行较低层次的评估时,需要从鸟类(美洲鹌或日本鹌鹑)的急性经口实验中获取数据,当暴露的母体动物和巢穴处于繁殖期并受到农药污染且影响不能消除时,获取某种鸟类物种的繁殖实验数据是必要的。哺乳动物在地表上下、树上、水中或其他栖息地觅食和筑巢,增加了暴露的几率,因此需要对哺乳动物进行评估^[17]。当对野生哺乳动物进行评估时,可使用老鼠的急性经口实验数据,也可使用人类健康风险评估中的两代繁殖试验那样的长期实验获得的数据。

(II) 蜜蜂^[8-9,14,18]

除了不考虑限制使用农药的蜜蜂暴露区,如食

表 2 欧盟注册农药生态毒性和风险评估的数据要求和参数(一级阶段)
Table 2 Data requirements and parameters for toxicity, exposure and risk assessment
for the pesticide registration in EU (Tier-1)

分类群 Taxon	数据要求 Data requirements	终点 Endpoint	暴露参数 Exposure parameters	风险参数 Risk parameters	TER/HQ 的触发值 Trigger value of TER/HQ
鸟类 Bird	急性;急性经口研究 Acute:acute oral study	LD ₅₀			≥ 10
	短期;5 日饮食研究 Short term: 5 day diet study	LC ₅₀	DDD	TER	≥ 10
	长期;繁殖研究 Long term: study on reproduction	NOEC			≥ 5
哺乳动物 Mammal	急性;急性经口研究 Acute:acute oral study	LD ₅₀			≥ 10
	长期;繁殖研究(或致畸性研究) Long term: study on reproduction/teratogenicity	NOEL	DDD	TER	≥ 5
蜜蜂 Honeybee	急性;急性经口或触杀研究 Acute: acute oral or contact study	LD ₅₀	施用量 Application concentration	HQ	< 50
	蜜蜂幼雏饲养研究 Young bee breeding research	NOEC	施用量 Application concentration	TER	≥ 1
其他节肢动物 Other arthropod	标准实验室研究 GLP study	LR ₅₀	暴露率 Exposure rate	HQ	< 2
蚯蚓 Silkworm	急性;急性研究 Acute: acute study	LC ₅₀	土壤 PEC PEC in soil	TER	≥ 10
	慢性;繁殖研究 Chronic: study on reproduction	NOEC	土壤 PEC PEC in soil	TER	≥ 5
土壤非靶标微生物 Non-target microorganism in soil	土壤硝化和矿化研究 Study on nitrification and mineralization of soil	NOEC	土壤 PEC PEC in soil	TER	≥ 1
其他土壤非靶标生物 Other not-target organism in soil	跳虫/革螨;繁殖研究 Springtails/gam- asid mites: study on reproduction	NOEC	土壤 PEC PEC in soil	TER	≥ 5
非靶标植物 Non-target plant	筛选数据,如植物毒性 Screening data (e.g.,study on plant tox- icity)	NOEC	施用量 Application concentration	TER	≥ 1

注:LD₅₀,半数致死量;LC₅₀,半数致死浓度;LR₅₀,半数致死率;NOEC,最大无影响浓度;NOEL,无作用剂量;DDD,每日饮食剂量;TER,毒性暴露率;HQ,危害商值;土壤 PEC,土壤中的预测环境浓度。

Note:LD₅₀, median lethal dose; LC₅₀, median lethal concentration; LR₅₀, median lethal rate; NOEC, no observed effective concentration; NOEL, no observed effective level; DDD, daily dietary dose; TER, toxic exposure rate; HQ, hazard quotient; PEC in soil, predicted environmental concentration in soil.

物储存在密闭的空间和使用未授粉的大棚,对蜜蜂进行急性经口和急性触杀实验是必要的。效应评估的终点是 LD₅₀(μg/蜜蜂),之后结合其暴露量,要计算危害商值(HQ,施用量(g·ha⁻¹)/LD₅₀)。当 HQ<50

时,认为风险较低。此外,当化学物质作为昆虫生长调节剂(IGR)时,进行蜜蜂育雏饲养试验(评估对蜜蜂幼虫造成的风险)是必要的。当 HQ≥50 时,需要通过更高层次的实验对安全性进行评估,如残留实

验、网笼实验、风洞实验和大田实验。然而, HQ 的触发值设为 50 仅仅适用于喷洒型农药。

(III)非靶标节肢动物^[19]

与蜜蜂的情况相似,但是考虑到非靶标节肢动物的物种多样性和敏感程度,非靶标节肢动物的风险评估存在更大困难。欧盟设定非靶标节肢动物在室内试验阶段效应评估终点为 $LR_{50}(\mu\text{g}\cdot\text{ha}^{-1})$,其危害商值 $HQ < 2$,认为风险较低;当 $HQ_{50} \geq 50$ 时,需要开展更高层次的实验。在高级阶段,对非靶标节肢动物种群或群落影响超过 50% 时,风险不可接受。

2.2 美国

美国的农药风险评估工作由美国环境保护局(EPA)负责。目前,EPA 已经建立了一整套完善的农药风险评估体系,对新农药、在用农药和撤消后的农药都建立了有效的监管机制^[20],同时美国以风险评估为基准,确定了农药对鸟类、哺乳动物、蜜蜂和非靶标植物的风险评估指标及可接受标准(表 3)。该评估中的基本概念和欧盟是相同的,但美国主要考虑的是濒危物种,并专门制定了美国濒危物种保护法(Endangered Species Act)。此外,美国的风险评估

表 3 美国注册农药生态毒性和风险评估的数据要求和参数(一级阶段)

Table 3 Data requirements and parameters for toxicity, exposure and risk assessment for the pesticide registration in US (Tier-1)

分类群 Taxon	数据要求 Data requirements	终点 Endpoint	暴露参数 Exposure parameters	风险参数 Risk parameters	关注度 Degree of concern
鸟类 Bird	急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	LD_{50}	基于剂量的 EEC EEC based on the dose	基于剂量的 RQ RQ based on the dose	0.5 (0.1*)
	短期:5 日饮食研究 Short term: 5 day diet study		基于饮食的 EEC EEC based on the diet	基于饮食的 RQ RQ based on the diet	
	长期:繁殖研究 Long term: study on reproduction	NOEC	基于饮食的 EEC EEC based on the diet	基于饮食的 RQ RQ based on the diet	1
	急性:急性经口研究 Acute:acute oral study	LD_{50}	基于剂量的 EEC EEC based on the dose	基于剂量的 RQ RQ based on the dose	0.5 (0.1*)
长期:繁殖研究或致畸性研究 Long term: study on reproduction or teratogenicity	NOEC/NOEL		基于饮食的 EEC 或基于剂量的 EEC EEC based on the diet or dose	基于饮食的 RQ 或基于剂量的 RQ RQ based on the diet or dose	
蜜蜂 Honeybee	急性触杀研究 Acute contact study	LD_{50}	—	—	< 11 μg a.i./蜜蜂 < 11 μg a.i./bee
非靶标植物 Non-target plant	出苗率研究 Germination rate study 植物活力研究 Plant viability study	NOEC	应用率或 3 倍的 EEC Application rate or 3 times of EEC	—	< 25% 的不良影响 Adverse effect < 25%

注:EEC,环境暴露浓度;RQ,风险商;a.i.,有效成分。

Note:EEC, Environmental Exposure Concentration; RQ, Risk Quotient; a.i., active ingredient.

中使用了风险商值(RQ)这个概念,即环境中预测浓度与终点浓度的比值,即 TER 的倒数,其以暴露量与效应值关系评估农药风险的核心理念与欧盟基本一致。

(I)鸟类和哺乳动物^[11-12,21-24]

根据农药的类型,需要 2 种鸟类进行急性经口实验,一种是雀形目鸟,另一种是美洲鹑或野鸭,并对这 2 种鸟类进行为期 5 天的饮食和繁殖实验。当温室中使用液体制剂或其他类型的药品时,不需要进行急性经口实验。此外,对于哺乳动物,需要对人类健康风险评估中的老鼠急性经口实验和两代繁殖实验等长期实验数据进行评估,同时,参照上述实验的结果,判断是否需要急性毒性实验和使用野生生物的其他实验。

(II)蜜蜂^[11-12,21-23]

根据农药的不同类型,可能需要通过西方蜜蜂(*Apis mellifera*)获取急性触杀实验数据。风险评估使用的毒性终点是 $LD_{50}(\mu\text{g}/\text{蜜蜂})$,但当 $LD_{50} < 11 \mu\text{g}/\text{蜜蜂}$ 时,则需要开展更高层次的残留实验或田间授粉实验。

2.3 日本

日本需要进行评估的靶标生物^[13]有鸟类、蜜蜂、天敌昆虫和桑蚕,同时考虑到与农业相关的行业,并对陆生生物进行定性的风险评估。目前的风险评估以危害评估为基础,并在商品标签上作出警示。

(I) 鸟类^[13,25]

对鸟类需要开展急性经口实验。当发现毒性强烈($LD_{50} < 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时,则需要开展进食实验。而当毒性较低时,则不需要进行警示。

(II) 蜜蜂^[13,25]

从养蜂和传粉昆虫风险评估角度来看,需要对西方蜜蜂进行急性毒性实验(急性经口或急性触杀实验)。然而,由于农药制剂的类型和使用方法的不同(如:设备中的颗粒物或存储的熏蒸剂),暴露在农药中的蜜蜂没有风险,则可不用递交风险测试结果。当急性毒性实验结果为毒性强烈时,则需要进行田间实验。当 $LD_{50} > 11 \mu\text{g}$ /蜜蜂或在农药注册的最大应用剂量未发现影响时,则认为没有风险。

3 展望

陆生生态系统中农药的风险评估非常复杂和困难,但随着科技进步,欧盟和美国正在开展更为细致的风险评估。目前,经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)的测试准则中已有 30 种方法用于农药风险评估,并且正在研究新的用于标准实验室测试的实验类型和方法。此外,日本正在考虑将欧盟和美国的风险评估方法引入本国的农药管理条例中,即引入适用于 2 种陆生生物评估的比较毒性指标和暴露水平^[26-27]。

与国外陆生生物农药风险评估相比,中国农药风险评估工作起步晚、体系不完善。虽然中国农药登记管理中提出了对于蜂(急性经口、急性接触)、鸟(急性经口、短期饲喂)、蚕、天敌赤眼蜂、蚯蚓、土壤微生物、非靶标植物等陆生生物的毒性要求,但是缺少哺乳动物等要求,且限于急性毒性资料要求,仅要求“对于对环境某方面有特殊风险的农药,还应提供相应的补充资料”^[28]。风险评估未成体系,风险评估方法、模型及指标也都处于摸索阶段,总体上处于欧美等发达国家的初级阶段。为与国际接轨,在陆生代表生物物种的选择上,除了家蚕(*Bombyx mori* L.)、天敌赤眼蜂(*Trichogramma* spp.)外,我国延续采用了西方蜜蜂(*Apis mellifera*)、日本鹌鹑(*Coturnix japonica*)、赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)、非洲爪

蟾(*Xenopus laevis*)等作为靶标生物标准物种^[29],但是这些靶标生物究竟是否能够代表中国该类或该种生物,仍待进一步的研究验证。在评价方法上,农药对爬行类动物、两栖类动物评价方法尚不成熟。

与此同时,由于全球日益关注,农药对于陆生生物影响方面研究愈来愈多。如,针对于吡虫啉等新烟碱类杀虫剂对于蜜蜂的风险评估的工作方兴未艾;针对混配农药,探索混合毒性评价方法是当前研究热点;通过模拟田间或者田间试验,在更接近实际农药应用情况下,探索农药对于陆生生态系统的影响,建立评估模型也是重要方向。从国际发展态势看,减少测试动物用量和实验数目,优化试验程序将是未来毒性评价的主流方向,用计算毒理学方法、高通量和高内含离体细胞代替动物实验的方法等,都是农药生态毒性评价的未来趋势。今后,需要努力积累更多的知识和技术,包括使用鸟胚胎的简单评估系统、探索 QSAR 定量构效关系等,以图发展适合中国自身情况的陆生生态系统风险评估体系,推动研发和生产使用对生态环境更加安全和友好的农药。

通讯作者简介:林荣华(1974-),男,博士,副研究员,主要从事农药登记管理方面研究。

参考文献 (References):

- [1] 邓文, 胥志文. 农药施用问题与对策[J]. 陕西农业科学, 2013(2): 232-235
Deng W, Xu Z W. Problems and countermeasures of pesticide application [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2013(2): 232-235 (in Chinese)
- [2] 单正军, 陈祖义. 农药对陆生环境生物的污染影响及污染控制技术[J]. 农药科学与管理, 2007, 28(11): 18-26
Shan Z J, Chen Z Y. Effect of pesticide contamination to terrestrial organism and pollution control technology [J]. Pesticide Science and Administration, 2007, 28(11): 18-26 (in Chinese)
- [3] 顾宝根, 程燕, 周军英, 等. 美国农药生态风险评价技术[J]. 农药学报, 2009, 11(3): 283-290
Gu B G, Cheng Y, Zhou J J, et al. Review on USA pesticide ecological risk assessment techniques [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2009, 11(3): 283-290 (in Chinese)
- [4] 程燕, 周军英, 单正军, 等. 国内外农药生态风险评价研究综述[J]. 农村生态环境, 2005, 21(3): 62-66
Cheng Y, Zhou Y J, Shan Z J, et al. A review of ecologi-

- cal risk assessment of pesticides at home and abroad [J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(3): 62–66 (in Chinese)
- [5] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 生态风险评价及研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869–1876
- Yang W R, Wang R S, Huang J L, et al. Ecological risk assessment and its research progress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1869–1876 (in Chinese)
- [6] Convention on Biological Diversity, 21 December 1993. http://www.biodic.go.jp/biolaw/jo_hon.html
- [7] Tarazona J V, Vega M M. Hazard and risk assessment of chemicals for terrestrial ecosystems [J]. *Toxicology*, 2002, 181: 187–191
- [8] European Commission. Commission Directive 96/12/EC of 8 March 1996 amending Council Directive 91/414/EEC [R]. EC, 1996
- [9] European Commission. Working Document Guidance Document on Terrestrial Ecotoxicology under Council Directive 91/414/EEC, SANCO/10329/2002 rev.2 (final) [R]. EC, 2000
- [10] EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). Guidance Document on Risk Assessment for Birds and Mammals on request from EFSA [R]. Parma, Italy: European Food Safety Authority, 2009, 7(12): 1438
- [11] U.S. Environmental Protection Agency, Federal Register [R]. US EPA, 2007
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, Code of Federal Regulations [R]. US EPA, 2008
- [13] Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japan). Data Requirements for Supporting Registration of Pesticides, 12 NohSan, Notification No. 8147 including the Notification No.18-Shouan-14851 [R]. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japan), 2007
- [14] European Commission. Council Directive 97/57/EC of 22 September 1997 establishing Annex VI to Directive 91/414/EEC [R]. EC, 1997
- [15] CSTE. The available scientific approaches to assess the potential effects and risk of chemicals on terrestrial ecosystems. C2/JCD/csteop/Ter91100/D(0). Europe Commission. Directorate-General Health and Consumer Protection [R]. Brussels: EC, 2000: 178
- [16] Macedo-Sousa J A, Soares A M V M, Tarazona J V. A conceptual model for assessing risks in a Mediterranean Natura 2000 Network site [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(3): 1224–1231
- [17] Smith P N, Cobb G P, Godard-Codding C, et al. Contaminant exposure in terrestrial vertebrates [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1): 41–64
- [18] EPPO. Environmental risk assessment scheme for plant protection products. Chapter 11. Honeybees [R]. EPPO Bulletin, 2002
- [19] EPPO. Environmental risk assessment scheme for plant protection products. Chapter 9. Non-target terrestrial arthropods [R]. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 2003, 33: 99–101
- [20] 魏启文, 陶传江, 宋稳成, 等. 农药风险评估及其现状与对策研究[J]. *农产品质量与安全*, 2010(2): 38–42
- Wei Q W, Tao C J, Song W C, et al. Study on status quo and measures of pesticide risk assessment [J]. *Quality and Safety of Agro-products*, 2010(2): 38–42 (in Chinese)
- [21] U.S. Environmental Protection Agency. Hazard Evaluation Division Standard Evaluation Procedure Ecological Risk Assessment, EPA 540/9–85–001 [R]. US EPA, 1986
- [22] U.S. Environmental Protection Agency. Pesticide Reregistration Rejection Rate Analysis Ecological Effect, EPA 738-R-94-035. [R]. US EPA, 1994
- [23] U.S. Environmental Protection Agency. Ecological Risk Assessment: Technical Overview [R]. US EPA, 2008. http://www.epa.gov/oppefed1/ecorisk_ders/
- [24] U.S. Environmental Protection Agency. ECOFRAM Terrestrial Draft Report [R]. US EPA, 1999. <http://www.epa.gov/oppefed1/ecorisk/terrreport.pdf>
- [25] Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japan). Guidance for Data Requirements for Supporting Registration of Pesticides, 13 Seisan, Notification No. 3986 including the Notification No. 18-Shouan-14852 [R]. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Japan), 2007
- [26] Ministry of the Environment Government of Japan. 21st Century Environmental Strategy [R]. Ministry of the Environment Government of Japan, 2007. http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/21c_strategy_070601.pdf
- [27] Ministry of the Environment Government of Japan. Budget on 2008 (draft) - Investigations for establishment of the ecological risk assessment scheme of pesticides in terrestrial ecosystems [R]. Ministry of the Environment Government of Japan, 2008. <http://www.env.go.jp/guide/budget/h20/h20-gaiyo-2/124.pdf>
- [28] 中华人民共和国农业部. 农药登记资料规定. 农业部令 第 10 号[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2007
- [29] 蔡道基, 杨佩芝, 龚瑞忠. 化学农药环境安全评价试验准则[R]. 南京: 环境保护部南京环境科学研究所, 1989