

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20151022001

陈洋, 周军英, 程燕, 等. 农药在稻田使用对地下水的风险评估研究进展[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1): 70-79

Chen Y, Zhou J Y, Cheng Y, et al. Progress of ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(1): 70-79 (in Chinese)

农药在稻田使用对地下水的风险评估研究进展

陈洋¹, 周军英^{1,2,*}, 程燕², 廖建华¹

1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044

2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

收稿日期: 2015-10-22 录用日期: 2015-11-20

摘要: 农药风险评估可为农药登记和农药的环境安全管理提供重要的科学依据。水稻生产过程中病虫害严重, 农药使用品种多, 频次高, 田水存留时间长, 对地下水污染风险高。开展农药在稻田使用对地下水的风险评估研究具有重要的现实意义。文章详细介绍了欧盟和美国的水稻-地下水风险评估研究进展, 包括风险评估程序、暴露评估模型及暴露场景等。总结了我国农药在稻田使用对地下水风险评估的研究现状, 并分析了我国研究的不足之处。在此基础上, 提出了加强我国农药在稻田使用对地下水风险评估的建议。

关键词: 农药; 稻田; 地下水; 风险评估

文章编号: 1673-5897(2016)1-070-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Progress of Ground Water Risk Assessment for Pesticides Used in Rice Paddy

Chen Yang¹, Zhou Junying^{1,2,*}, Cheng Yan², Liao Jianhua¹

1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China

Received 22 October 2015 **accepted** 20 November 2015

Abstract: Pesticide ecological risk assessment provides scientific basis for pesticide registration and environmental safety management. In rice cultivation, the high occurrence of diseases, pests and weeds requires many pesticides to be used frequently over the growing season. Additionally, the presence of rice paddy water is often required for a relatively long time after pesticide application. All these factors may pose potential risk of groundwater contamination. Hence, it is important to conduct ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy. In this paper, progresses on groundwater risk assessment of EU and U.S. for pesticides used in rice paddy were reviewed, including risk assessment procedures, exposure models and scenarios. Current status of groundwater risk assessment in China was also summarized and shortcomings were analyzed. Finally, suggestions to enhance groundwater risk as-

基金项目: 国家环境保护标准项目“农药生态风险评价程序与方法(2014-72)”; 2016 中央级公益性科研院所基本科研业务专项“我国流域尺度农药暴露模拟评估技术研究”

作者简介: 陈洋(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农药风险评估, E-mail: 365883137@qq.com;

* **通讯作者** (Corresponding author), E-mail: zjy@nies.org

assessment for pesticide used in rice paddy in China were proposed.

Keywords: pesticide; rice paddy; ground water; risk assessment

农药的多年广泛使用已经并正在使许多宝贵的地下水源被污染^[1]。在 1992—2001 年之间,美国调查发现,在全国范围内,超过 50% 的井水中检测出一种或多种农药残留;同时在约 1/3 提供水源的深层井水中检测出一种或多种农药残留^[2]。从 2001 年起,Tariq 等^[3]在巴基斯坦的 4 个区域内检测了 37 个开放井水中的农药残留,8 种常用农药有 6 种均在水样中检出。2007 年,Goncalves 等^[4]检测了葡萄牙农田区域地下水中 42 种农药,结果发现,9% 的地下水样中莠去津的浓度超过 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,6% 的地下水样中异丙甲草胺浓度超过 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2013 年,孔德洋等^[5]在我国江苏通州地区采集了 50 份地下水水样,对有机氯农药进行检测,其中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的检出率分别为 6% 和 44%。2014 年,张光贵等^[6]在湖南岳阳市地下水中,检测出有机氯农药残留,其中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的检出率分别为 72.2% 和 22.2%。

水稻生产不同于旱地作物,水稻生产过程中病虫害草害严重,农药使用品种多、频次高。水稻生产过程中还存在频繁的灌溉排水和较高的季节性降水。农药施用到稻田后,只有约 30% 左右能够被利用,一部分会通过淋溶进入到地下水体中,对地下水体造成较大的污染风险。李炳华等^[7]采集并分析太湖流域农业区 56 个浅层地下水水样,发现水样中 14 种待测的有机氯农药,狄氏剂的检出率为 39.29%,六氯苯的检出率为 33.93%, γ -六六六和异狄氏剂的检出率为 8.93%。显示出该农业区已受到有机氯农药的污染,且水稻田附近浅层地下水中总六六六和总滴滴涕检出率约是果园菜地浅层地下水相应组分的 2 倍。

风险评估在农药环境安全管理中发挥着重要作用^[8]。世界上部分发达国家和地区建立了农药在稻田使用对地下水风险评估技术,开发出了各具特色的水稻-地下水暴露评估模型,并建立了相应的暴露场景。相比而言,我国农药生态风险评估工作整体起步较晚,农药在稻田使用对地下水风险评估方面的研究更是不足。在此背景下,本文总结分析了欧盟和美国水稻-地下水生态风险评估程序、暴露评估模型及暴露场景的最新研究进展,旨在为我国建立农药在稻田使用对地下水的风险评估技术提供有益

借鉴,从而提高我国农药环境安全管理水平。

1 欧盟稻田地下水农药污染风险评估研究进展 (Progress of ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy in European Union)

欧盟水稻种植区主要集中于南欧的 5 个国家:意大利、西班牙、希腊、法国和葡萄牙。在水稻-地下水风险评估方面,欧盟在世界处于领先水平,专门成立了地中海水稻(Mediterranean Rice, Med-Rice)工作组,建立了稻田地下水农药污染风险评估程序、第 I 层次和第 II 层次暴露评估模型及第 I 层次标准暴露场景^[9]。

1.1 稻田地下水农药污染风险评估程序

在农药地下水风险评估程序的基础上欧盟专门建立了稻田地下水农药污染风险评估程序:首先利用第 I 层次简单公式计算农药在稻田使用在地下水中的预测环境浓度值(PEC_{pgw}),将 PEC_{pgw} 的计算结果与规定限值 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 进行比较,若计算结果小于 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,则认为对地下水无风险;否则进入第 II 层次,使用高层次的暴露评估模型 SWAGW 计算 PEC_{pgw} 值,若结果小于 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,则认为对地下水无风险;否则进入第 III 层次,针对目标区域更精细的模型计算 PEC_{pgw} 值,若结果小于 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,则认为对地下水无风险;否则进入第 IV 层次,进行实际监测研究^[10]。具体程序见图 1。

1.2 暴露评估模型

为进行农药在稻田使用对地下水的风险评估,需要暴露评估模型模拟的支持。水稻-地下水暴露评估需要模拟 2 个过程,一个是模拟农药在稻田系统中的行为,另一个是模拟农药在地下水中的行为。在实际的模型开发中,可以分别开发出模拟 2 个过程的模型,再将 2 个模型联用,也可以开发包含 2 个过程的整体模型。欧盟开发出了第 I 层次和第 II 层次的整体模型。

(1)第 I 层次模型

Med-Rice 专家组开发了一个简单的第 I 层次的模型,以计算农药在稻田使用后在地下水中的年均农药残留量(PEC_{pgw})^[10]。该模型为整体模型,可直接给出地下水中农药含量。

该模型假设农药使用后天在田土和田水中的分配

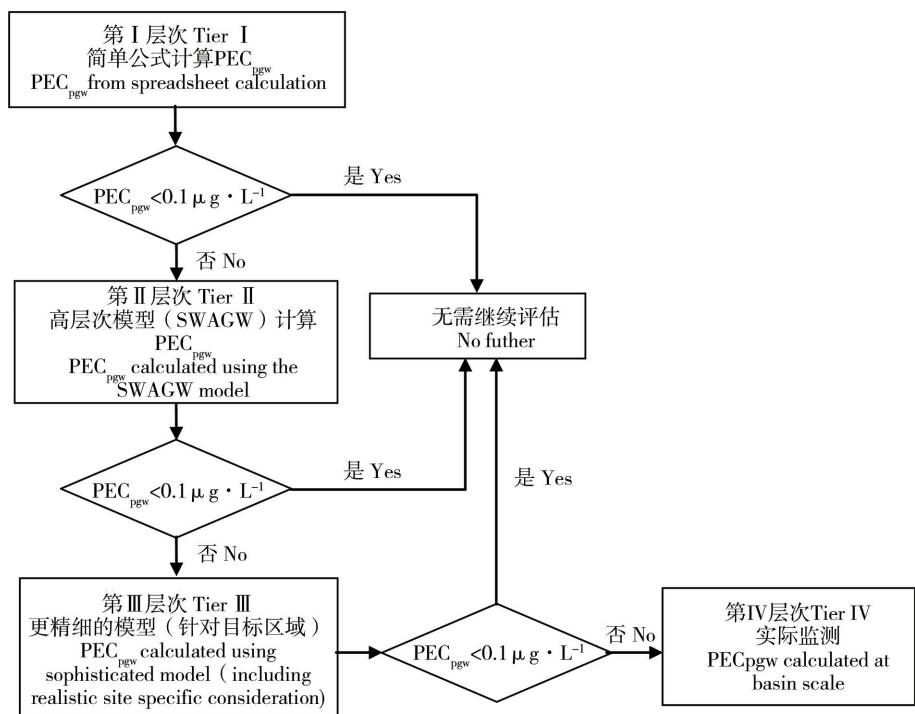


图 1 欧盟稻田地下水农药污染风险评估程序

注: PEC_{pgw} 为农药在稻田使用后在地下水中的预测环境浓度值。

Fig. 1 Procedure of ground water risk assessment for pesticide used in rice paddy in European Union

Note: PEC_{pgw} stands for predicted annual average concentrations in the saturated zone below the paddy.

是自发进行的,只有田水中溶解态的部分能够迁移和转化。在整个水稻种植期,农药淋溶发生在以下 2 个时间段:第一阶段是封闭期,此阶段稻田处于封闭状态,保持田水在一定的高度,淋溶前的农药质量为 $M_{leak,field}$;第二阶段是渍水期,此阶段灌溉及排水同时进行,稻田中保持渍水状态,淋溶前的农药质量为 $M_{leak,flood}$ 。两部分之和为田水中淋溶前的农药总质量 M_{leak} 。

$$M_{leak} = M_{leak,field} + M_{leak,flood}$$

式中: $M_{leak,field}$ 为农药在稻田使用后封闭期内淋溶前的农药质量($g \cdot ha^{-1}$),封闭期(t_{close})一般按照 5 d 计算。 $M_{leak,flood}$ 为农药在稻田使用后渍水期淋溶前的农药质量($g \cdot ha^{-1}$),渍水期(t_{flood})一般按照 90 d 计算。

该模型中地下水指地表以下超过 1 000 mm 的饱和带水,将土壤层以地表向下 300、600、1 000 mm 分层。每层不同的土壤特性使得对农药的吸附和降解作用不同,依次计算农药淋溶到 300 mm、600 mm 和 1 000 mm 土壤层后的农药残留质量,最终得到淋溶到地下水中的农药质量 $M_{leak(>1000)}$ 。计算进入到地下水中的年均农药残留量 PEC_{pgw} 。地下水中的年均农药残留量的计算公式为:

$$PEC_{pgw} = \frac{M_{leak}(>1000) \times 100}{365 \times leakage}$$

式中: PEC_{pgw} 为地下水中的年均农药残留量($\mu g \cdot L^{-1}$), $M_{leak(>1000)}$ 为淋溶到地下水中的农药总质量($g \cdot ha^{-1}$), $leakage$ 为渗透速率,是指渗透水流单位时间通过单位过水断面的水量,单位为 $mm \cdot d^{-1}$ 。

Med-Rice 第 I 层次模型是简单模型,输入变量少。各国在气象、土壤、农业生产方式等多方面均存在巨大差异,该简单计算公式输出值保守,适用于筛选水平的评估。

(2)第 II 层次模型

Med-Rice 专家组开发了用于第 II 层次模拟的地表水/地下水模型(Surface Water And Groundwater Model, SWAGW),可以计算稻田使用农药后稻田田水、田土和地下水系统中的农药含量(包括峰值浓度和平均浓度) [11]。

该模型假设与 Med-Rice 第 I 层次模型的假设相同,同样把整个水稻种植期分为封闭期和渍水期 2 个时间段。在封闭期内,稻田为封闭系统,封田主要考虑农药的淋溶、吸附和降解等过程;在渍水期内,稻田为开放系统,除了要考虑封闭期内的各因

素,还需考虑农药从稻田流入地表水体的部分。

该模型使用的方程可以计算不同时间下各土壤深度的预测环境浓度值 (Predicted Environmental Concentrations, PECs), 计算公式如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Disp \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - kc$$

式中: c 为农药含量($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $Disp$ 为农药在土壤水中的分散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$), x 为土壤深度(cm), v 为水流速率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$), k 为降解速率常数(d^{-1})。

SWAGW 模型需要的参数中, 标准场景中默认的参数值有: 农药在稻田使用后的封田时间(封闭期)为 5 d, 稻田渍水期为 120 d, 渗透速率为 1 $\text{cm} \cdot$

d^{-1} , 稻田中的田土深度默认为 1 m, 施药时农药漂移的百分比为 2.77%, 此外, 还需要其他的水力系数^[12]。Med-Rice 第 II 层次模型 SWAGW 没有考虑田水深度的变化、土壤水分蒸腾和土壤质地, 也未考虑气候因素。但与第 I 层次的简单计算公式相比, SWAGW 考虑的因素更多, 因此其模拟的农药在田水和田土之间的分配更接近现实^[13]。

1.3 暴露场景

场景需要选择更脆弱、更利于淋溶至地下水的条件参数^[14], 欧盟定义“现实中最坏条件”作为暴露场景区的选择原则。Med-Rice 工作组收集了南欧的 5 个成员国水稻种植主要参数(表 1), 构建了一

表 1 南欧 5 个成员国水稻种植主要参数值
Table 1 Overview of rice cropping strategies in five South-European member states

特性 Characteristics	法国 France	希腊 Greece	意大利 Italy	葡萄牙 Portugal	西班牙 Spain
土壤质地 Texture	粉砂壤土/ 粉砂质粘壤土 Silt loam/Silty clay loam	粉砂壤土 Silty loam	砂土/粘土 Clay/sandy	砂粘土/粘壤土/粘土 Sandy Clay/ Clay loam/Clay	粘土/壤土/砂壤土 Clay/Loam/ Sandy loam
土壤有机质含量/% Organic content/%	1.0~4.0	1.8~2.0	0.8~10	2.0~3.0	0.5~3.0
pH	8.0	7.4~8.0	4.0~8.0	5.0~7.0	5.5~8.5
粘粒/% Clay/%	10~40	20	2~30	30~40	10~40
排水系统 Drainage system	有 Yes	有 Yes	有 Yes	有 Yes	有 Yes
水位/cm Water level/cm	10	2~10	10	2~10	10
排水速率/($\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{ha}^{-1}$) Outflow field water velocity/($\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{ha}^{-1}$)	0.4	0.5	0.15	2~2.5	0.15
灌溉速率/($\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{ha}^{-1}$) Inflow field water velocity/($\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{ha}^{-1}$)	2~3	4	1.01	2~4	0.5~1.5
渍水期 Flooding conditions	5—8 月 May-Aug	5—9 月 May-Sept	5—9 月 May-Sept	4—9 月 April-Sept	4—8 月 Apri-Aug
封闭期/d Time of closure of field/d	7	2~5	5	2~5	2~5
排水渠道深度/m Depth of outflow channel/m	1.5~2.5	1.5~2.0	1.0~2.0	1.0~2.0	2.0
轮作 Crop rotation	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	在部分地区 In some areas
渗透速率/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) Leakage rate/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	4	5~10	6~11	1~10	1~10
排水利用 Usage of outflow water	否 No	否 No	否 No	偶尔用于灌溉 Occasionally for irrigation	否 No
灌溉系统 Aeroplane application	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes
气温/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	>14	>12	>14	>16~22	>14~20
好氧/厌氧条件 Aerobic/anaerobic conditions at interface	好氧 Aerobic	好氧 Aerobic	好氧 Aerobic	好氧 Aerobic	好氧 Aerobic

个适用于欧盟的水稻-地下水标准暴露场景,用于第 I 层次的评估,场景主要参数值如表 2。

Med-Rice 工作组将第 I 层次标准暴露场景应用于 Med-Rice 第 I 层次模型和 Med-Rice 第 II 层次模型 SWAGW 中,用以计算农药的暴露浓度。欧盟整体虽未建立更高层次的标准暴露场景,但南欧的 4 个成员国,包括希腊、意大利、西班牙和法国均建立了适用于高层次地下水风险评估的场景。希腊超过 77% 的水稻种植在阿克西奥斯流域(Axios river basin),因此只在该流域建立了 1 个场景^[15]。意大利建立了 3 个场景:第 1 个在曼图亚(Mantova),代表粘粒含量较高的地区;第 2 个在帕维亚(Pavia),代表砂粒含量较高的地区;第 3 个在克里内(Corine),代表意大利水稻种植区 256 个采样点土壤平均情况的地区^[16]。西班牙在其主要水稻种植区塞维利亚(Sevil-

表 2 欧盟水稻-地下水标准暴露场景的主要特征
Table 2 Characteristics of ground water standard exposure scenario for pesticide used in rice paddy in European Union (EU)

特性 Characteristics	参数值 Parameters
土壤质地 Texture	砂土 Sandy
土壤有机质含量/% Organic content/%	1.5(0.9)
pH	6.0
粘粒/% Clay/%	5.0
排水速率/(L·s·ha ⁻¹)	0.5
Outflow field water velocity/(L·s·ha ⁻¹)	
灌溉速率/(L·s·ha ⁻¹)	2.8
Inflow field water velocity/(L·s·ha ⁻¹)	
渍水期	5—8 月
Flooding conditions	May - August
封闭期/d Time of closure of field/d	5
排水渠道深度/m	1
Depth of outflow channel/m	
轮作	否
Crop rotation	No
渗透速率/(mm·d ⁻¹)	10
Leakage rate/(mm·d ⁻¹)	
蒸腾速率/(mm·d ⁻¹)	10
Evapotranspiration rate/(mm·d ⁻¹)	
排水利用	否
Usage of outflow water	No
气温/°C Temperature/°C	20
好氧/厌氧条件	好氧
Aerobic/anaerobic conditions at interface	Aerobic

la),埃斯特雷马杜拉(Extremadura),塔拉贡那埃布罗河三角洲(Taragona-Ebro Delta)和巴伦西亚(Valencia)建立了高层次水稻-地下水场景^[17]。法国在卡马格(Camargue)地区建立了 3 个场景,该地区靠近地中海,法国 75% 的水稻种植在该地区。

总之,欧盟建立了稻田地下水农药污染风险评估程序、暴露评估模型及相应的标准暴露场景,在较高层次暴露评估中能模拟农药实际暴露情况,稻田地下水农药污染风险评估体系较为完善。

2 美国稻田地下水农药污染风险评估研究进展
(Progress of ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy in U.S.)

美国水稻种植主要分布在阿肯色州、路易斯安那州、密西西比河三角洲、墨西哥湾和加利福利亚州。其中阿肯色州种植面积最广,达近 54 万公顷^[18],但总体来说,美国水稻种植面积并不大。

2.1 稻田地下水农药污染风险评估程序

美国是世界上农药生态风险评估发展较早的国家,形成了较完备的生态风险评估程序、风险评估技术及风险评估标准^[19]。但由于水稻生产在美国农业中占比重较小,因此没有专门形成针对农药在稻田使用后对地下水的风险评估程序,也没有建立水稻-地下水场景体系。但在评估模型方面,美国开发了针对稻田环境和地下水环境的一系列模型,主要模型如下。

2.2 暴露评估模型

美国开发了专门模拟农药在稻田行为的稻田模型,如稻田水质量模型(RICE Water Quality, RICEWQ),用来模拟农药在田水和作物根区的迁移和运转;还开发了模拟农药在地下水中行为的模型,如非饱和带流动转运模型(Vadose Zone Flow and Transport Model, VADOFT)、蓄水层稀释/水平对流模型(Aquifer Dilution/Advection Model, ADAM),模型简单,可预测农药在地下水的含量。

2.2.1 稻田模型

稻田模型用来模拟农药在稻田系统(田水以及作物根区)中的行为。目前美国开发的与稻田有关的模型包括 RICEWQ 和渍水条件下施用的农药模拟模型(Pesticides in Flooded Applications Model, PFAM)。PFAM 是模拟农药在稻田使用后进入地表水的过程,是 1 个整体模型,无法用于地下水评估。RICEWQ 可以和其他地下水模型联用模拟农药在稻田使用后进入地下水的过程。因此本文重点介绍

RICEWQ。

RICEWQ 是由美国 Waterborne 环境咨询公司开发的,用来评估农药在稻田系统中的行为、预测农药的径流流失量和模拟水稻种植的灌溉、溢流、排水等过程中水和农药量的平衡。RICEWQ 模型模拟过程示意图见图 2。

该模型假设在整个稻田系统中,农药在水稻植株、田水和沉积物中满足质量守恒定律。该模型可以计算在稻田系统中不同时间下的农药含量,计算公式如下:

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \sum M_{influx} - \sum M_{outflux} - \sum M_{react}$$

式中: ∂c 是随时间(∂t)而变化的农药含量($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\sum M_{influx}$ 和 $\sum M_{outflux}$ 为农药在一定体积 V 下的累计流入和流出量(μg), $\sum M_{react}$ 为农药在整个过程中的累计转换量(μg)。稻田模型 RICEWQ 可分别通过该公式计算农药在水稻植株、田水和沉积物中的含量。

RICEWQ 模型所需的输入参数包括 3 类:第 1 类是农药特性参数,包括农药施用次数、施用日期、施用量、淋洗系数、水/沉积物分配系数、在水中的降

解速率、在沉积物中的降解速率、混合速率、挥发速率等;第 2 类是沉积物特性参数,包括初始的悬浮物浓度、沉淀速率、重悬速率、沉积物的孔隙度和容重等;第 3 类是气候参数,包括每天的降雨量及每天的蒸发量。

该模型模拟输出水力和农药 2 个方面的文件:第一是水力方面的文件,包括水平衡方面的信息,即每天的降雨、挥发、渗滤、灌溉、溢流等;第二是农药方面的文件,包括农药物量平衡方面的信息,即农药的施用、溢流、在水中降解、挥发、沉淀、重悬、在水和沉积物之间扩散和在沉积物中降解等^[20]。

RICEWQ 模型输入参数较多,模型较复杂,用于高层次风险评估。该模型大部分参数来自野外调查,在缺乏测量数据的情况下,采用专家判断的方式得到参数值。

RICEWQ 的应用较为广泛,欧盟在进行水稻-地表水风险评估时也使用 RICEWQ 与其他模型联用模拟农药在稻田使用后在地表水中的行为。该模型也在其他国家,如中国、希腊和澳大利亚等国家得到应用^[21-23]。该模型可以单独评估农药在田水中的迁移和运转。在进行地下水风险评估工作时,需将

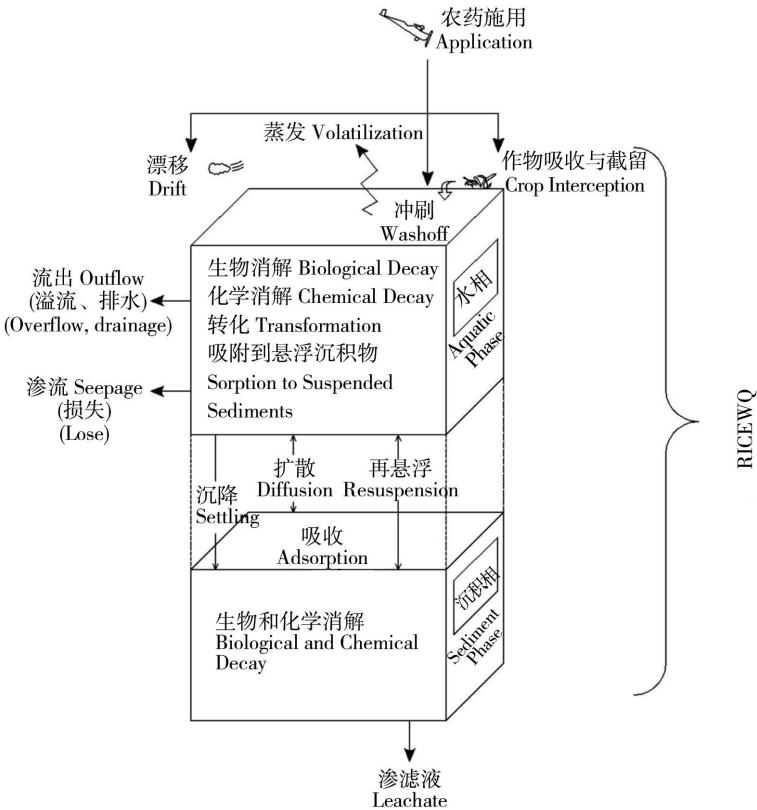


图 2 RICEWQ 模型模拟过程

Fig. 2 Schematic of RICEWQ processes

RICWQ 模型与地下水模型联用。

2.2.2 地下水模型

地下水广义上是指埋藏在地表以下各种形式的重力水,狭义上是指含水层中饱和带的水^[24]。农药风险评估主要研究的是狭义上的地下水。地下水模型是用来模拟农药从作物根区到地下水过程中的迁移与转化。地下水模型包括模拟土壤中非饱和带及饱和带中农药的迁移和转化的模型。美国目前开发的地下水模型有非饱和带流动转运模型(Vadose Zone Flow and Transport Model, VADOFT)、蓄水层稀释/水平对流模型(Aquifer Dilution/Advection Model, ADAM)以及农药根际区带-地下水暴露分析模型(Pesticide Root Zone Model-Ground Water, PRZM-GW)。但 PRZM-GW 目前应用在农药在旱地使用对地下水的风险评估研究中,不适用稻田场景下的模型模拟^[25]。因此本文着重介绍 VADOFT 和 ADAM 模型。

(1)VADOFT

VADOFT 用来预测农药在作物根区以下非饱和带的迁移和转化。该模型近似模拟非饱和带中水分的运动和溶质的转运,是 PRZM3 模型的第 2 组成部分,可以预测农药在作物根区以下的非饱和带的运动继而评估后继的地下水污染^[26]。转运过程包括水力分散、水平对流、线性平衡吸附和一级衰减。VADOFT 模型模拟过程示意图见图 3。

VADOFT 使用 Richard 方程来计算水分的一维单相运动和溶质在饱和和多孔介质的运转。其中,水分的一维单相运动中达西流速的计算方程为:

$$V = -Kk_{rw}(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1)$$

式中: V 为达西流速($L \cdot T^{-1}$), ψ 为负压水头(L), K 为饱和导水率($L \cdot T^{-1}$), k_{rw} 为相对渗透率, z 为垂直坐标值(L)。

溶质的转运中流速的计算方程为:

$$V_{sol} = \frac{V}{\theta R}$$

式中: V_{sol} 为溶质的流速($L \cdot T^{-1}$), V 为达西流速($L \cdot T^{-1}$), θ 为土壤含水量, R 为延迟系数。

VADOFT 输入参数包含 2 个方面的数据: 第一是土壤特性数据, 包括饱和渗透系数、单位储水量、有效孔隙度等; 第二是水力参数, 包括达西流速、延迟系数等。该模型可单独应用, 也可与 RICEWQ 联用, 模拟农药在作物根区以下的非饱和带的运动。

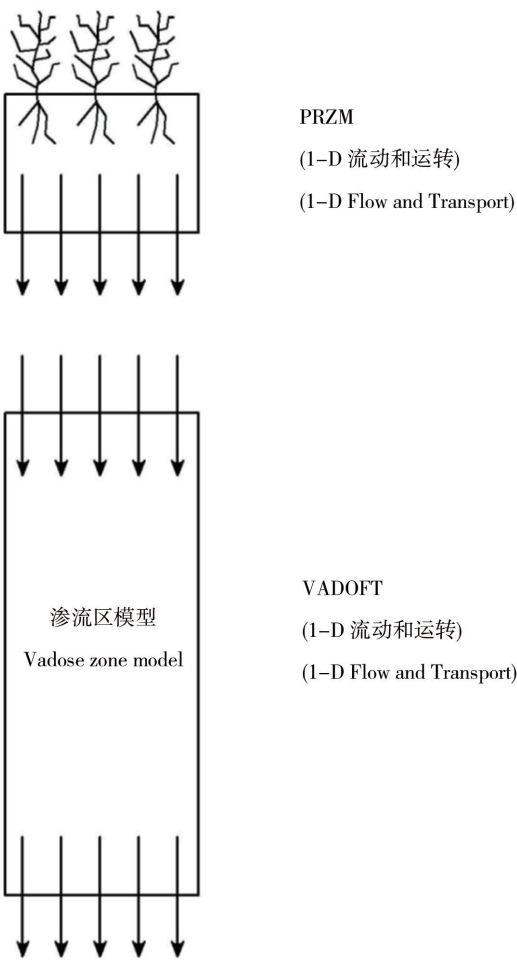


图 3 VADOFT 模型模拟过程

Fig. 3 Schematic of VADOFT processes

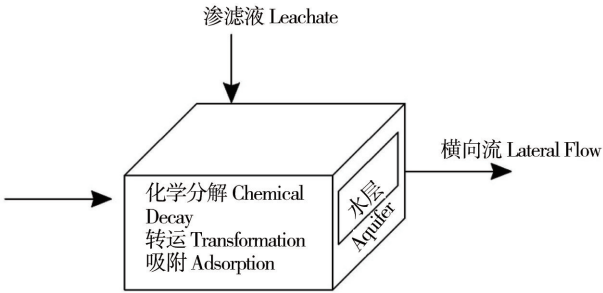


图 4 ADAM 模型模拟过程

Fig. 4 Schematic of ADAM processes

(2)ADAM

蓄水层可被视作一个持续混合的反应器,ADAM 可预测化学物质在其中的稀释、分配、持留及转运。ADAM 可模拟一个母体化合物以及 4 个以下的降解产物的转运行为。ADAM 模型模拟过程示意图 4。

ADAM 模型以化学物质平衡法则为基础,模拟农药等化学物质的挥发、降解以及在土壤孔隙水和

蓄水层介质之间的分配。其计算方程为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = M_{in} + M_{form} - M_{deg} - M_{volat} - M_{out}$$

式中: ∂M 为随时间(∂t)而变化的农药质量, M_{in} 为淋溶到含水层的农药质量, M_{form} 为化学转化过程中代谢量, M_{deg} 为降解的农药质量, M_{volat} 为挥发的农药质量, M_{out} 为农药流出量。

该模型以水平衡法则计算水的回流和横向流,其中的横向流用达西法则计算:

$$Q_{lat} = K_h \times I \times A$$

式中: Q_{lat} 为侧向水流量($m^3 \cdot d^{-1}$), K_h 为蓄水层渗透速率($m \cdot d^{-1}$), I 为水利梯度($m \cdot m^{-1}$), A 为控制体积下的横向断面面积(m^2)。

ADAM 模型的输入文件包括含水层特性参数、农药特性参数和水管理时间等数据^[27]。VADOFT 作为沟通稻田模型与饱和带模型的桥梁,模拟非饱和带中水分的运动和溶质的转移之后,可再使用 ADAM 预测地下蓄水层中农药的残留量。将 RICEWQ、VADOFT 和 ADAM 联用,可以用于预测农药在稻田使用后在地下水蓄水层中农药的残留量。

3 我国稻田地下水农药污染风险评估研究进展 (Progress of ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy in China)

我国是世界上的稻谷生产大国,水稻种植面积约占世界水稻种植总面积的 25%。水稻也是我国种植面积最大的粮食作物,种植面积约占粮食作物面积的 30%。我国亦是农药生产与使用大国,农药的生产量自 2007 年以来,超越了美国的农药生产量,位居世界第一,农药使用量近年来一直位居世界首位^[28]。

水稻一般生长在多雨、高温的季节,病虫害害严重,相对于其他作物,水稻上使用的农药种类和数量均较多。目前,国内水稻消耗农药量占总消耗量的 60%左右。据统计,截至 2010 年 7 月,在我国水稻上登记的农药有效成分有 214 种,其中:杀菌剂有 83 种;杀虫剂有 58 种;除草剂 49 种;植物生长调节剂 19 种;其他,如杀螺剂等 5 种^[29]。2015 年《江西省主要农作物病虫害防治安全科学用药指南》中,在水稻上推荐使用的农药种类为 53 种,其中水稻杀虫剂 25 种,水稻杀菌剂 28 种^[30]。在水稻生长周期中,农药使用次数很多,通常都在 4~5 次,多的可达 7~8 次。因此,开展我国稻田用药对地下水风险评估非常重要。我国已相继开展了一些重要项目的研究,也取得了一定的成果。总结如下:

3.1 地下水农药污染风险评估程序

我国风险评估起步较晚,地下水风险评估方面的工作较少,借鉴欧盟地下水农药污染风险评估程序,建立了我国地下水农药污染风险评估程序。但目前还未建立针对农药在稻田使用对地下水的风险评估程序。

我国将农药对地下水的污染评估分为 4 个层次:第 I 层次评估使用简单模型进行预测,如果模型预测浓度大于农药在地下水中的限值标准,需进入第 II 层次评估;第 II 层次评估选择高层次的暴露评估模型作为评估模型,如果模型预测浓度仍大于限值标准,则首先选择风险减少措施,确定是否能将风险降低至可接受水平,如不能,需进入第 III 层次评估;第 III 层次评估采用淋溶试验,将淋溶浓度与农药在地下水中的限值进行比较,如果模拟淋溶浓度仍大于限值标准,则选择风险减少措施,确定是否能将风险降低至可接受水平,如不能,需进入第 IV 层次评估;第 IV 层次评估采用实际监测研究,将实际监测数据与农药在地下水中的限值进行比较,对风险作出表征。

3.2 稻田地下水农药污染风险评估模拟平台构建

近年来,农药登记及环境安全管理部门已逐渐认识到风险评估的重要性,相继开展了一些重要项目的研究。如农业部农药检定所与荷兰瓦赫宁根大学阿尔特拉研究所(Alterra)合作开展了“中荷合作农药环境风险评估项目”,开发了 TOP-RICE 暴露平台,构建了 2 个水稻-地下水暴露场景^[31];环境保护部南京环境科学研究所与美国 Waterborne 环境咨询公司合作开展了“农药生态风险评估及风险管理技术研究项目”,构建了农药环境风险评估暴露模拟平台(Pesticide Risk Assessment Exposure Simulation Shell, PRAESS)^[32]。PRAESS 包含 PRZM-EXAMS、RICEWQ-EXAMS、PRZM-ADAM 3 套模型系统,可以分别模拟旱地作物-地表水、水稻-地表水和旱地作物-地下水 3 类场景体系^[33],目前,该平台正在增补水稻-地下水模型的部分。

3.3 暴露场景

针对农药在稻田使用对地下水的风险评估,我国尚未公开发布的完整的水稻-地下水暴露场景体系。农业部农药检定所构建了 2 个适用于中国南方的地下水暴露场景。环保部南京环境科学研究所构建的 PRAESS 中,共整合了 6 个暴露场景,包含旱地作物-地表水、水稻-地表水和旱地作物-地下水 3 类

场景体系,还缺少水稻-地下水场景体系。我国幅员辽阔,各地区水稻种植、气象、土壤和农业生产情况各不相同,为进行更为精确的高层次暴露评估,需对全国的水稻种植区域进行一个全面的、详细的划分。总之,建立完整的我国水稻-地下水暴露场景体系成为当务之急。

4 加强我国稻田地下水农药污染风险评估工作的建议 (Suggestion of enhancing ground water risk assessment for pesticides used in rice paddy in China)

欧盟的稻田地下水农药污染风险评估程序和方法较为成熟,美国开发了多个稻田模型和地下水模型,而我国水稻地下水农药污染风险评价研究则刚刚起步,还需加强以下几个方面的工作:

(1)建立稻田地下水农药污染风险评估程序

我国亟需根据农药环境安全管理的实际需求和现有土地利用情况,并借鉴欧盟较为成熟的地下水风险评估程序与方法,开展我国农药在稻田使用对地下水风险评估程序研究,建立有针对性的农药在稻田使用对地下水污染风险评估程序。

(2)筛选与开发适用的水稻-地下水暴露评估模型

近年来国内学者进行的一些地下水风险评估工作是以国外开发的地下水模型为基础的。今后在进行水稻-地下水风险评估研究时,应筛选与开发适合我国实际情况的稻田暴露评估模型与地下水暴露评估模型。

(3)构建我国水稻-地下水暴露场景体系

中国气候多样、土壤类型复杂、地形多变,不同地区水稻种植制度差异较大。因此,在借鉴欧盟水稻-地下水暴露场景体系构建方法的同时,需根据各地区不同的种植制度、农业结构、气候和土壤特性等因素,建立我国水稻-地下水暴露场景体系构建方法,构建我国水稻-地下水暴露场景体系,以满足不同地区风险评估工作的需求。

(4)进一步完善农药风险评估暴露模拟平台

近年来,我国开展的相关研究项目在农药暴露评估方面取得了突破性的进展,开发构建了一系列暴露评估工具。但我国农药风险评估暴露模拟平台还不够完善,应当加大农药在稻田使用对地下水的风险评估方面的工作力度,为完善我国农药风险评估技术和方法,推动风险评估技术的早日应用奠定基础。

通讯作者简介:周军英(1966-),女,硕士,研究员,主要从事生态毒理学、环境基准标准及风险评估研究。

参考文献 (References):

- [1] 刘世友. 农药污染现状与环境保护措施[J]. 河北化工, 2010(1): 74-75
- [2] United States Geological Survey. Pesticides in the Nation's Streams and Ground Water, 1992-2001-A Summary [DB/OL]. (2006-01-01) [2015-6-22]. <http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3028/>
- [3] Tariq M I, Afzal S, Hussain I. Pesticides in shallow groundwater of Bahawalnagar, Muzafargarh, D.G. Khan and Rajan Pur districts of Punjab, Pakistan [J]. Environment International, 2004, 30(4): 471-479
- [4] Goncalves C M, Silva J C G E D, Alpendurada M F. Evaluation of the pesticide contamination of groundwater sampled over two years from a vulnerable zone in Portugal [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2007, 55(15): 6227-6235
- [5] 孔德洋, 葛峰, 许静, 等. 地下水有机氯农药污染状况调查分析[C]. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷), 中国环境科学学会, 2013: 4
- [6] 张光贵, 王小毛, 李照全. 岳阳市地下水有机氯农药浓度水平与污染特征分析[J]. 水资源保护, 2014(2): 52-56
Zhang G G, Wang X M, Li Z Q. Analysis of organochlorine pesticide concentrations and pollution characteristics in groundwater of Yueyang City [J]. Water Resources Protection, 2014(2): 52-56 (in Chinese)
- [7] 李炳华, 任仲宇, 陈鸿汉, 等. 太湖流域某农业区浅层地下水有机氯农药残留特征初探[J]. 农业环境科学学报, 2007, 5(5): 1714-1718
Li B H, Ren Z Y, Chen H H, et al. Residues of organochlorine pesticides in shallow groundwater of agricultural region in Taihu Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 5(5): 1714-1718 (in Chinese)
- [8] 杨丽敏. 我国农药登记制度中的环境风险评价之探究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 4-9
Yang L M. Research on environment risk assessment system in the pesticide registration system [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012: 4-9 (in Chinese)
- [9] Karpouzas D G, Miao Z. Chapter 7 - Higher Tier Exposure Assessments in Rice Paddy Areas: A European Perspective [M]// Capri E, Karpouzas D G. ed. Pesticide Risk Assessment in Rice Paddies. Elsevier Ltd., 2007: 125 - 165
- [10] Med-Rice. Guidance document for environmental risk assessments of active substances used on rice in the EU for annex I inclusion [EB/OL]. [2015-6-28]. http://ec.europa.eu/food/plant/protection/resources/med_rice_2003_en.pdf
- [11] Med-Rice Modeling Subgroup. Addendum to guidance document for environmental risk assessments of active substances used on rice in the EU for Annex I inclusion

- [R]. 2006
- [12] Cervelli S, Jackson R. Pesticide exposure assessment in rice paddies: The lower-tier analysis [M]// Capri E, Karpouzas D G. Eds. Pesticide Risk Assessment in Rice Paddies: Theory and Practice. The Netherlands: Elsevier BV, 2008: 91-124
- [13] Karpouzas D G, Cervelli S, Watanabe H, et al. Pesticide exposure assessment in rice paddies in Europe: A comparative study of existing mathematical models [J]. Pest Management Science, 2006, 62(7): 624-636
- [14] Scientific Committee on Plants, Opinion of the Scientific Committee on Plants on the draft Guidance Document on Environmental Risk Assessments of Active Substances Used on Rice in the EU for Annex I Inclusion SCP/GUIDE-RICE/002-Final. [EB/OL]. [2015-6-28]. http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scp/out144_ppp_en.pdf
- [15] Karpouzas D G, Papadopoulou-Mourkidou E, Capri E. Basin-scale risk assessment in rice paddies: An example based on the Axios River Basin in Greece [J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(1): 273-282
- [16] Redolfi E, Triacchini G, Auteri D, et al. Study for the definition of Italian scenarios of environmental exposure to pesticides applied in paddy fields [C]//13th Symposium Pesticide Chemistry, Piacenza, Italy, 3-6 September 2007. La Goliardica Pavese srl, 2007: 932-942
- [17] Lopez-Pancorbo A, Bech J, Fernandez-Sanchez R, et al. Assessment of uranium levels in rice and soils from the Ebro Delta (NE Spain) [J]. Proceeding of the Eurosoil Congress, 2011
- [18] Ritter A M, Williams W M. Chapter 9 - Higher Tier Exposure Assessments in Rice Paddy Areas: An American Perspective [M]// Capri E, Karpouzas D G. ed. Pesticide Risk Assessment in Rice Paddies. Elsevier Ltd., 2007: 215 - 236
- [19] 文伯健, 李文娟, 程敏. 美国环保署农药地下水风险评估模型[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(6): 68-73
- Wen B J, Li W J, Cheng M. The groundwater risk assessment models for pesticide for USEPA [J]. Journal of Agricultural Resources & Environment, 2013, 30(6): 68-73 (in Chinese)
- [20] Williams W M, Ritter A M, Zdinak C E, et al. RICEWQ: Pesticide runoff model for rice crops [J]. Users Manual and Program Documentation. Leesburg: Waterborne Environmental, Inc., 1999, 1(1): 11-19
- [21] 程燕, 周军英, 单正军. 基于 RICEWQEXAMS 模型的东苕河流域稻田用药的水生生态及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 579-586
- Cheng Y, Zhou J Y, Shan Z J. Aquatic eco-risk and health risk assessment of application of pesticide in rice paddy in Dongtiaoxi watershed based on modified RICEWQ-EXAMS Model [J]. Journal of Ecology & Rural Environment, 2012, 28(5): 579-586 (in Chinese)
- [22] Karpouzas D G, Capri E. Risk analysis of pesticides applied to rice paddies using RICEWQ 1.6.2v and RIVWQ 2.02 [J]. Paddy & Water Environment, 2006, 4(1): 29-38
- [23] Christen E W, Chung S O, Quayle W. Simulating the fate of molinate in rice paddies using the RICEWQ model [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3):38-46
- [24] 肖长来, 梁秀娟, 王彪. 水文地质学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001:1-2
- [25] United States Environmental Protection Agency. PRZM-GW Description[EB/OL]. [2015-06-28]. <http://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/models-pesticide-risk-assessment#przmgw>
- [26] United States Environmental Protection Agency. PRZM-3, A Model for Predicting Pesticide and Nitrogen Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: Users Manual for Release 3.12.2 [R]. Athens, GA, USA: U.S. Environmental Protection Agency, 2005
- [27] Waterborne Environmental, Inc. ADAM: Aquifer Dilution/Advection Model User's Manual and Program Documentation, Version 1.12 [R]. Leesburg, VA, USA: Waterborne Environmental, Inc., 2010
- [28] 中国国家统计局. 国家统计数据库[DB/OL]. [2015-07-04]. <http://219.235.129.58/welcome.do>
- [29] 中国农药信息网. 通过作物/防治对象查询产品[DB/OL]. [2015-07-04]. <http://www.Chinapesticide.gov.cn/service/asp/B4.Asp>
- [30] 江西省农业厅办公室. 关于印发《江西省主要农作物病虫害防治安全科学用药指南》的通知[S]. 南昌: 江西省农业厅办公室, 2015: 39
- [31] 中国农业部农药检定所. TOP-RICE 模型操作手册[M]. 北京: 中国农业部农药检定所, 2014: 2-6
- [32] 周军英, 单正军, 石利利. 农药生态风险评价与风险管理技术[M]. 1 版. 北京: 北京中科印刷有限公司, 2012: 100-128
- [33] 赵亮, 周军英, 程燕, 等. 国内外农药生态风险评价暴露模拟外壳述评[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 10-18
- Zhao L, Zhou J Y, Cheng Y, et al. Review of exposure simulation shells for pesticide ecological risk assessment [J]. Journal of Ecology & Rural Environment, 2012, 28(1): 10-18 (in Chinese) ◆