

基于 SWAT 模型的泗河流域除草剂迁移模拟

徐燕¹, 孙小银^{1,2*}, 刘飞¹, 樊玉娜¹, 蒋斋¹ (1.曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东日照 276826; 2.曲阜师范大学南四湖湿地生态与环境保护山东省高校重点实验室, 山东日照 276826)

摘要: 泗河流域农药污染对南四湖湖泊乃至南水北调工程具有重要的影响, 为了解流域农药迁移过程并对其采取治理措施, 本研究在泗河流域通过实地采样与调查、室内实验分析、数据统计等手段, 借助 SWAT 模型对流域除草剂阿特拉津及其代谢产物进行迁移模拟。结果表明, 除草剂输出与流域径流量有很高的相关性, 输出时间以 7~8 月份为主, 输出量占全年的 69% 以上。且受河道长度、耕地分布等因素的影响, 阿特拉津的输出量以东部上游地区和中部地区为主, 流域出水口处的阿特拉津输出量居中等水平; 阿特拉津代谢产物 DEA 和 DIA 的输出量的空间分布相似, 以下游流域出口处和中部地区为主。本研究可为流域除草剂迁移治理提供理论支持。

关键词: 阿特拉津; DEA; DIA; SWAT 模型; 泗河流域

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)10-3959-08

Simulation of herbicide transportation in Sihe watershed by SWAT model. XU Yan¹, SUN Xiao-yin^{1,2*}, LIU Fei¹, FAN Yu-na¹, JIANG Zhai¹ (1.Geography and Tourism College, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2.Key Laboratory of Nansihu Lake Wetland Ecological and Environmental Protection, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China). *China Environmental Science*, 2018,38(10): 3959~3966

Abstract: Pesticide pollution in Sihe watershed, China can have a negatively effect on Nansihu lake and aquatic environment of South-North Water Diversion Project. To understand the process of herbicides transport and best management practices in the watershed, transport simulation of herbicide including atrazine and its transformed products in Sihe watershed performed by SWAT model and field investigation. The results demonstrated that there was a high correlation between the output of herbicides and runoff. The time of herbicides output was mainly concentrated in July and August, which accounted for more than 69% of output in the whole year. The spatial distribution of herbicides load in the watershed was affected by the length of the river and distribution of agricultural land. The output of atrazine distributed primarily in eastern and central region of upstream areas, and catchment outlet of herbicide output was in the middle. However, the spatial distribution of the output of atrazine transformed products including DEA and DIA were similar to their parent compound, which mainly located in the catchment outlet of the downstream areas and the central region in Sihe watershed. The study can provide theoretical support for the management of herbicide migration in the basin.

Key words: atrazine; DEA; DIA; SWAT model; Sihe watershed

化肥和农药在施用过程中除小部分对作物产生作用之外,大部分会残留在土壤或漂浮于大气中,而另外一部分则通过降雨、灌溉和淋溶等途径进入水体环境^[1],使农业流域面临着来自于大气、土壤、水等不同程度的污染问题^[2-3]。已有不少学者对不同环境介质下的农药污染负荷进行研究,且地域分布广泛,成果丰富,如松花江流域 97% 的河岸土壤被检测到有除草剂的残留^[4];农药施用地附近的地表水和地下水中被检测出阿特拉津残留^[5];此外青岛^[6]、河西走廊^[7]、新疆哈密^[8]地区的大气中被检测出不同程度的有机氯农药残留。

阿特拉津(Atrazine)是一种使用广泛的除草剂之一,生态毒理学研究证明阿特拉津是一种致癌物质和内分泌干扰物质,对人类健康造成威胁,被美国

环保署(EPA)列为国际环境优先污染物^[9-11]。而且,研究发现阿特拉津的转化产物脱乙基阿特拉津(DEA)、脱异丙基阿特拉津(DIA)比母体化合物更具有生态毒性^[12]。

南四湖是南水北调东线工程的重要输水通道和调蓄湖泊^[13-14],而泗河是南四湖东部山区最重要的入湖河流,多年平均径流量达 $14620 \times 10^4 \text{ m}^3$,输沙量 $5.13 \times 10^4 \text{ t}$ ^[15],是南四湖重要的输水输沙通道,同时也是污染物进入湖区的直接通道之一。泗河流域农药和化肥的大量使用,使流域水质受到严重污染,对流域和南水北调工程有重要影响。目前,已有诸多学者

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(41471389)

* 责任作者, 副教授, xiaoyin-sky@163.com

利用 SWAT 模型研究氮磷等非点源污染情况^[16-18],而对农药污染的模拟与研究的报道甚少.本研究以南四湖流域的子流域——泗河流域为例,运用 SWAT 模型综合考虑流域内地形地貌、水文特征、气候、土地利用方式及类型、土壤结构以及农药的施用等,对流域典型除草剂阿特拉津及代谢产物的污染和迁移进行模拟评价,分析其迁移过程、空间分布及其影响因素,以期对泗河流域非点源污染尤其是农药污染控制提供依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

泗河流域是淮河流域在山东省的重要部分,泗河发源于山东省新泰市太平山顶西麓,全长 159km,总流域面积 1830km²,行政区包括济宁市、泰安市、临沂市.河流以国家水文站书院水文站为界,上游流域较宽,下游流域较窄.本研究的研究区域为书院站以上区域的中上游流域,面积 1530km²(图 1).流域地形多样,山地、丘陵、平原皆有分布,地势南北高,中间低,东部高西部低,地形起伏大.地处暖温带半湿润地区,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冷热与干湿季节明显^[19].经统计,流域多年平均降水量在 660mm 以上,且 7、8 月份的降水占全年降水的 30% 以上,西北部降水少,东南部降水多.多年平均气温在 11.1~13.7℃ 之间,西部高于东部.平均相对湿度在 60.12%,西南部和东南部相对湿度较北部高,平均风速 2.83m/s,且北部风速较大.

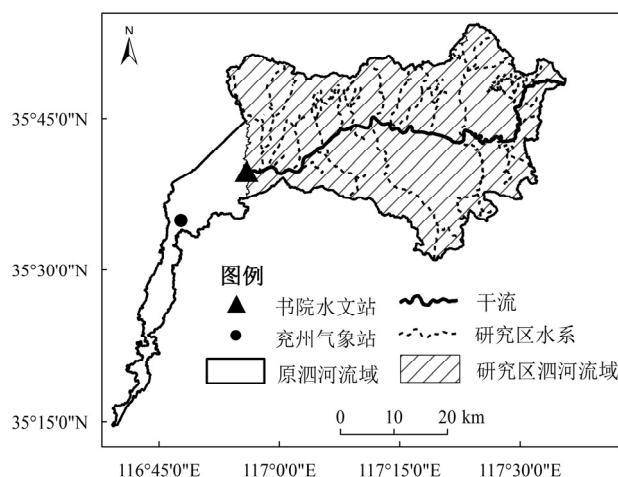


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

泗河流域是传统的农业流域,耕地面积达 66.03%,主要土壤类型为高活性淋溶土,播种的作物类型主要有夏收和秋收等粮食作物、花生和油菜籽等油料作物、棉花和蔬菜瓜果类作物,主要种植的粮食作物是小麦、玉米、大豆、稻谷、高粱等.

1.2 数据来源

数字高程数据(DEM)(30m×30m)来自美国马里兰大学全球土地覆被数据库;土地利用数据(1:10 万),来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);土壤数据(1km×1km)来自世界土壤数据库(HWSD)^[20];研究区的水系是根据 91 卫图助手下载的研究区 16 级影像数据(1.94m×1.94m)矢量化而来,并用中国基础地理信息数据的四级河流进行校正.研究采用的气象站点为兖州站,水文站点为书院站.2006~2017 年日降水量、日最高和最低气温、日相对湿度、日太阳辐射、日平均风速等实测数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data/index.html>).本研究中所涉及的书院水文站的水文数据来自于济宁市水文局,具体为 2006~2011 年月经流和 2015~2017 年日径流,用作模型水文过程模拟的率定和验证.通过对研究区的实际调查,将流域内玉米地作为主要模拟对象.经调查,研究区 70% 以上的农用地种植玉米,主要施用金玉安烟嘧莠去津除草剂(阿特拉津与烟嘧磺隆混合除草剂),施用时间为每年的 6 月中旬,每亩施用量为 100g,其中金玉安烟嘧莠去津除草剂总有效成分 25%,阿特拉津含量 22.5%.

1.3 水样采集与实验分析

研究区水样采集工作于 2017 年 2 月 25 日开始,2017 年 12 月 2 日结束,采样地点为书院水文站,采样周期为 2 周一次,每次采集水样 2 瓶(550mL/瓶),共采集水样 21 次、42 瓶,冷冻保存带至实验室分析.经 0.45μm 滤膜过滤、Waters Oasis HLB 固相萃取小柱(6cc)萃取、氮吹浓缩、气相色谱分析等步骤得到研究区泗河流域出水口处的阿特拉津及其代谢产物 DEA、DIA 实测数据.具体实验方法参考杨梅等^[21]的研究.

1.4 模型构建

1.4.1 SWAT 模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是一种半分布式水文模型^[22],采用物理机制和半经验方法基于日尺度的

气象数据模拟水文循环中的不同过程,并模拟和预测各种管理措施对水文物理化学过程的影响^[23]. SWAT 模型中对农药的迁移模拟可分为 3 个过程:(1)农药在陆地上的运移过程;(2)农药从陆地运移至河网中的过程;(3)农药在河流中的运移过程^[24].本研究使用的版本是 SWAT 2012,与其相匹配的 ArcGIS 10.2 版本进行模拟.在利用 SWAT 模型对研究区典型除草剂阿特拉津及代谢产物的迁移模拟时,可以将其与水样中阿特拉津及代谢产物的实际残留值比较,评价模型对泗河流域除草剂模拟的适用性.

1.4.2 数据库的构建 构建 SWAT 模型,模拟泗河流域除草剂迁移,首先需要构建泗河流域的数据库,分为空间数据库和属性数据库.空间数据库主要包括 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、河网水系数据等;属性数据库主要包括土地利用类型属性表、土壤类型属性表、气象数据、水文水质数据、农业管理信息数据等.

1.4.3 空间离散化 通过加载矢量化得到的河网

水系提高 SWAT 生成河网的精度和准确度.设置最小河道集水面积的阈值为 3000ha,书院水文站即为流域出水口和总出水口,通过以上设置将研究区划分为 31 个子流域.根据流域不同的土地利用类型、土壤类型和坡度将流域进一步划分为不同土地利用类型、土壤类型和坡度的组合,即水文响应单元(HRUs),选择 Multiple HRUs 方法来定义 HRU 阈值,设置土地利用阈值为 5%,土壤阈值为 3%,坡度阈值为 20%,将子流域上小于该阈值的类清除掉,再重新分配所有类.且经调查,研究区的农用地有 70%种植玉米,将玉米地作为土地利用亚类输入.依以上方法,将流域划分了 781 个 HRUs.

1.4.4 模拟结果的评价指标 本研究选取 R^2 、NS、Re 作为评价模拟结果的指标,通过实测值与模拟值之间的计算,进而得知模拟结果是否可信,具体计算方法见文献[25-27].

2 模型模拟

2.1 径流模拟

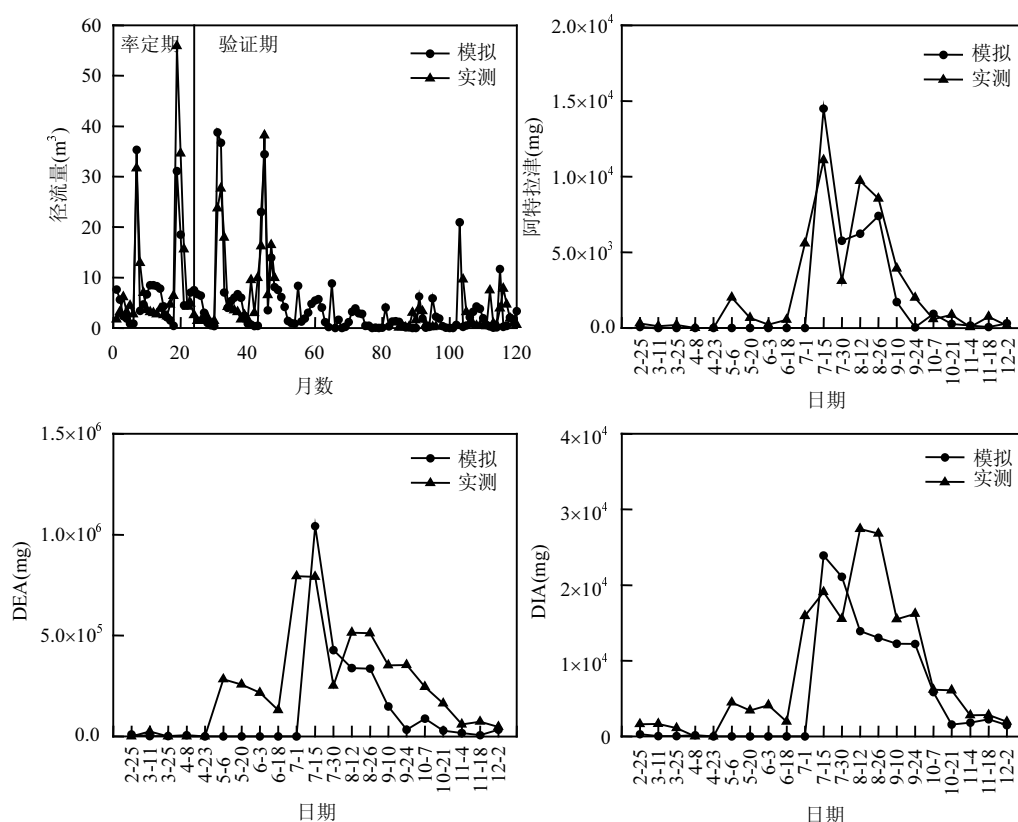


图 2 泗河流域径流和农药的模拟值与实测值

Fig.2 Simulation values and observation values of runoff and herbicides in Sihe watershed

利用 SWAT-CUP 软件进行参数的敏感性分析

和模型的率定.通过查阅文献与流域实际情况,选择

了 18 个与径流有关的参数进行敏感性分析与率定,由 CUP 中提供的全局敏感性分析方法,得到泗河流域径流模拟的前 5 个敏感性参数排名与取值(或范

围)如下:CN2.mgt (30~93)、ALPHA_BF.gw(0.99)、GW_DELAY.gw (495)、GW_REVAP.gw(0.16)、ALPHA_BNK.rte(0.19)。

表 1 泗河流域农药参数的率定

Table 1 Calibration of parameters in herbicides model

参数	文件	定义	最终取值		
			Atrazine	DEA	DIA
SKOC	pest	通过土壤有机碳含量标准化的土壤吸附系数	50	41	51
WOF	pest	农药冲刷系数	0.8	0.82	0.9
HLIFE_F	pest	农药在叶片上的半衰期	8.7	100	6
HLIFE_S	pest	农药在土壤中的半衰期	96	170	60
AP_EF	pest	农药的喷洒效率	0.95	0.95	0.95
WSOL	pest	水中农药的溶解度	45	3200	980
PERCOP	bsn	农药的渗透系数	0.9	0.8	0.9

由于气象数据长度为 2006~2017 年日值数据,考虑到模型初始运行时部分参数为 0 的情况会影响模型结果,同时结合径流实测月数据的获取情况,本研究对模型设置了 2a 的预热阶段,将模拟阶段分为 2008~2009 年的率定期,2010~2017 年的验证期,模拟流域月尺度径流,其径流模拟值与实测值如图 2 所示,模拟的月径流过程线与实测值大体吻合,峰值均在 7 月和 8 月,其中率定期的 $R^2=0.70$, $NS=0.66$, $RE=17\%$;验证期的 $R^2=0.71$, $NS=0.61$, $RE=1.5\%$ 。 R^2 、 NS 、 Re 均能满足研究要求^[28-29]。

2.2 除草剂模拟

以径流模拟的水文参数值为基础,添加农业管理信息数据,输出 2017 年除草剂模拟结果,选取 SWAT 模型的河道输出文件 rch.output 中 SOLPST.OUT 字段表示河段中可溶性农药的输出量,将 2017 年除草剂的模拟结果加载至 CUP 中进行参数率定,选择表 1 中的 7 个参数为除草剂率定的参数。

2.2.1 阿特拉津的模拟 通过查阅同类研究文献[30-31]得到参数的初始范围,由除草剂的初始模拟结果可知,2017 年 7 月之前的农药日尺度输出量几乎为 0,此时段不能作为率定期,故选取 7 月 15 日~12 月 2 日时段进行参数率定,参数的最终取值见表 2。且 7 月 15 日~12 月 2 日的模拟结果为 $R^2=0.81$, $NS=0.75$, $RE=12.02\%$,输出 2017 年阿特拉津模拟结果,如图 2 所示。

2.2.2 DEA 的模拟 SWAT 的农药数据库中沒有代谢产物 DEA 与 DIA 的参数数据,首先通过查阅同类研究文献^[32-33]与模型默认的方法获取参数

初始范围,并通过率定来进一步确定,选取 7 月 15 日~12 月 2 日时段进行参数率定,参数的最终取值见表 1。7 月 15 日~12 月 2 日的模拟结果为 $R^2=0.72$, $NS=0.35$, $RE=25\%$,输出 2017 年 DEA 模拟结果如图 2 所示。

2.2.3 DIA 的模拟 如 DEA 模拟一样,先搜集 DIA 的各参数值或范围^[32-34]再率定,同样,选取有输出量的 7 月 15 日~12 月 2 日时段进行参数率定,参数的最终取值见表 1。7 月 15 日~12 月 2 日的模拟结果为 $R^2=0.57$, $NS=0.46$, $RE=22\%$,输出 2017 年 DIA 模拟结果如图 2 所示。

除草剂虽在 2017 年 7 月之前的模拟效果不及 7 月之后的效果好,但是 7 月 15 日~12 月 2 日阿特拉津及代谢产物的模拟与实测差别不大,评价指标结果表明模拟结果符合研究要求。

3 泗河流域除草剂迁移转化的时空特征分析

3.1 除草剂输出的时间分布特征

本研究以子流域的河道中农药输出量作为子流域农药污染的指标,通过模拟结果发现(图 3、图 4),泗河流域农药输出存在明显的时间差异,流域 Atrazine 及其代谢产物 DEA、DIA 的输出时间均以 7~8 月份为主,输出量最大,分别占全年输出量的 78.54%、77.40%和 87.89%,3~6 月份输出最少,分别占全年输出量的 0.13%、0.69%和 0.13%。

统计每天流域的除草剂输出量,得到流域河道农药输出总量的日尺度分布(图 4),由图 4 可知,泗河流域农药输出存在明显的波动,7 月份之前各农药输

出值极低,7 月份出现输出量的峰值,再往后输出量开始波动降低.各农药输出量的峰值分别为

1314.04g(Atrazine)、88010.5g(DEA)、17538.18g(DIA),峰值出现的时间一致.

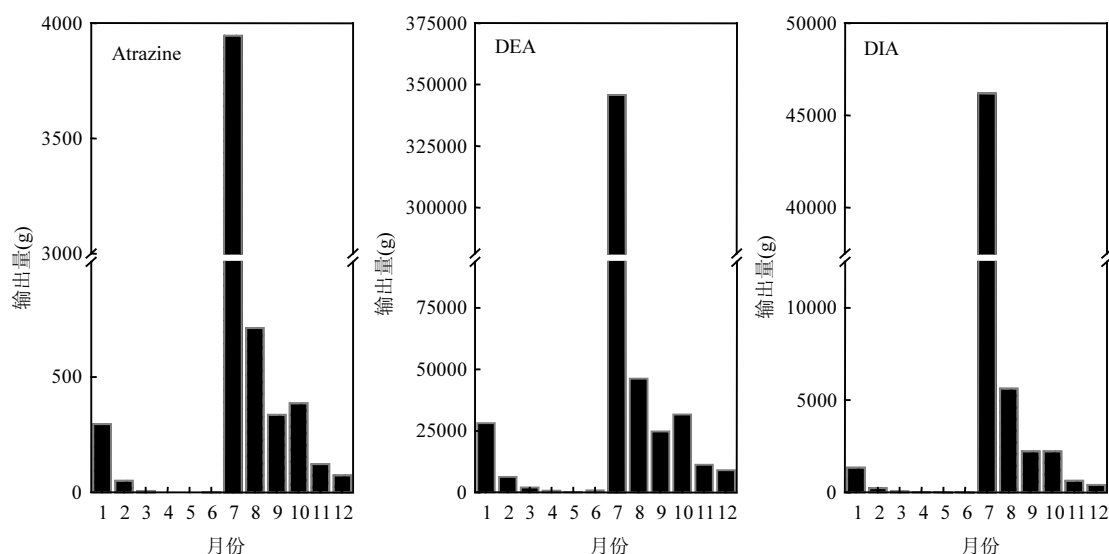


图3 泗河流域河道农药输出总量的月尺度情况

Fig.3 Total of herbicides output in river at monthly scale

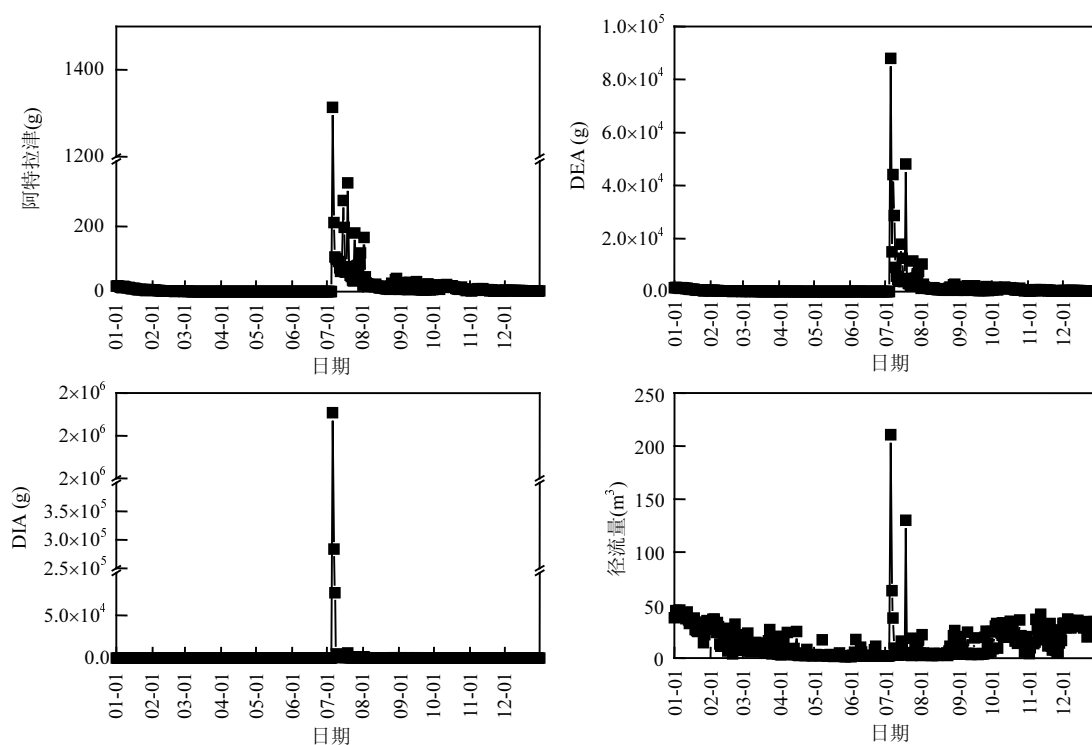


图4 泗河流域河道农药输出总量的日尺度分布

Fig.4 Herbicides output of Sihe river at daily scale

泗河流域 Atrazine 及其代谢产物的输出与流域径流量输出有很高的相关性(表 2),农药的陆地向河道的运移与降水、径流等气象水文要素有关,降水过程是植物叶面和土壤中的农药迁移的主要动力,伴

随着径流过程迁移至河道,造成河道中农药的汇集.1~6 月降水较少、径流输出量不大以及 6 月中旬才开始施用农药,所以农药在此阶段输出量极低,其中 1 月份降水稍多于 12 月与 2 月,故 1 月份的阿

特拉津及其代谢产物输出量高于 12 月份和 2 月份.Atrazine 和 DEA 的输出量在 1~6 月期间有下降趋势,可见上年的农药施用造成的影响逐渐减弱.7 月受到降水的影响,流域河道径流输出之和出现峰值,农药施用时间和降水事件的发生是农药输出量在 7 月份达到峰值的主要原因.8~12 月径流输出量又开始降低,农药输出量在此期间下降明显.此外 DEA、DIA 与 Atrazine 也具有极强的相关性,说明河道中母体污染物 Atrazine 大多转化成其代谢产物,且代谢产物的输出量普遍高于 Atrazine 的输出量.

表 2 日尺度农药输出总量与径流总量的相关性
Table 2 Correlations between herbicides and runoff

参数	Atrazine	DEA	DIA	径流量
Atrazine	1	0.907**	0.991**	0.628**
DEA	0.907**	1	0.900**	0.626**
DIA	0.991**	0.900**	1	0.650**
径流量	0.628**	0.626**	0.650**	1

注:**:在0.01水平(双侧)上显著相关.

3.2 除草剂输出的空间分布特征

统计每条河道的农药日输出量,得到流域河道的日均尺度农药输出量分布图(图 5),由此可看出,Atrazine 输出量最多的为 1、2、12、5、18 号子流域,输出量最低的为 31、29 号子流域.结合流域土地利用情况发现,Atrazine 输出量高的子流域的土地利用构成均以农业用地为主,且农用地占比在 57%以上,此外坡度大,降水事件发生时,施用在田地里的农药进入河道所需时间短,消耗少,以及河道中的水量小,对农药的稀释作用弱,造成 Atrazine 输出量大.输出量低的子流域土地利用构成中林、草地分布较多,农药施用量不大且河道长径流量大,对河道中的农药稀释能力强,造成 Atrazine 输出量低.中游地区 Atrazine 输出量较高,与当地农药施用强度、河道汇集造成农药输出量汇集等有关.Atrazine 的输出量主要以东部上游地区和中部地区为主,流域出口处的 Atrazine 输出量居中等水平.

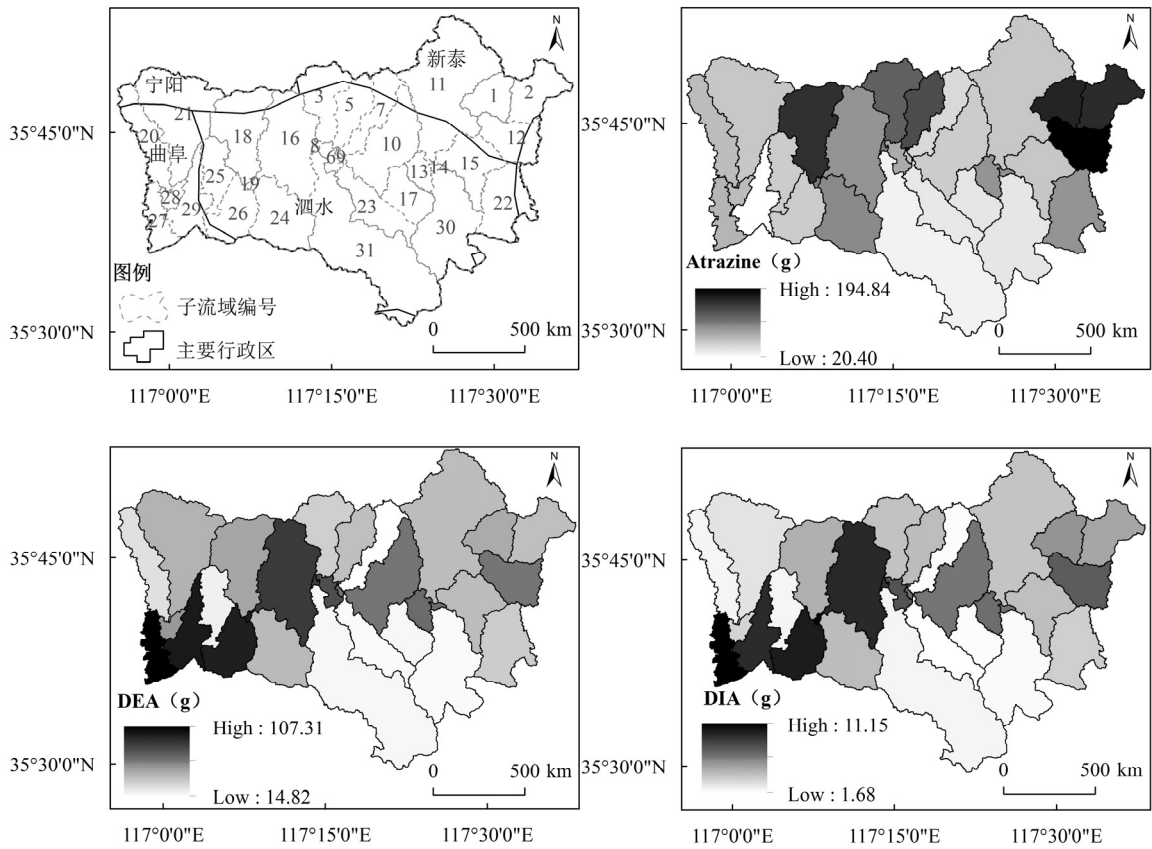


图 5 泗河流域农药输出的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of herbicides output in river

DEA 和 DIA 输出量的空间分布相似,输出量最多的为 26、27、29 号子流域以及主河道的部分子

流域,17、23、30、31、7、20、25 号子流域 DEA 和 DIA 的输出量极低,输出量较多的子流域位于流域出水口处,因其汇集了全流域的农药污染物.随着时间的累积,Atrazine 被转化成代谢产物,造成流域出水口处的 DEA 和 DIA 输出量高,且大于 Atrazine.而部分子流域农药输出量低是由于本身河道中 Atrazine 含量,导致的代谢产物输出少.总体而言,DEA 和 DIA 的输出量以下游流域出口处和中部地区为主,而 Atrazine 输出量高的上游地区,其代谢产物输出量却处于中等水平,这可能与代谢过程有关.

表 3 除草剂输出量的影响因素
Table 3 Impact factors of herbicides output

项目	Atrazine	DEA	DIA	Sum
产水	0.168	0.258	0.219	0.262
产沙	-0.064	-0.464**	-0.408*	0.597*
河长	-0.414*	-0.315	-0.328	-0.493**

注:**在0.01水平(双侧)上显著相关,*在0.05水平(双侧)上显著相关.

以子流域为单元,分析子流域产水、产沙以及河长与农药输出量的关系(表 3).产水量与农药输出量相关性不高,但是除草剂输出量是随着产水量的增加而增加.输出量与产沙量呈负相关,尤其与 DEA 和 DIA 具有很强的负相关性,河道中泥沙对农药有吸附作用^[35-36],产沙量大的子流域地形坡度大,农用地占地面积少,除草剂输出量低.此外除草剂输出量与河道长度呈负相关,河道越短,农药输出量越大.

由于 SWAT 模型的参数率定是一项不断调整模型参数以达到模拟值与实测值近似的过程,因此,这一过程需要诸多实测数据的支持.此外,SWAT 模型以水文过程为基础,水文过程的模拟对后续模拟工作具有重要影响.针对研究过程中遇到的问题,本研究存在着不足,如经过考察得到的农药施用时间和施用量并不能代表所有农户的施用情况,由此造成的模拟误差在所难免.因此,在今后的研究中,可以深入探讨农药施用时间和施用量的变化对除草剂迁移转化的影响.

4 结论

4.1 Atrazine 与其代谢产物 DEA、DIA 的输出具有极强的相关性,说明河道中母体污染物 Atrazine 大多转化成代谢产物,而且,代谢产物的输出量普遍高

于 Atrazine 的输出量.

4.2 就流域整体而言,阿特拉津及其代谢产物的输出与流域径流量、河道长度、农用地分布等有关.除草剂输出量是随着产水量的增加而增加;输出量与产沙量呈负相关,尤其与 DEA 和 DIA 具有很强的负相关性;输出量与河道长度呈负相关.

4.3 从时间上来看,阿特拉津及其代谢产物的输出以 7~8 月份为主,输出量占全年的 69%以上.7 月份之前降水少,径流输出量低,各农药输出值极低,7 月份出现输出量的峰值,之后输出量开始波动降低.

4.4 从空间上来看,Atrazine 的输出量以东部上游地区和中部地区为主,流域出口处的 Atrazine 输出量居中.DEA 和 DIA 的输出量的空间分布相似,以下游流域出口处和中部地区为主.

4.5 针对泗河流域农药污染及迁移的控制,可以从以下方面着手:严禁毁坏河道,河道越长,农药输出路径越长,有利于促进农药的降解;农药的施用要注意天气的变化,避免施用农药后遭遇强降水天气,加速农药的径流迁移;农业种植过程中尽量提高施用效率,减少农药的施用.

参考文献:

- [1] 王淑梅.化肥农药对农田的负面影响及预防措施 [J]. 吉林农业, 2012,(9):126.
- [2] Sun X, Zhou Q, Ren W. Herbicide occurrence in riparian soils and its transporting risk in the Songhua River Basin, China [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013,33(4):777-785.
- [3] Papadakis E N, Tsaboula A, Kotopoulou A, et al. Pesticides in the surface waters of Lake Vistonis Basin, Greece: Occurrence and environmental risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2015,536(3):793-802.
- [4] Sun X, Zhou Q, Wang Y, et al. Influence of hydro-geomorphology, land-use and riparian zone characteristics on herbicide occurrence and distribution in sediments in Songhua River Basin, northeastern China [J]. Geoderma, 2013,193-194(2):156-164.
- [5] Li Q, Luo Y, Song J, et al. Risk assessment of atrazine polluted farmland and drinking water: A case study [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2007,78(3/4):187-190.
- [6] 成海容,林 田,王祖武.青岛大气中有机氯农药(OCPs)的初步研究 [J]. 地球化学, 2012,41(6):569-575.
- [7] 丁中原,毛满萱,马子龙,等.河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 [J]. 环境科学, 2013,34(4):1258-1263.
- [8] 马子龙,毛满萱,丁中原,等.新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 [J]. 环境科学, 2013, 34(3):1120-1128.
- [9] Jablonowski N D, Schaeffer A, Burauel P. Still present after all these years: persistence plus potential toxicity raise questions about the use

- of atrazine [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2011,18(2):328–331.
- [10] Svorc L, Rievaj M, Bustin D. Green electrochemical sensor for environmental monitoring of pesticides: Determination of atrazine in river waters using a boron-doped diamond electrode [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013,181(5):294–300.
- [11] Amaral B D, Araujo J A D, Peralta-Zamora P G, et al. Simultaneous determination of atrazine and metabolites (DIA and DEA) in natural water by multivariate electronic spectroscopy [J]. *Microchemical Journal*, 2014,117(21):262–267.
- [12] Barchanska H, Sajdak M, Szczypka K, et al. Atrazine, triketone herbicides, and their degradation products in sediment, soil and surface water samples in Poland [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017,24(1):644–658.
- [13] 郭洪伟,孙小银,廉丽姝,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应 [J]. *应用生态学报*, 2016,27(9):2899–2906.
- [14] 孙小银,郭洪伟,廉丽姝,等.南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2017,32(4):669–679.
- [15] 刘继军,张振成,张 健.泗河流域径流泥沙分析 [J]. *治淮*, 2015,(1):11.
- [16] 马 放,姜晓峰,王 立,等.基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(2):610–618.
- [17] 耿润哲,王晓燕,庞树江,等.潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(4):1258–1267.
- [18] 陈 丹,张 冰,曾逸凡,等.基于 SWAT 模型的青山湖流域氮污染时空分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(4):1216–1222.
- [19] 李 丹,郭亚萍,焦裕飞,等.泗河流域径流特征与演变规律研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2016,(10):91–94.
- [20] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Soil database of 1:1,000,000 digital soil survey and reference system of the chinese genetic soil classification system [J]. *Soil Survey Horizons*, 2004,45(4):129–136.
- [21] 杨 梅,马永安,林忠胜,等.环境水体中三嗪和酰胺类除草剂的固相萃取/气相色谱-质谱测定 [J]. *分析测试学报*, 2008,27(1):38–41.
- [22] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the Asabe*, 2012,55(4):1345–1352.
- [23] Dennedy-Frank P J, Muenich R L, Chaubey I, et al. Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,177:331–340.
- [24] Boithias L, Sauvage S, Jean S, et al. Modeling pesticide fluxes during highflow events in an intensive agricultural catchment: the Save River (Southwestern France) case study [C]. *International Swat Conference*, 2011.
- [25] Shrestha M K, Recknagel F, Frizenschaf J, et al. Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi-arid Onkaparinga catchment in South Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 2016,175:61–71.
- [26] Fukunaga D C, Cecilio R A, Zanetti S S, et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil [J]. *Catena*, 2015,125(2):206–213.
- [27] 谢媛媛.SWAT 模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究 [J]. *水土保持研究*, 2012,19(4):204–206.
- [28] Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, et al. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria [J]. *Transactions of the Asabe*, 2015,58(6):1763–1785.
- [29] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the Asabe*, 2007,50(3):885–900.
- [30] Bannwarth M A, Sangchan W, Hugenschmidt C, et al. Pesticide transport simulation in a tropical catchment by SWAT [J]. *Environmental Pollution*, 2014,191:70–79.
- [31] Holvoet K, Griensven A V, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT [J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c*, 2005,30(8–10):518–526.
- [32] Oliver D P, Kookana R S, Salama R B, et al. Land use effects on sorption of pesticides and their metabolites in sandy soils. I. Fenamiphos and two metabolites, fenamiphos sulfoxide and fenamiphos sulfone, and fenarimol and azinphos methyl [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003,41(5):847–860.
- [33] Geng Y, Jing M A, Jia R, et al. Impact of long-term atrazine use on groundwater safety in Jilin Province, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013,12(2):305–313.
- [34] Amadori M F, Cordeiro G A, Rebouças C C, et al. Extraction method for the determination of atrazine, deethylatrazine, and deisopropylatrazine in agricultural soil using factorial design [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2013,24(3):483–491.
- [35] 郭志勇.自然水体中多种固相物质对有机氯农药的吸附特征研究 [D]. 长春:吉林大学, 2010.
- [36] 王 莹.大凌河口地区有机氯农药污染特征研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2013.

作者简介: 徐 燕(1992-),女,安徽舒城人,曲阜师范大学硕士研究生,主要从事 GIS 与流域生态服务模拟研究.发表论文 3 篇.