

我国农药地下水环境风险评估场景体系的建立

林 绿^{1,2}, 覃志豪^{2,3}, 李文娟³

(1.香港中文大学地理与资源管理系, 香港; 2.南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:根据国际通用的标准场景和环境脆弱性概念, 利用 GIS 技术, 以我国气象、土壤、农业生产等数据为基础, 构建农药环境风险评估过程“现实中最糟糕的情况”。针对旱地作物和地下水这一环境系统, 将我国划分为 6 个农药地下水环境风险评估场景区, 并在此基础上构建了 11 个标准场景点, 从而形成针对旱地作物的我国农药地下水环境风险评估场景体系。利用欧盟农药环境暴露模型 PEARL 测试该场景体系, 运行结果显示该场景体系科学可行。该场景体系的建立既为运用定量模型进行我国农药环境风险评估奠定了重要基础, 也为我国农药环境风险管理、农药登记管理工作提供了技术支持和科学依据。

关键词:农药环境风险评估; 场景区; 标准场景; GIS 技术

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)11-2194-10 doi:10.11654/jaes.2014.11.018

Development of a GIS-based Scenario Analysis System for Pesticide Groundwater Risk Assessment in China

LIN Lu^{1,2}, QIN Zhi-hao^{2,3}, LI Wen-juan³

(1.Department of Geography and Resource Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China; 2.International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Pesticide environmental risk assessment is a key part of pesticide registration process. Here we applied the concept of standard scenario system developed by the European Union (EU) to groundwater risk assessment of pesticides used in dryland crops. Precipitation, temperature, soil organic matter and pesticide application ways were all considered as the main factors affecting environmental behaviors and soil concentrations of pesticides. Based on meteorological, soil and agricultural production data, a GIS approach was adopted to establish the standard scenario systems. They consisted of 6 scenario zones and 11 standard scenarios. The PEARL model developed by the EU for simulation of pesticide environmental risk was employed to test the established scenarios. The simulation showed pesticide Aldicarb had high environmental risk but Atrazine and Oxadixyl was relatively safe. These results show that the established scenarios would be useful for enhancing the efficiency of pesticide registration.

Keywords: pesticide environmental risk; scenario zone; standard scenario; GIS

农药的环境风险评估是农药登记管理程序中十分重要的一环, 它能够保证从源头上控制农药对环境的污染、对生物的危害以及对人类健康的威胁, 对提升我国农药管理水平具有重要意义。标准场景

(Standard scenario) 是美国、欧盟等国家或地区进行农药环境风险评估 (Pesticide Environmental Risk Assessment) 中所使用的重要概念^[1], 它用于多个农药环境暴露模型, 如欧盟的农药环境风险评估模型 PEARL (Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales)、美国的农药环境风险评估模型 PRZM-EXAMS (Pesticide Root Zone Model-Exposure Analysis Modelling System), 表现了在某种气候条件和农业生产条件下, 最有利于农药在土壤和水体中积累残留、最不利于生态环境的条件, 即代表了“现实中最糟糕

收稿日期: 2014-04-16

基金项目: 国家科技支撑计划专题, 农药环境风险评价的环境暴露初级模型及所需环境背景数据库研究 (2006BAK02A0405)

作者简介: 林 绿 (1984—), 女, 福建漳州人, 博士研究生, 主要从事环境风险评估和环境影响评估研究。

E-mail: nju0596@gmail.com

的情况”(The realistic worst case)^[2],包括气象、土壤、作物特征和农业生产技艺数据。欧盟农药工作组(Forum for the Co-ordination of pesticide fate models and their Use, FOCUS)在欧盟地区构建了10个地表水标准场景和9个地下水标准场景^[2-3],美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)开发的PRZM-EXAMS模型包含了70个标准作物场景和54个非标准作物场景^[4]。标准场景的核心思想是:如果某农药在标准场景条件即“现实中最糟糕的情况”下施用后在地表水和地下水的残留浓度仍处于法律规定的安全标准之内,那么该农药在其他条件下施用也应该是安全的。标准场景的建立是农药环境风险评估暴露分析的核心部分,标准场景的构建需要全面考虑各类影响因素中最有利于农药残留积累的条件,包括气象、地形地貌、土壤、作物特征和农业生产等条件,是使用农药暴露模型获得环境中农药残留浓度的关键背景数据。标准场景有利于减少用户自己设定农药风险评估地点所产生的主观干扰因素,同时也能覆盖一定范围内的主要农业生产环境,体现待评估农药在各种农业生产环境中的环境行为,从而提高评估效率。

我国的农药环境风险评估工作尚处于起步阶段,构建适合我国自然条件和农业条件的场景体系是我国农药环境风险评估工作中一项重要而亟待解决的任务。国内目前仅有一个由环境保护部南京环境科学研究所于2010年发布的农药风险评估暴露模拟外壳(Pesticide Risk Assessment Exposure Simulation Shell, PRAESS),构建了4个地表水标准场景和2个地下水标准场景^[5],对我国农药环境风险评估定量模型中标准场景的构建进行了初步研究^[4]。

建立场景所需的大部分数据是空间数据,涉及到多种对空间数据的操作。地理信息系统(Geographic Information System, GIS)是处理海量空间数据的有效工具^[6],在农药对环境的污染这一领域也有较广泛的应用,尤其是区域尺度的农药环境污染研究。Blenkinsop等^[6]采用与农药环境行为相关的8个气候变量,提取其空间分布趋势并进行聚类分析,将欧盟地区划分成16个气候特征相近的区域,进而利用数学模型模拟农药在不同特征气候区的潜在环境行为。Serenella等^[7]将环境背景数据库、农药环境行为数学模型和农药环境风险指标整合到GIS系统中,绘制出流域尺度的农药浓度分布图、风险大小图,并对指定地点进行农药的水生生物风险评估。蔡道基等^[8]选取

土壤质地、土壤有机质含量、土壤酸碱度、夏季降水量、地下水埋深作为农药涕灭威对地下水污染的敏感因子,分别赋予权重,计算求出江苏省涕灭威农药地下水污染敏感度并绘制江苏省涕灭威农药地下水污染敏感区划图,然后采用大田试验和美国的PRZM模型进行验证,试验结果和模型计算结果均与敏感区划图相符。我国国土幅员辽阔,影响农药环境风险评估的气象、地形地貌、土壤、作物、农业生产等因素的地域性差异大,因此,我国农药环境风险评估定量模型的开发极具挑战性,而GIS技术为标准场景的构建提供了基础数据和有力的技术支持。

由于农药在旱地作物和水稻上施用对地表水和地下水风险的产生机制不同,各自的影响因素也不尽相同,本文着眼于讨论农药对旱地作物和地下水这一环境系统的环境风险。本文拟借鉴国际先进研究经验,运用GIS技术分析我国农田分布、气象、土壤及其他空间数据,通过研究在我国进行农药地下水环境风险评估时场景体系的建立,并利用PEARL模型对所构建的场景进行测试,为我国农药环境风险评估工作提供科学依据。

1 数据搜集与处理

本研究需要全国多年平均降水量、多年平均气温、土壤有机质含量分布、全国土地利用类型分布、农作物分布、作物种植制度等数据及资料。

1.1 气象数据

从“中国气象科学数据共享服务网”下载得到遍布全国的气象站点1970—2001年的气象数据^[9],包括了每日降水量和每日平均气温,根据这些数据计算得到每个站点的多年平均气温和多年平均降水量。利用ArcGIS[®] Desktop 9.2对这些点状数据进行插值,得到全国范围的多年平均气温和多年平均降水量分布图。

1.2 土壤数据

土壤有机质含量分布图来自中国农科院农业资源与农业区划研究所数字土壤实验室^[10],为面状矢量数据,每个多边形的主要属性信息包括了多边形的面积以及该多边形所含土壤有机质百分含量的范围。

1.3 土地利用类型数据

来自中国科学院资源环境科学数据中心发布的全国1 km分辨率土地利用类型数据,为栅格数据,其土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、城乡工矿、居民用地和未利用土地。

1.4 其他资料

进行分析所需的农作物分布、气候及农业区划、作物种植制度等资料来自于互联网及相关学术期刊、专著与权威图集^[11-15]。

2 研究方法

2.1 两个概念

在阐述场景体系建立的方法之前,有必要对本研究将涉及的两个概念作出解释。

(1)百分位(Percentile):百分位是统计学术语,是一个位置指标,用 P_p 表示,描述一组升序排列的数据中第 p 百分位置上的数值。计算百分位的方法各种各样,在本研究中,我们使用的是 Microsoft Excel[®] 中的 Percentile 函数,其语法如下:

$$P_p = \text{Percentile}(\text{Array}, p)$$

式中: Array 为求算百分位的数组或数据区域; p 为百分比值,在 0 到 1 之间; P_p 为返回的第 p 百分位上的数值。

(2)地下水的农药淋溶脆弱性:脆弱性(Vulnerability)这一概念起源于自然灾害研究^[16],并广泛应用于环境科学、生态学、气候变化、土地利用、可持续发展科学等多领域研究^[16-18]。在本研究中,脆弱性是一个相对的概念,是待评价系统暴露于不利影响或遭受损害的可能性。农药在施用后对环境系统的负面影响总是存在的,为保证农药的施用在接受的程度上是安全的,需要制定安全标准(如国家标准或行业标准等)。如果某种农药对环境的危害位于规定的安全标准之内,则认为农药在该环境系统中的施用是安全的;如果超过了这一安全标准,则认为环境处于脆弱状态。

在本研究中,脆弱性概念与百分位概念结合,一起表示受到农药施用污染影响的、按规定要保护的环境系统,从而保证了既能找到脆弱的农业生产环境,而百分位概念的使用又避免了将极端情况纳入考虑范围。“现实中最糟糕的情况”并不是一个极端恶劣的情况,而是由百分位确定的相对恶劣的情况。

欧盟国家通过多年研究论证,采用地下水对农药淋溶脆弱性达至第 80 百分位的土壤有机质含量和多年平均降水量作为场景点的构建标准,从而实现地下水场景点的脆弱性达到第 90 百分位的^[2-3]。任何一种农药如果在这些场景点的气象土壤条件下是安全的,那么该农药在 90% 的欧盟其他区域也是安全的。

我国目前尚未制定针对地下水的农药浓度限量

标准。由于地下水是我国重要的饮用水源,应充分保证农药的施用对多数地下水不构成威胁,相关管理部门认为必须保证农药施用在我国 99% 的地下水环境系统中是安全的。针对旱作农田与地下水这一环境系统,其脆弱性主要由土壤有机质含量和多年平均降水量决定,因此定义农药的淋溶脆弱性达第 90 百分位的土壤有机质含量与农药的淋溶脆弱性达第 90 百分位的多年平均降水量共同体现了脆弱性达第 99 百分位的环境系统。倘若农药对 99% 的环境系统的风险是在安全范围之内的,便认为该农药可以在实际环境中施用。

2.2 场景区的划分

我国地域广阔,气候、土壤等自然条件复杂,农业耕作制度和生产条件差异明显。因此,首先把全国分成若干个在一定程度上具有比较近似的气候和农业生产特征的场景区,然后在每个场景区中构建标准场景是科学和切合实际的方法。场景区一来有利于在构建标准场景的前期减少同时考虑降水、气温、土壤、作物等多个影响因素产生的复杂性,二来将全国分为几个区域避免了在构建标准场景时在全国主要农业生产条件的遗漏。

降水量、温度、土壤理化性质、作物特征是影响农药环境行为最关键的几个因素,它们共同决定了农药在环境中的转化、淋溶、挥发等环境行为,进而决定了农药对环境的污染程度。大量研究表明,农药的用量、水溶性、施药地区的降水量或灌溉水量、施药地区土壤质地、地下水水位对农药能否造成地下水污染的影响最大^[19-21]。在本研究中,首先选择降水量和温度作为划分场景区的主要依据,主要因为:一是农作物的分布与降水量、积温等气候条件密切相关;二是土壤种类及土壤有机质含量的不同分布也与各地降水、温度存在联系。

场景区划分的主要步骤是:将全国多年平均气温和多年平均降水量分布进行叠加,形成各级多年平均降水量和多年平均气温的组合,然后结合农作物分布特征、地形特征调整组合,最终得到能代表全国主要气候特征和农业生产条件的场景区。

首先按 400 mm 和 1000 mm 等值线将全国多年平均降水量分布图分成三区,之所以选择这两个等值线是因为多年平均降水量 400 mm 和 1000 mm 是我国气候带划分的依据之一,并且也是我国不同的常年灌溉地带、不稳定灌溉地带和水稻灌溉地带划分的依据^[22]。按 8、12、16、20 ℃等温线将全国多年平均气温分布图

分成 5 个区域,这些等温线与上述降水等值线叠加后产生的区域与中国农业自然区域大致吻合^[11-12,14-15]。不同自然区域和水利条件对农作物分布和农田耕作方式都有极大影响,因而也是我们在选择标准场景时要重点考虑的。

根据场景区数量不超过 10 个、场景区不宜太过零碎以及场景区应代表全国主要农业生产条件的原则^[2],叠加后的结果经过合并、调整,最终得到的结果

如图 1 所示,各个场景区的气候、地理、农业生产特征如表 1 所示。

2.3 场景点的选择

场景区表现了我 国气候特征和农业生产的主要空间分布规律,而土壤特性则是从每一个气候特征和农业生产相对一致的场景区中选择场景点的主要依据。土壤特性包括土壤机械组成、pH 值、容重、有机质含量等,其中土壤有机质是吸附农药的主要载体,土

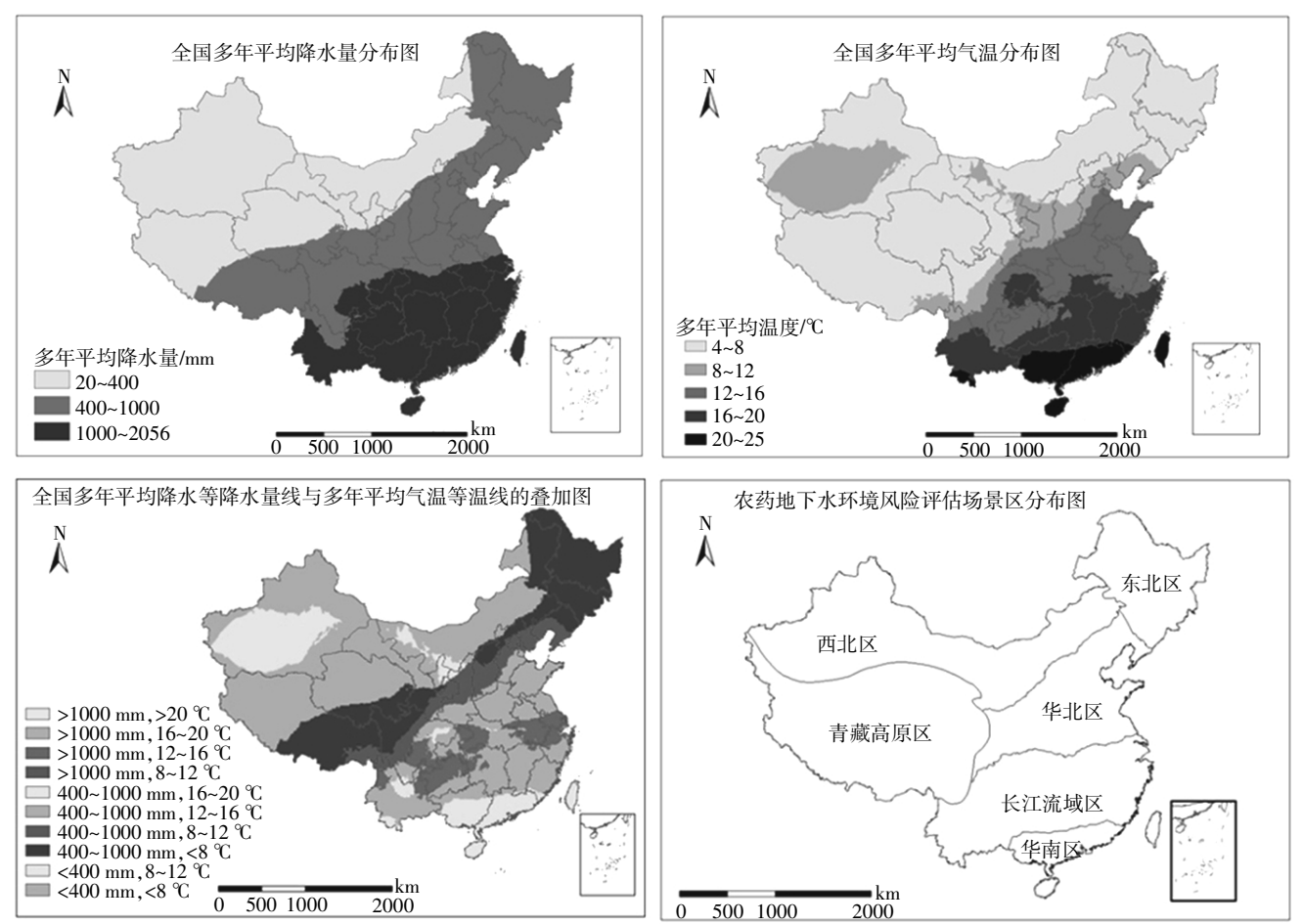


图 1 场景区划分结果
Figure 1 Results of established scenario zones

表 1 各个场景区主要特征
Table 1 Properties of scenario zones established

场景区 Scenario zone	多年平均降水量/mm Annual average precipitation	多年平均气温/℃ Annual average temperature	主要地貌 Geomorphhic feature	作物种植制度 Cropping system
东北区	400~800	<6	平原、山地	一年一熟
西北区	<400	<8	平原、山地、高原、河谷	一年一熟
华北区	400~1000	6~12	平原、黄土高原	两年三熟
长江流域区	>1000	12~20	平原、山地、河谷	一年两熟、一年三熟
华南区	>1000	>20	丘陵、山间平原、河谷	一年三熟、一年四熟
青藏高原区	<600	<8	高原、山地、河谷	一年一熟

壤中有机质含量越高,吸附性能也越强,使可淋溶的农药量减小,因而淋溶深度也减小,对地下水的威胁也越小,也就是说,使农药淋溶脆弱性越大的土壤种类其有机质含量越小。

本研究根据各个场景区中土壤有机质含量的分布,选择出使农药淋溶脆弱性达到第90百分位的土壤有机质含量所处的位置,结合气象资料选择出各个场景区的场景点所处位置。

下面以华北区为例阐述场景点的构建过程。

场景区中使农药淋溶脆弱性达到第90百分位的土壤有机质含量,与场景区中旱地的面积和土壤有机质含量的分布有关。首先利用 ArcGIS® Desktop 9.2,提取土地利用图中的旱地,并与土壤有机质含量分布图^[10]叠加(图2),新图层的属性包括了每个多边形的面积、土壤有机质含量级别、平均土壤有机质含量。

将图2中所有多边形按平均土壤有机质含量升序排列,计算土壤有机质含量各个级别的累积面积比例。由于土壤有机质含量与地下水农药淋溶脆弱性是负相关关系,累积面积比例的第10百分位实际就是脆弱性达第90百分位的土壤有机质含量,选取累积面积比例在第10百分位处的土壤有机质含量的分布区域作为该区域“最脆弱”的土壤,即标准场景点的候选区域。

场景点既代表现实中最糟糕的情况,也是建立在真实数据基础之上的,因此场景点必须选在能收集到各种详细气象和作物生产数据的地点。鉴于此,农药

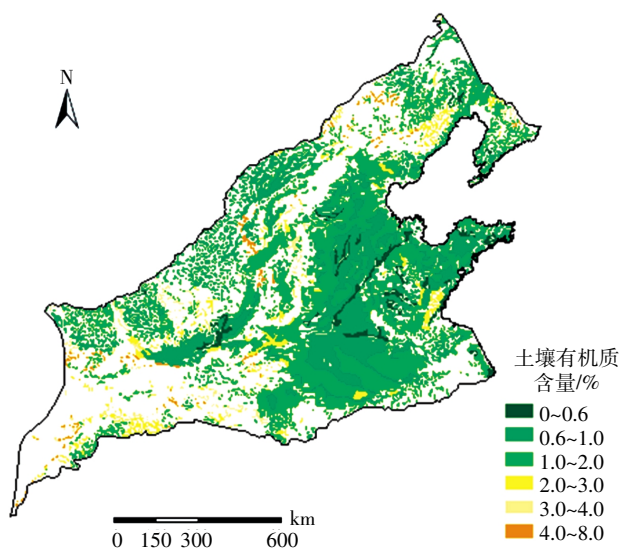


图2 华北区旱地的土壤有机质含量分布

Figure 2 Distribution of soil organic matter in dryland in North China scenario zone

淋溶脆弱性达第90百分位的旱地、年降水量接近该地区平均水平并且靠近气象台站的地点是场景点的最佳区位。根据这一原则,3个场景点在华北区构建完成,如图3所示。

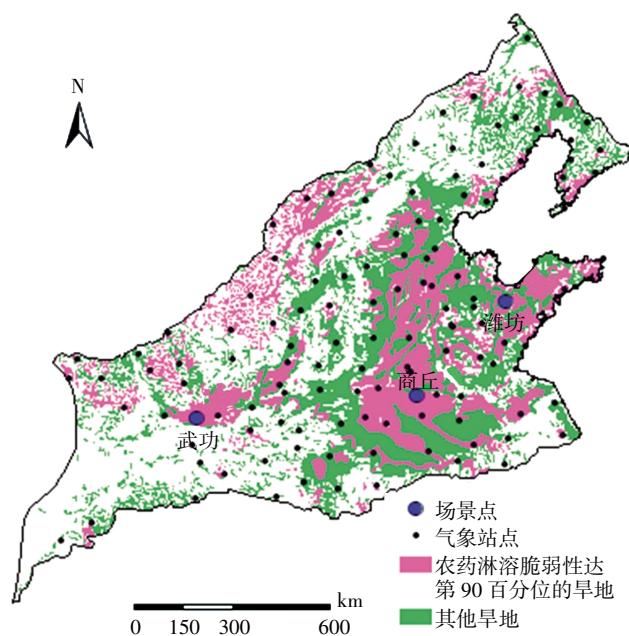


图3 华北区农药淋溶脆弱性第90百分位的旱地分布和场景点选择结果

Figure 3 Distribution of dryland with the 90th percentile of pesticide leaching vulnerability and standard scenarios in North China scenario zone

其他4个场景区中的场景点根据相同的步骤依次选出,由于青藏高原区的农业用地占全区土地面积的比例不到2%,不在该区选择场景点。全国共选择出11个地点用于构建标准场景,如图4所示,各场景点的主要属性如表2所示。

3 结果

根据气候、农业特征,全国被划分成6个场景区,分别是东北区、西北区、华北区、长江流域区、华南区、青藏高原区(图1)。其中,青藏高原区的旱作农业地比例极小,该地区农业在全国农业中所占的比重也很小,因此不考虑在这个场景区选择场景点。剩下的5个场景区中一共选择出11个地点用于构建标准场景(图4)。

3.1 场景区主要特征

各个场景区的主要自然特征、农业条件和作物种植特征分述如下。

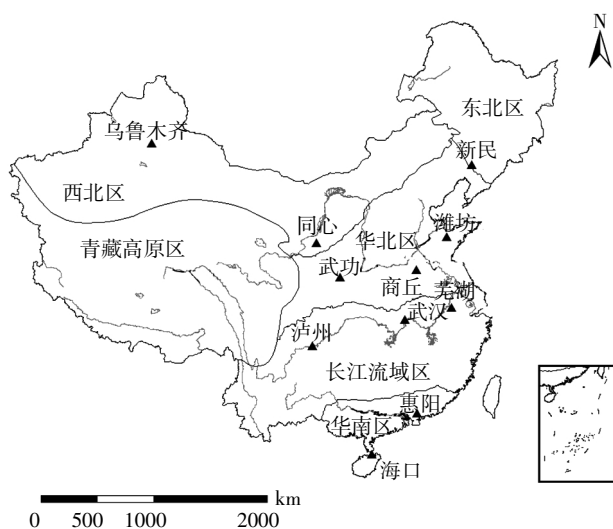


图 4 我国旱地作物环境风险评估所需的
场景区与地下水场景点

Figure 4 Scenario zones and groundwater standard scenarios
established for pesticide environmental risk assessment
in dryland crop system

3.1.1 东北区

该区是中国主要的商品粮和大豆生产基地。纬度高,积温不高,年降雨量 400~800 mm,作物生长期短,主要从 4 月到 10 月;土地肥沃,土壤有机质含量较高;耕地主要分布在三江平原、松嫩平原、辽河平原等地区;地下水、地表水丰富,适宜灌溉。玉米、大豆、春小麦、水稻和高粱是该区 5 种重要的作物,主要轮作方式是一年一熟。

3.1.2 西北区

该区位于半干旱、干旱气候区,干旱少雨,年降雨

量低于 400 mm,积温低;草原面积大,畜牧业发达;地表水稀少,地表蒸发强烈,灌溉条件不好,仅在河水、冰雪融水、地下水灌溉的地区,农作物生长较好,形成主要农业区(宁夏平原和河套平原的引黄灌溉农业区);甘肃河西走廊的农田利用祁连山的冰雪融水灌溉;新疆各盆地边缘的绿洲主要依靠高山冰雪融水和地下水等进行灌溉而形成绿洲农业。主要作物有玉米、马铃薯、春小麦、大豆、谷子、高粱、棉花、春油菜等,一年一熟。

3.1.3 华北区

该区属于暖温带气候区,可分为东部的黄淮海平原和西部的黄土高原。前者是我国重要的冲积平原与重要的农业区,地势平坦,土层深厚,年降水量达到 500~1 000 mm,但降水和地表径流分布不均;主要作物有冬小麦、玉米、大豆,另外,烟草、花生、油菜、向日葵也有很大种植面积,两年三熟或一年两熟。后者降水量 400~600 mm,但年内和年际间分布不均;土壤肥沃,但土质疏松,地表无植被保护,水土流失严重,并且由于长时间的水蚀使得土地表面被切割成纵横交错的台地、脊、沟壑,地下水水位较深;该区种植冬小麦、玉米、马铃薯、黍子、谷子、大豆、芝麻、高粱等,南部两年三熟,北部一年一熟。

3.1.4 长江流域区

该区属于亚热带气候区,积温高,无霜期 210~340 d,雨季长,雨量充沛,农业、林业和渔业都很发达。东部多平原宜耕地面积大,西部多山多丘陵,山间盆地和河谷成为主要的农业生产区。主要作物有水稻、玉米、冬小麦、烟草、冬油菜、花生、芝麻、大豆、甘薯、马铃薯、甘蔗、亚麻、西瓜、苹果、梨、葡萄、柑橘等,

表 2 旱作农田与地下水场景点属性表

Table 2 Properties of standard scenarios of dryland crop system and groundwater established for pesticide environmental risk assessment

场景点 Standard scenario	省份 Province	多年平均降水量/mm Annual average precipitation	多年平均温度/℃ Annual average temperature	表层土类型 Topsoil	土壤有机质含量范围/% Organic matter content of soil
新民	辽宁	571.7	8.7	草甸土	1~2
乌鲁木齐	新疆	252.4	6.7	淡棕钙土	0.6~1
同心	宁夏	270.2	8.9	黄绵土	0.6~1
潍坊	山东	599.1	12.4	褐土	0.6~1
商丘	河南	654.7	14.1	潮土	0.6~1
武功	陕西	590.2	13.2	壤土	0.6~1
泸州	四川	1 085.2	17.8	紫色土	1~2
武汉	湖北	1 145.5	16.5	潮土	1~2
芜湖	安徽	1 216.8	16.1	棕红壤	1~2
惠阳	广东	1 755.9	21.9	赤红壤	1~2
海口	海南	1 651.9	24.0	砖红壤	1~2

一年两熟或一年三熟。

3.1.5 华南区

该区位于亚热带和热带地区,高温多雨,水热资源极其丰富,但各季节降水分布不均,雨季导致严重的水土流失;90%面积是丘陵区,适合农业生产的水平盆地有限;土壤多为赤红壤、砖红壤。水稻、玉米、大豆、甘薯、马铃薯、小麦、花生、油菜、甘蔗是主要作物,轮作方式为一年三熟或四熟。

3.1.6 青藏高原区

该区地势高、气温低,自然条件恶劣,高原上不适合农作物的生长。只有在海拔较低的河谷地区,水热条件组合相对较好,适宜发展种植业生产,因此在南部的雅鲁藏布江谷地、东部的湟水谷地形成了河谷农业生产。主要农作物是青稞和小麦。这个场景区农用地比例小,在全国农业所占的比重也较小,因而不考虑在该区构建场景点。

3.2 场景点主要特征

场景点的气象、土壤、地下水、灌溉条件、作物特征等数据是标准场景的重要组成部分,其中的主要属性如表2所示。

3.3 PEARL 模型检验

为了检验本研究所建立的场景体系的科学性及其在中国适用性,在本节中将所构建的标准场景参数录入 PEARL 模型数据库中,并选择三种不同类型的农药进行测试。PEARL 模型是欧盟用于判断新农药对地下水有风险与否的官方模型之一,其中设定了环境、农业生产条件等对农药环境行为产生影响的要素组成的若干个标准场景,用户只需选择场景点、作物类型、灌溉方式,并输入需要评估农药的物理化学性质,设定模拟时期,便可以获得该农药进入地下水后的残留浓度。三种农药分别是莠去津(Atrazin)、杀毒矾(Oxadixyl)和涕灭威(Aldicarb),它们的物理化学特性如表3所示。莠去津是常用的除草剂,对人畜低毒,

在玉米田中通常于出苗前兑水喷洒于土壤表面,易被雨水淋溶至土壤深层,对地下水具有潜在危害;杀毒矾是一种低毒杀菌剂,半衰期长且不易被土壤吸附,但一般通过加水喷雾于作物表面,因进入土壤系统的有效成分较少,故向下淋溶的农药量也较少,正确使用对地下水不构成威胁;涕灭威属于剧毒杀虫剂,具有极高的水溶性和极长的半衰期,在土壤中淋溶与移动性强,且多通过穴施或沟施撒布于作物根部附近,对土壤和地下水具有极高的风险,属于限制使用的农药,对施用环境与施用作物的种类有严格要求^[23]。

PEARL 模拟这三种农药施用于华北区标准场景的玉米田中,模拟期为1976—2001年。根据模拟结果,在这26年模拟期内,这三种农药施用后在地面以下1 m深处土壤渗滤液的浓度变化和第90百分位分别如图5、表4所示。

分析三种农药多年的浓度变化规律可以发现,当年降水量大时,农药残留在土壤渗滤液的浓度也随之增加,即农药浓度曲线出现波峰,尤其是溶解度大的农药最为明显。以商丘为例,在模拟期内,该点的三种农药浓度都出现了6个较明显的波峰,分别出现在1976、1979、1984、1990、1995、2000年,这正与商丘点年降水量较大值出现的年份吻合;武功在1984年和1985年两年的年降水量较多,农药残留浓度曲线相应地出现了明显波峰,而商丘较多的降水量出现在1985、1986年,农药残留浓度曲线波峰的出现也较之武功有所退后;1998年商丘也有较多降雨,农药残留浓度却没有出现较高的值,因为当年在农药施用之后短时间内没有降雨。这也说明了农药在土体中的残留浓度值还与降雨事件发生的时间有关,若农药施用之后马上有降雨,则会有更多的农药随雨水向土壤内部淋溶。

欧盟的饮用水中农药最大可容许浓度标准为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,根据此标准,施用莠去津和涕灭威对施用地

表3 模型运行所需的农药物理化学数据与施用情况^[24-25]

Table 3 Physical and chemical properties and applications of three pesticides assessed

农药施用参数 Pesticide properties and applications	莠去津 Atrazin	杀毒矾 Oxadixyl	涕灭威 Aldicarb
摩尔质量 Molar mass/ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	215.7	278.3	190.3
溶解度 Solubility/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	33(22 °C)	3.4(20 °C)	6000(20 °C)
饱和蒸汽压 Saturated vapour pressure/Pa	0.000 038 5(25 °C)	0.000 033(25 °C)	0.013(20 °C)
土壤吸附率 Soil adsorption/ $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	42	2	22
半衰期 Half-life period/d	41	80	1557
施用方式 Application pattern	土壤表面	喷雾	穴施(深度 0.1 m)
施用量 Amount of application/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	1.2	1.63	0.9
施用时间 Application time	出苗前 14 d	成熟前 10 d	出苗后 36 d

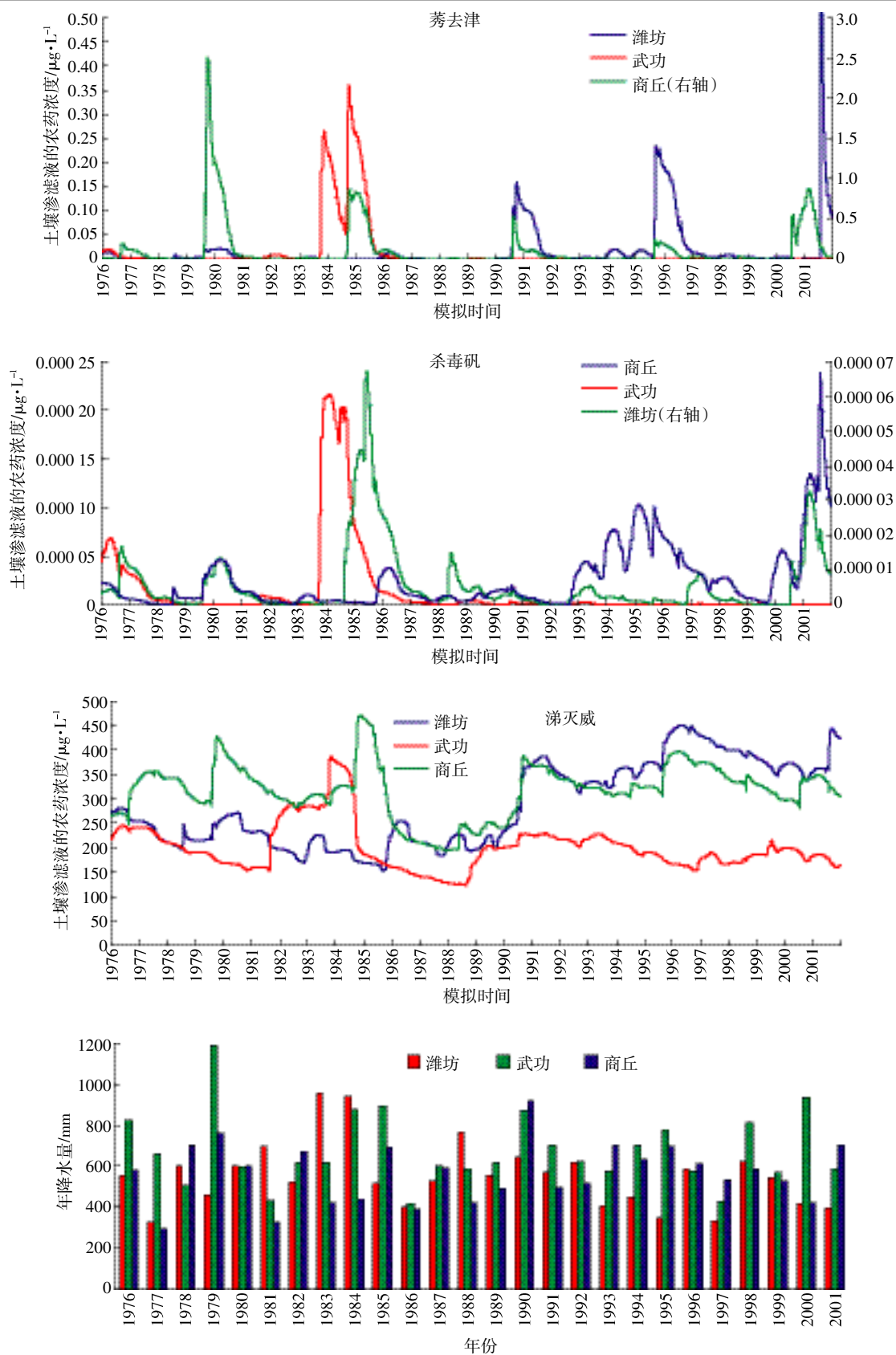


图5 1976—2001 年三种农药在地面以下 1 m 深处土壤渗滤液的浓度变化及三个场景点年降水量变化

Figure 5 Concentrations of atrazine, oxadixyl and aldicarb at 1 m below ground and annual precipitation at Wugong, Shangqiu and Weifang during 1976—2001

表4 模拟期内三种农药在华北区场景点地面以下1 m深处土壤渗滤液第90百分位的残留浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 The simulated 90th percentile concentrations of three pesticides at 1 m below ground in standard scenarios in North China scenario zone during 1976 to 2001

场景点 Scenario	莠去津 Atrazin	杀毒矾 Oxadixyl	涕灭威 Aldicarb
潍坊	1.05	0.000 22	1 096.03
商丘	2.81	0.000 27	516.41
武功	0.44	0.000 29	642.23

的地下水存在巨大风险,而杀毒矾的施用则是安全的。我国目前尚未出台农药浓度在地下水中的限量标准,仅在《地下水质量标准》^[20]中规定了作为饮用水源和农业用水的地下水中滴滴涕与六六六的浓度限量分别为 $1.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因为滴滴涕与六六六的毒性巨大,将模拟所用的三种农药与此标准相比可知,莠去津和杀毒矾的施用对地下水都是安全的,而涕灭威的施用则对地下水产生巨大威胁。这一结论与这三种农药在现实中的使用情况相符。

4 结束语

本文研究旱作农田与地下水系统的农药环境风险评估中标准场景的构建,搜集整理了我国的土地利用类型数据、多年气象数据、土壤有机质含量数据、土壤剖面数据、作物生长期数据等,利用GIS技术及其专业软件强大的空间数据处理及空间分析功能。首先,根据我国农业生产的自然条件将全国划分成东北区、西北区、华北区、长江流域区、华南区、青藏高原区6个场景区;其次,选择了能够代表我国典型农业生产环境的11个标准场景;最后,采用欧盟PEARL模型,以华北地区3个场景点为例,测算了三种不同类型的农药在地面以下1 m深处土壤渗滤液90百分位的残留浓度,评价了农药的地下水环境风险。本研究体现了GIS技术在处理空间数据上的优势,为我国农药环境风险管理提供技术支持和科学依据。

农药环境暴露模型及其场景体系研究在我国刚刚起步,虽然本研究中借鉴了欧盟和美国等发达国家的经验和教训,但由于我国农业环境风险评估基础研究较少,相关的标准尚未建立,本文研究了旱地作物的农药地下水环境风险所需的场景体系的构建,存在以下不足有待改进。

(1)由于我国土壤、气象、水文和农业等基础数据的数据共享制度尚未完善,收集难度很大,因此研究过程中所涉及的分區、选择指标还有待进一步研究和

完善。对土壤中农药淋溶行为有较大影响的因素,如饱和田间持水量、土壤孔隙率,以及可能改变农药迁移行为的因素,如地下水水位,在将来的研究中应纳入考虑。

(2)为进一步验证PEARL模型的准确性,应将预测值与实测值进行对比研究,因此有必要在场景点实地进行农药残留浓度实测。

(3)除了完善旱地和地下水的农药环境风险评估场景体系外,还将对旱地和地表水、水田和地下水、水田和地表水的农药环境风险特征进行研究,分别对这四类系统建立相应的农药环境风险评估场景,构建适合我国农业生产条件的PEARL模型数据库。

致谢:感谢香港中文大学地理与资源管理系陈永勤教授对本文英文部分的修改和宝贵意见。

参考文献:

- [1] 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 Liang, ZHOU Jun-ying, CHENG Yan, et al. Review of exposure simulation shells for pesticide ecological risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(1):10-18.
- [2] FOCUS. FOCUS Groundwater Scenarios in the EU Review of Active Substances; Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup [Z]. 2009.
- [3] FOCUS. FOCUS Surface Water Scenarios in the EU Evaluation Process under 91/414/EEC[R]. 2001.
- [4] 程燕,周军英,单正军.基于RICEWQ EXAMS模型的东苕溪流域稻田用药的水生生态及健康风险评价[J].生态与农村环境学报,2012,28(5):579-586.
CHENG Yan, ZHOU Jun-ying, SHAN Zheng-jun. 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 and Rural Environment*, 2012, 28(5):579-586.
- [5] CHANG Kang-Tsung. 地理信息系统导论[M].北京:科学出版社,2004.
CHANG Kang-Tsung. Geographic information systems[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] Blenkinsop S, Fowler H J, Dubus I G, et al. Developing climatic scenarios for pesticide fate modelling in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(2):219-231.
- [7] Serenella S, Marco V. GIS-Based procedure for site-specific risk assessment of pesticides for aquatic ecosystems[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(1):1-12.
- [8] 蔡道基,朱忠林,单正军,等.涕灭威对地下水污染敏感区的预测与区划试点[J].环境科学进展,1995,3(1):11-37.
CAI Dao-ji, ZHU Zhong-lin, SHAN Zheng-jun, et al. Prediction of vulnerable areas and division of groundwater contamination by Aldicarb[J]. *Advances in Environmental Science*, 1995, 3(1):11-37.

- [9] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集[EB/OL].[2008-01-15]. <http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>
China Meteorological Data Sharing Service System. Daily Meteorological Data of China Weather Stations[EB/OL].[2008-01-15]. <http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>
- [10] 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所数字土壤实验室. 全国 1:400 万土壤有机质含量图(数字化格式)[DB]. 2005.
Digital Soil Lab, Institute of Agricultural Resources and Region Planning, CAAS. Soil organic matter content of China(1:4 000 000)[DB]. 2005.
- [11] 马晓群, 王效瑞, 徐 敏, 等. GIS 在农业气候区划中的应用[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(1): 105-108.
MA Xiao-qun, WANG Xiao-rui, XU Min, et al. Application of GIS in agricultural climatic zoning[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2003, 30(1): 105-108.
- [12] 马占鸿, 石守定, 姜玉英, 等. 基于 GIS 的中国小麦条锈病菌越冬区气候区划[J]. 植物病理学报, 2004, 34(5): 455-462.
MA Zhan-hong, SHI Shou-ding, JIANG Yu-ying, et al. Climate-based regional classification for overwintering of *Puccinia striiformis* in China with GIS[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2004, 34(5): 455-462.
- [13] 中国科学院资源环境科学数据中心. 全国 1:400 万土地利用图(数字化格式)[DB]. 2000.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, CAS. Landuse of China(1:4 000 000)[DB]. 2000.
- [14] 刘明光. 中国自然地理图集[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
LIU Ming-guang. Atlas of Chinese natural geography[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000.
- [15] 李应中. 中国农业区划学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997.
LI Ying-zhong. Chinese agricultural zoning[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 1997.
- [16] Janssena M A, Schoon M L, Ke W. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 240-252.
- [17] Timmerman P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications[M]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [18] Cutter S L. Living with risk: The geography of technological hazards [M]. London: Edward Arnold, 1993.
- [19] 朱忠林. 合理使用农药, 防止对地下水的污染[J]. 农药科学与管理. 1994(3): 34-37.
ZHU Zhong-lin. Applying pesticide appropriately to avoid groundwater contamination[J]. *Pesticide Science and Administration*, 1994(3): 34-37.
- [20] 刘维屏. 农药环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LIU Wei-ping. Pesticide environmental chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [21] 陈万义. 新农药的研发——方法·进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
CHEN Wan-yi. Research and development of new pesticide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [22] 袁光耀. 农田灌溉排水研究与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
YUAN Guang-yao. Study and practice on irrigation and drainage of cropland[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2005.
- [23] 蔡道基, 朱忠林, 单正军, 等. 涕灭威农药污染地下水的的影响因子分析[J]. 农村生态环境, 1994, 10(1): 25-28.
CAI Dao-ji, ZHU Zhong-lin, SHAN Zheng-jun, et al. Analysis on the factors affecting Aldicarb ground water contamination[J]. *Rural Eco-Environment*, 1994, 10(1): 25-28.
- [24] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 成都平原蔬菜生产中灌溉水对农药渗漏的影响研究[J]. 生态环境, 2005, 14(5): 710-714.
LIN Chao-wen, CHEN Yi-bing, HUANG Jing-jing, et al. Effect of irrigation on pesticides leaching in vegetable farming in Chengdu plain using PEARL model[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5): 710-714.
- [25] 熊文兰, 陈一兵, 林超文. 利用 PEARL 模型评价农药渗透对地下水的污染[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 58-65.
XIONG Wen-lan, CHEN Yi-bing, LIN Chao-wen. The pollution evaluation of pesticide infiltration to groundwater by PEARL model[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(4): 58-65.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. GB/T 14848—1993 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
Ministry of Environmental Protection of PRC. GB/T 14848—1993. Quality standard for ground water[S]. Beijing: China Standards Press, 1994.