

# 基于 SWAT 模型的枣阳市滚河流域 非点源污染模拟与控制研究

徐畅<sup>1</sup>, 彭虹<sup>2</sup>, 夏晶晶<sup>3</sup>

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学  
国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 枣阳市滚河流域畜禽养殖污粪和生活污水散乱排放, 非点源污染严重, 砦湾控制断面水质严重超标。基于实测水文水质数据, 通过污染源计算和水质现状评价确定了流域水环境问题, 以 SWAT 模型为基础, 构建了枣阳滚河流域非点源污染模型, 并对其进行参数率定与模型验证, 模拟了 2013-2015 年流域 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 负荷以及砦湾断面的水质变化情况。结果表明: 2015 年枣阳市 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 负荷分别为 49842.92 和 6681.08 t, 研究区以非点源污染负荷为主, 其中, 畜禽养殖污染所占比例最大, COD 和 NH<sub>3</sub>-N 对流域总负荷的贡献率为 45.62% 和 35.68%, 城镇和农村生活污水其次, 种植业污染负荷较低。为此, 提出了以非点源污染控制为主的流域水体污染物排放总量控制措施和负荷削减方案, 并对各削减方案实施效果进行了模拟。

**关键词:** SWAT 模型; 非点源污染; 总量控制; 负荷削减; 滚河流域

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0063-08

## Simulation and control of non-point source pollution based on SWAT model in Gun River Basin of Zaoyang City

XU Chang<sup>1</sup>, PENG Hong<sup>2</sup>, XIA Jingjing<sup>3</sup>

(1. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 2. State Key Laboratory of  
Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of  
Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The manure and domestic sewage of livestock and poultry breeding in the Gun river basin of Zaoyang City are scattered and discharged, and the non-point source pollution are serious. The water quality of the Juwan Control Section was seriously polluted. Using the measured hydrological and water quality data, the water environmental problems of the basin were determined by the calculation of pollution source and water quality status. Based on SWAT model, the non-point source pollution model was constructed, and its parameters were calibrated and validated. The COD and NH<sub>3</sub>-N loads of the basin and the water qualitative change of the Juwan section were simulated in 2013-2015. The results showed that the COD and NH<sub>3</sub>-N loads of Zaoyang City in 2015 were 49842.92 t and 6681.08 t, respectively. The study area was dominated by non-point source pollution loads, of which livestock and poultry farming accounted for the largest proportion. The contribution rate of total watershed load was 45.62% and 35.68%, for COD and NH<sub>3</sub>-N, respectively, followed by urban and rural domestic sewage, and the pollution load of planting industry is low. Therefore, the total amount control measures and load reduction schemes of pollutant discharge in river basins, which were mainly controlled by non-point source pollution, were put forward, and the implementation effects of these schemes were simulated.

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-11-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07503-001)

作者简介: 徐畅(1994-), 男, 湖北潜江人, 硕士, 助理工程师, 主要从事流域水环境规划管理研究。

通讯作者: 彭虹(1966-), 女, 四川绵阳人, 博士, 教授, 主要从事水生态环境保护、水环境管理和水资源优化配置等方面研究。

**Key words:** SWAT model; non-point source pollution; total pollutant control; load reduction; Gun River Basin

## 1 研究背景

《第一次全国污染源普查公报》指出,在我国大部分流域非点源污染已超过点源污染,成为地表水体主要的污染源。2016年,国务院印发了《“十三五”生态环境保护规划》,强调加快水污染防治,实施流域环境综合治理,同时要求到2020年,COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放总量要削减10%以上。对于水环境问题较为严重的区域,亟需制定合理有效的负荷削减方案,严格执行总量控制目标,确保水质达标。作为鄂西北乃至中部地区的畜禽养殖主要产区,枣阳市随着社会经济与人口的增长,城镇化、工业化加速推进,非点源负荷不断增加,但污染治理设施相对落后、法律法规和相关政策不够完善,流域水环境严重恶化<sup>[1]</sup>。因此,对滚河流域开展以非点源污染为主的污染负荷模拟与控制研究意义重大。

目前,还未有学者针对枣阳滚河流域进行非点源污染研究,该区域相关研究多以汉江中上游流域为对象,流域尺度较大,对于中小河流的针对性不强。本文对于枣阳市滚河流域的研究可为鄂西北和中部缺水地区的中小河流域非点源污染研究提供借鉴。

由美国农业部水土保持局研发的SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型对流域非点源污染负荷的模拟起到重要支撑作用<sup>[2-4]</sup>。近年来,SWAT模型被广泛应用于非点源污染负荷计算和流域管理措施对水环境影响等方面研究<sup>[5-9]</sup>。国外学者Mekonnen等<sup>[10]</sup>将SWAT模型应用于加拿大寒冷草原气候地区的Assiniboine River流域,模拟了各类水土流失防治措施对于流域出口沉积物和营养物质输出的影响;Kerr等<sup>[11]</sup>应用SWAT模型模拟了北美五大湖(the Great Lakes)流域的面源污染,同时对多种解决湖泊富营养化问题的投资措施所带来的环境影响进行了评估。在国内,姜德娟等<sup>[12]</sup>运用SWAT模型模拟分析了小清河流域总氮负荷的时空分布特征,针对污染源甄别结果,提出了污染物总量控制措施;徐华山等<sup>[13]</sup>在漳卫南运河流域应用SWAT模型对不同流域最佳管理措施(BMPs)进行模拟,核算了各种BMPs对流域内优先控制子流域的有机氮、有机磷等污染物的控制效果;石雯倩<sup>[14]</sup>以不同污染源类型和土地利用类型对出口断面水质的影响为依据,结合流域水体污染物总量控制目标,采用SWAT

模型对各类水质控制方案的实施效果进行了模拟预测。大量研究表明,SWAT模型能准确模拟流域非点源污染的产生和迁移转化过程,同时也能应用于各类管理措施对流域非点源污染负荷削减、水质改善和水环境保护措施的实施效果模拟预测研究。

## 2 研究区域概况

### 2.1 流域概况

枣阳市地处湖北省西北部,全市面积3277 $\text{km}^2$ ,下辖12个乡镇和两个街道,全市多年平均降雨量约为723.1mm,年最大降雨量为1255mm,雨期集中在4-9月,其中6-8月降雨最为集中,占全年的47.8%;年平均蒸发量为1751.0mm,年平均相对湿度72%,平均气温15.4 $^{\circ}\text{C}$ 。滚河流域位于大洪山与桐柏山之间的马鞍形区域,东西横跨随州、枣阳和襄阳3个县级行政区。滚河是枣阳市境内最大的河流,流域总面积为2824 $\text{km}^2$ ,总体呈扇形(图1)。滚河较大的支流有沙河、优良河和熊河等,流域内分布着南城街道、环城街道和王城、琚湾等十余个乡镇。滚河干流在枣阳市境内全长146km,流域面积为2317 $\text{km}^2$ ,占全市总面积的70%,琚湾断面多年平均流量为16.09 $\text{m}^3/\text{s}$ ,年均径流量约为5.08 $\times 10^8\text{m}^3$ 。

枣阳滚河流域地处十堰市-武汉市汽车工业走廊的中心地带,是湖北省经济发展“金三角”黄金地带和重点发展地区之一,2016年,全市总人口114.07 $\times 10^4$ 人,地区生产总值562.4 $\times 10^8$ 元。流域内工业以食品加工、汽车配件、建筑材料和轻工纺织为主;同时,枣阳市也是我国重要的粮、棉、油生产大市,畜禽养殖业是枣阳市的一大支柱产业。2015年以来,受到工、农业等人类生产活动的影响,滚河流域水环境污染严重,主要污染物COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 严重超标。

### 2.2 控制断面水质分析

依照《湖北省地表水环境功能区类别》和《襄樊市水功能区划》,确定研究区域内枣阳市滚河水系即琚湾出境断面上游滚河水系属于滚河枣阳~襄阳保留区,水质目标为III类。根据枣阳市环保局提供的水质(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总磷)资料,采用单因子评价法对滚河琚湾断面2013-2016年水质资料按地表水III类标准进行评价,评价结果见表1。

根据表1中滚河琚湾断面2013-2016年水质

评价结果, 据湾断面水质在 2013 年水质为 III 类, 符合考核标准, 自 2014 年起水质呈现逐步恶化趋势, 年均水质达到 IV 类水质, 2015 年水质恶化严重, 突

破劣 V 类, 2016 年水质有所好转, 全年平均水质为 IV 类。滚河据湾断面的主要超标因子为 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 总磷水质情况相对较好, 超标率较低。

表 1 2013 - 2016 年滚河据湾断面全年水质评价一览表

水质指标	参数	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
COD	年平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	17.83	19.42	34.87	23.05
	超标率/%	8	8	67	42
$\text{NH}_3\text{-N}$	年平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.65	1.15	2.04	1.70
	超标率/%	0	17	58	33
总磷	年平均浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.14	0.17	0.24	0.19
	超标率/%	0	8	25	17
评价结果	水质类别	III 类	IV 类	劣 V 类	V 类

### 2.3 污染源调查与计算

根据襄阳市污染源普查资料和枣阳市环保局提供的基础数据, 按照污染物入河量计算方法<sup>[14-15]</sup>, 分点源和非点源统计和核算 2015 年研究区域污染物负荷。其中点源污染包括流域内所有的工业排污口和城区唯一的污水处理厂, 该污水处理厂主要收集处理枣阳市城区两个街道的生活污水; 非点源污染主要分为城镇生活污水、农村生活污水、畜禽养殖污染物和种植业非点源污染。研究区域各乡镇(街道)各类污染物入河量计算结果见表 2 和 3。

2015 年枣阳市 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷排放量为分别为 49842.92 和 6681.08 t, 区域内污染负荷以非点源污染为主, 点源排放仅占 4% 左右; 非点源污染负荷中, 畜禽养殖污染所占比例最大, COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  分别占 45.3% 和 39%, 城镇和农村生活污水合计 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  贡献率分别为 47.31% 和 42.90%, 种植业污染负荷较低。

## 3 流域非点源污染模型

### 3.1 模型构建

以 SWAT 模型为基础构建枣阳滚河流域非点源污染模型, 模型数据库由空间数据和属性数据组成, 空间数据包括数字高程模型 DEM 数据(图 2)、土地利用类型图(图 3)和土壤类型图(图 4); 属性数据包括气象数据、土地利用属性数据、土壤属性数据、点源数据和附加非点源数据。实测水文和水质数据主要用于模型率定验证。研究区域各类型数据参数见表 4。

SWAT 模型中, 子流域由流域 DEM 数据自动划分, 通过设置土地利用类型、土壤类型、坡度的阈值

将子流域进一步划分为更小的水文响应单元(HRU), 每个 HRU 具有相同的植被类型、土壤条件和坡度。将滚河流域水系图图层与 SWAT 模型子流域划分中生成的子流域(Subbasin)图层中的河网叠加对比, 调整子流域划分个数, 以保证模型生成河网与实际水系密度基本一致, 能反映真实河网水系特征<sup>[3]</sup>, 本次研究将枣阳市滚河流域共划分为 43 个子流域和 282 个 HRU, 见图 5。

表 2 2015 年研究区域点源污染源污染负荷 t/a

乡镇	工业污水		污水处理厂	
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$
南城街道	205.8	25.6	1300	170
环城街道	399.5	49.8		
兴隆镇	47.8	5.3		
吴店镇	8.4	0.9		
总计	661.4	81.6	1300	170

枣阳市滚河流域的点源污染主要包括工业点源和城镇生活污水处理厂, 经由 SWAT 模型“Point source discharge”界面添加, 包括点源污染的排放模式、污水量、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  等各类污染物排放量。

附加非点源主要来源于城镇和农村生活污水排放、分散畜禽养殖污水排放及农业化肥。SWAT 模型中子流域依照流域地形坡度自然划分, 非点源负荷数据以乡镇行政区划为基本单元进行统计和计算, 附加非点源输入模型时, 需要将以乡镇行政区为单元计算的非点源负荷与模型内子流域(subbasin)和水文响应单元(HRU)进行耦合, 进行权重分配后, 得出各子流域和 HUR 非点源负荷。

表3 2015年研究区域非点源污染源污染负荷

t/a

乡镇	城镇生活		农村生活		畜禽养殖		种植业	
	COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N
南城街道	398.4	44.7	831.9	112.8	75.0	7.9	150.6	36.6
环城街道	352.6	39.6	736.2	99.8	4976.4	521.7	184.1	43.8
砦湾镇	1315.9	147.6	824.4	111.8	835.4	87.6	263.1	65.8
七方镇	1603.3	179.8	1004.4	136.2	4043.4	423.9	430.9	95.8
杨埝镇	1163.2	130.5	728.7	98.8	921.5	96.6	217.6	58.8
太平镇	1573.1	176.4	985.4	133.6	1535.5	161.0	279.9	72.0
新市镇	877.3	98.4	549.6	74.5	1039.0	108.9	132.1	36.7
鹿头镇	1075.4	120.6	673.7	91.4	1727.7	181.1	166.6	40.6
刘升镇	574.8	64.5	360.1	48.8	1347.3	141.2	155.6	37.5
兴隆镇	937.8	105.2	587.5	79.7	1624.2	170.3	200.6	47.8
王城镇	754.8	84.7	472.8	64.1	981.9	102.9	157.8	40.5
吴店镇	1467.2	164.6	919.1	124.6	928.2	97.3	251.7	63.9
熊集镇	756.3	84.8	473.8	64.2	1906.8	199.9	169.0	43.7
平林镇	468.9	52.6	293.7	39.8	871.6	91.4	100.1	27.8
总计	13318.9	1493.9	9441.3	1280.2	22813.9	2391.5	2859.7	711.1

表4 模型数据库数据类型及说明

数据层名称	类型	数据说明	数据来源
DEM	栅格	30m×30m、高程、坡度	地理空间数据云
土壤类型图	栅格	1:100万、土壤类型和分布	中国科学院南京土壤研究所
土地利用图	栅格	1:50万、土地种类、空间分布	地球系统科学数据共享平台
气象数据	DBF/txt	气象站点降雨、气温、风速等	中国气象科学数据共享中心
水文水质数据	属性数据	逐日径流、月COD和NH <sub>3</sub> -N浓度	枣阳市环保局
点源/附加非点源	属性数据	污水、COD和NH <sub>3</sub> -N排放量	枣阳市环保局

### 3.2 模型适用性评价

采用LH-OAT方法,分别以日和月为尺度,对与径流和非点源污染有关的参数进行敏感性分析。选择SWAT-CUP软件以及连续不确定性匹配算法SUFI-2对上述敏感性参数进行率定及验证。结果显示,对径流量的敏感性参数包括CN2(径流曲线系数)、ALPHA\_BF(基流 $\alpha$ 系数)、GW\_DELAY(地下水滞后系数)、ES-CO(土壤蒸发补偿系数)、GW\_REVP(浅层地下水再蒸发系数)等,对氮负荷的敏感性参数包括RCN(雨水中硝酸盐含量)、SOL\_ORGN(土壤有机氮的初始浓度)、SHALLST\_N(浅层含水层中的硝酸盐含量)和CDN(反硝化作用速率系数)等。

选取滚河砦湾站作为控制断面进行模型校准,径流量的率定期为2005-2011年,验证期为2012-2015年;水质的率定期为2013-2014年,验证期

为2015年。由于缺乏泥沙实测数据,故无泥沙校准。选择确定性系数 $R^2$ 和Nash-Sutcliffe效率系数 $E_{ns}$ 评价模型率定和验证的精度。确定性系数是模拟值与实测值之间变化关系密切程度的反映, $R^2$ 越接近1,实测值与模拟值之间的吻合程度越高;Nash效率系数是模型模拟值与实测值之间拟合程度的反映,当 $E_{ns}$ 大于0.5表明模拟结果在可接受范围内<sup>[17-18]</sup>。

模型对径流量和水质的模拟效果如图6~8所示,模型对径流量的模拟效果较好,率定期和验证期的 $R^2$ 和 $E_{ns}$ 均大于0.65;模拟水质浓度与实测水质资料吻合情况相对较好,在年际变化趋势和个别峰值上与实测资料基本符合,可用于流域污染负荷的模拟应用,滚河砦湾站日径流量和水质率定验证结果见表5。



图1 枣阳市滚河流域地理位置

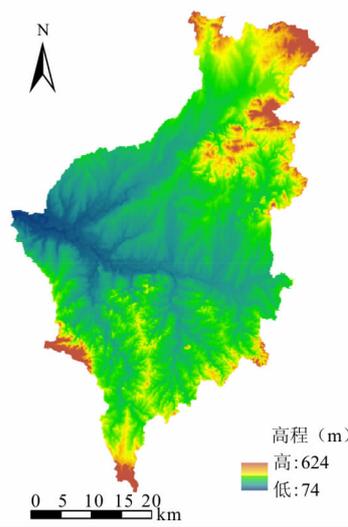


图2 研究区DEM影像图

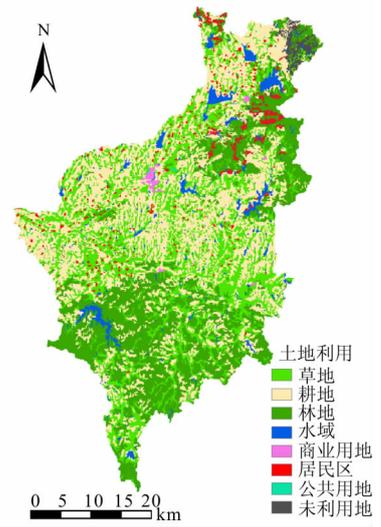


图3 研究区土地利用类型空间分布图

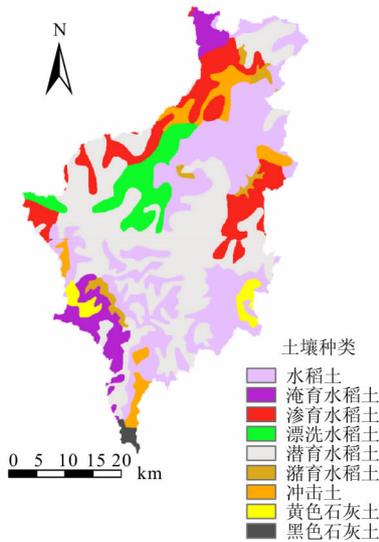


图4 研究区土壤种类空间分布图



图5 枣阳滚河流域子流域划分图

## 4 结果与讨论

### 4.1 总量控制措施

针对研究区域污染负荷的组成结构,流域 COD 负荷的主要来源是畜禽养殖业以及城镇生活和农村生活污水,合计占流域总 COD 负荷的 92.94%;流域 NH<sub>3</sub>-N 负荷的主要来源是畜禽养殖业、城镇生活和农村生活污水以及种植业,合计占流域总 NH<sub>3</sub>-N 负荷的 98.66%;而工业污染源负荷占比不足 2%。枣阳市工业污染负荷较小,且工业园区污水接管率和工业污水达标处理率均较高,工业污染不是流域的主要污染源,故总量控制措施以控制畜禽养殖业、城镇和农村生活污水以及种植业面源污染为主。

主要控制措施包括:

(1)新建乡镇污水处理厂和已有污水处理厂的提标改造,同时扩建污水收集配套管网,提升生活污水收集处理能力。对枣阳市城区王湾污水处理厂进行提标改造,扩建污水收集管网,将污水收集率提升至 95% 以上,污水排放标准提升至《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918 - 2002) 一级 A 标准;新建 7 个乡镇污水处理厂,设计处理规模共 64 000 m<sup>3</sup>/d,合计配套管网 160.2 km。

(2)沿河道划分沙河、滚河河道两岸 1 000 m 范围内为禁养区,在滚河、沙河两岸 1 000 ~ 3 000 m 范围内为限养区,主要交通要道两侧 500 m 和人口聚集区域周边 1 000 m 为禁养区。根据所划分的禁养区和限养区,全市共关闭或整改养殖场(小区)195

家。引导畜禽养殖场合理规划,因地制宜,推进养殖场粪污处理,完成治污设施建设。

(3)开展滚河和沙河水系河道整治与生态修复工程,对河岸沿线的植被土壤进行生态修复。在沙河城区段及上游的梯级水坝区域、污水处理厂排水口-彩虹桥河段、枣阳市乡镇范围的乡镇排污沟、滚河和沙河交汇处-滚河观音寺断面等区域,开展生态治理工程。

同时推进工业集聚区污染集中治理、城镇生活垃圾收运及处置,测土配方施肥、减少化肥投入,推行精准对靶、实现农药减量减污等协同措施。

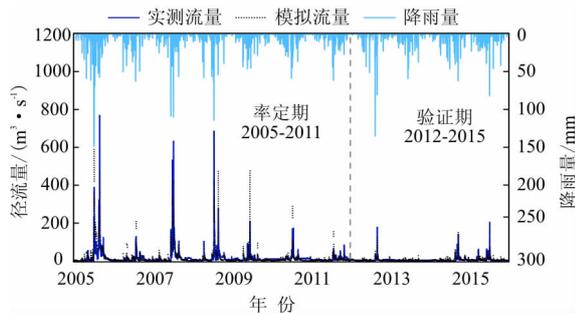


图6 滚河琚湾站径流量实测值与模拟值对照

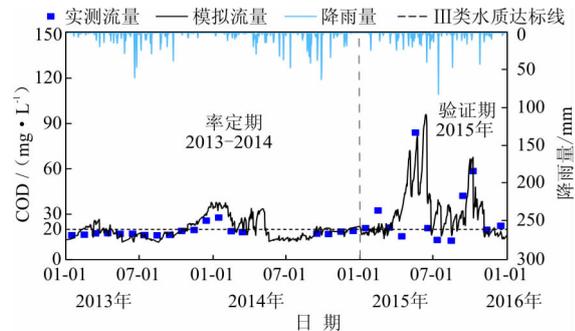


图7 滚河琚湾站 COD 实测值与模拟值对照

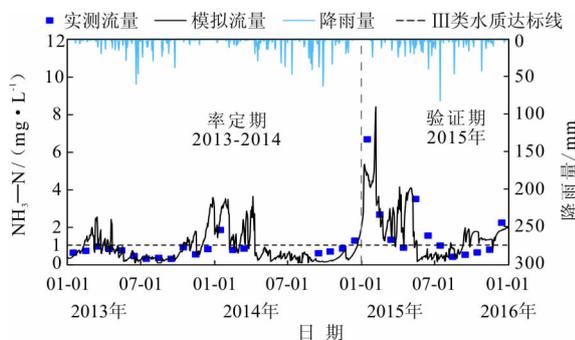


图8 滚河琚湾站 NH<sub>3</sub>-N 实测值与模拟值对照

#### 4.2 负荷削减方案模拟

根据污染负荷计算结果和3类总量控制措施,制定枣阳市滚河流域的负荷削减方案,主要包括:

方案1:只控制生活污染。具体措施为对现有

污水处理厂进行提标扩建,同时在琚湾镇、鹿头镇等6个乡镇建设污水处理厂与配套管网,提升生活污水的集中处理率;

方案2:只控制畜禽养殖污染。具体措施为在划定的限养区和禁养区内关闭和整改相关畜禽养殖场,实施雨污分流、粪便污水资源化利用,同时提升全市所有畜禽养殖场(小区)粪便利用率,完善配套粪污贮存设施;

表5 滚河琚湾站日径流量和水质率定验证结果

指标	时期	$R^2$	$E_{ms}$
径流量	2005-2011 率定期	0.69	0.67
	2012-2015 验证期	0.67	0.65
COD	2013-2014 率定期	0.64	0.63
	2015 验证期	0.61	0.59
NH <sub>3</sub> -N	2013-2014 率定期	0.61	0.59
	2015 验证期	0.58	0.56

注:2014年4-8月滚河琚湾断面长时间断流,故无水文、水质监测数据。

方案3:只开展滚河流域生态修复工程。具体措施为在沙河枣阳城区河段进行河道整治以及坡岸景观改造,在各乡镇主要排污沟两侧建设生态廊道和曝气稳定塘,在沙河和滚河交汇处及下游3 km河道范围内进行河道整治,建设生态湿地;

方案4:同时实施方案1和2;

方案5:同时实施方案1和3;

方案6:同时实施方案2和3;

方案7:同时实施方案1、2和3;

方案8:以2015年全年模拟水质达到地表水质III类标准为前提,倒逼方案1、2、3的实施程度和污染物削减比例。

根据《枣阳市水污染防治行动计划(2016)》,以2016年12月底为截止日期,污水处理厂及配套管道建设和畜禽养殖业污染治理的实际进度来模拟负荷削减的效果。经过与2.3节相同的污染源负荷计算,方案1对于流域内生活面源的削减率为47.56%,削减城镇生活面源54.28%,削减农村生活面源35.67%,对于流域内面源负荷的COD削减比例为23.88%,对NH<sub>3</sub>-N的削减比例为22.56%。方案2对于流域内畜禽养殖面源污染的削减率为36.60%,对于流域内面源负荷的COD削减比例为17.71%,对NH<sub>3</sub>-N的削减比例为14.44%。方案3对于流域面源污染的削减与方案1和2不同,并不是从产生面源污染的源头上控制,而是通过对

于河道和坡岸环境的改造来削减面源污染的入河量,从而降低面源污染对水质的影响。对于方案 3,本研究中采用 SWAT 模型中的过滤带宽度参数(FILTERW)来模拟河道生态修复对面源污染的削减作用,过滤带可减少水土流失(污染物多随泥沙迁移进入水体,过滤带能拦截土壤中本底氮磷养分的流失),植被过滤带的宽度越大,污染物去除率越高<sup>[19-20]</sup>。SWAT 模型中的过滤带算法只拦截泥沙、

杀虫剂和营养物质,不改变地表径流量,同时模型中过滤带不考虑植物配置、形状等因素,过滤带坡度由 DEM 计算,长度根据河道边农田尺寸决定,因此模型设置只考虑过滤带宽度参数(FILTERW)。根据滚河水系的实际情况,综合考虑污染物削减效果与经济效益,确定过滤带宽度为 5 m。

各污染物削减方案模拟结果分别如图 9~14 所示,模拟结果汇总见表 6。

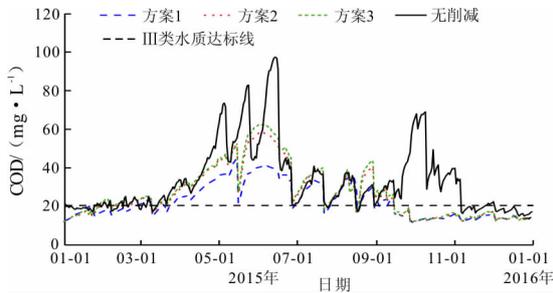


图 9 方案 1、2、3 COD 削减效果模拟

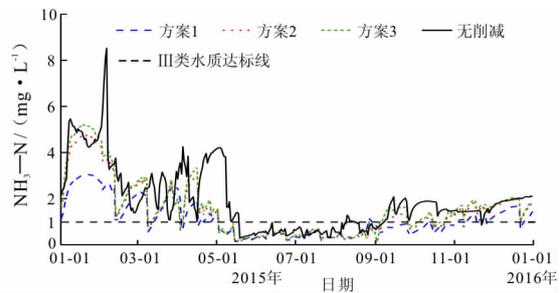


图 10 方案 1、2、3 NH₃-N 削减效果模拟

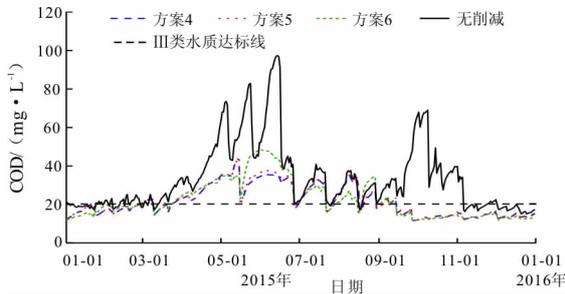


图 11 方案 4、5、6 COD 削减效果模拟

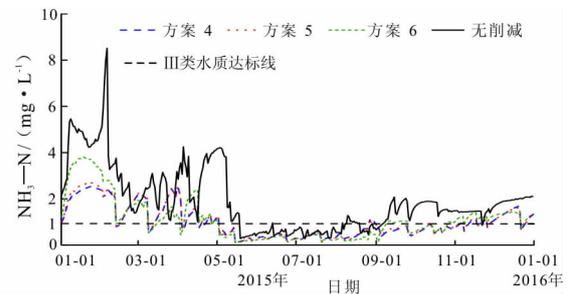


图 12 方案 4、5、6 NH₃-N 削减效果模拟

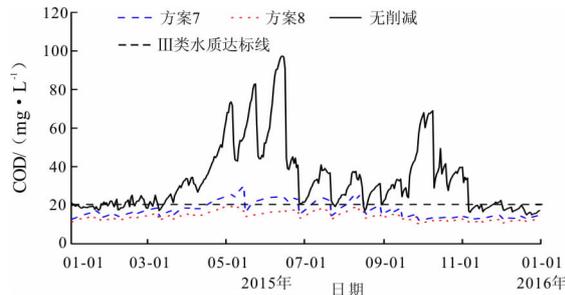


图 13 方案 7、8 COD 削减效果模拟

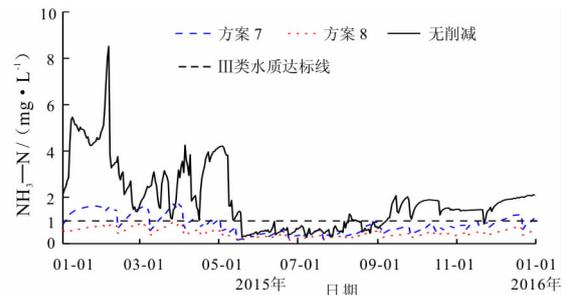


图 14 方案 7、8 NH₃-N 削减效果模拟

表 6 各负荷削减方案模拟结果

方案	控制措施	负荷削减率/%		2015 年水质达标率/%	
		COD	NH <sub>3</sub> -N	COD	NH <sub>3</sub> -N
0	无			32.88	32.32
1	只控制生活污染	23.88	22.56	43.41	46.16
2	只控制畜禽养殖污染	17.71	14.44	41.92	43.29
3	只进行流域生态修复工程	29.39	29.39	47.64	51.19
4	同时实施方案 1 和 2	41.89	37.01	52.88	62.19
5	同时实施方案 1 和 3	46.25	45.32	58.90	63.82
6	同时实施方案 2 和 3	41.90	35.59	53.97	61.77
7	同时实施方案 1、2 和 3	58.76	55.52	70.68	67.67
8	水质达标倒逼方案	82.39	75.69	100.00	100.00

方案8中的方案1设定为污水处理设施全部建设完毕,对流域生活面源的削减率COD为77.55%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为76.16%;对方案2中完成无污染改造的养殖的比例进行调整,由30%~85%依此增大,经过多次调整,全市无污染改造的养殖场比率达到72%时,新方案削减措施控制下,可维持滚河砦湾出境断面全年水质达标。此时方案2对于畜禽养殖污染负荷的削减比例为74.64%,方案8整体对流域面源负荷的削减率COD为82.39%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为75.69%。

对照2016和2017年《襄阳市环境状况公报》,在各项污染控制措施施行后,滚河砦湾断面水质从2016年4月开始逐步好转,自2016年7月起稳定达到III类,与本研究模拟结果相符。

## 5 结论

(1)2015年枣阳市COD负荷量为49 842.92 t, $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷量为6 681.08 t,其中畜禽养殖污染物和生活污水是流域内的主要污染来源。

(2)提出了枣阳市滚河流域污染物排放总量控制的主要措施,包括对原有城镇污水处理系统进行升级改造,同时新建多个乡镇污水处理厂,实现对生活污水的集中处理,污水处理厂全部执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标,对流域生活面源的削减率达到76.16%以上;划定禁养区与限养区,对区域内养殖场进行关闭和整改,同时对所有养殖场实行粪污集中收集处理和利用,85%以上畜禽养殖场实现无污染改造,对流域畜禽养殖污染的削减率可达到86.41%;开展滚河流域水生态系统修复工程,对主要河道进行清淤,改善坡岸环境,在沙河和滚河交汇处及下游区域建设生态湿地,可削减29.39%的流域内非点源负荷入河量。

(3)对各类负荷削减措施进行了模拟,当全市污水处理系统全部建设完毕且对养殖场的无污染改造比例达到72%以上时,对流域非点源负荷的削减率分别为COD 82.39%, $\text{NH}_3\text{-N}$  75.69%,滚河砦湾断面水质全年可达到地表水III类水质标准。

总体来说,流域内散乱排放的生活污水和未经处理的畜禽养殖污染物造成了滚河砦湾断面水质严重超标,对流域生态环境造成了严重的影响。本研究对于流域总量控制措施和负荷削减方案的研究与后续工程措施实际情况相吻合,将为枣阳滚河流域今后的污染防治工作提供依据和支撑。同时水环境容量及污染物排放总量控制是一个理论研究与实

际工作紧密结合的问题,在后续水环境管理工作的实践中,需要加强监测,对理论研究成果不断进行检验和完善。

## 参考文献:

- [1] 张中旺,周萍.基于主成分分析的襄阳市水资源短缺风险评价[J].中国农学通报,2016,32(2):92-98.
- [2] 袁媛,雷晓辉,蒋云钟,等.基于SWAT模型的西江流域径流模拟研究[J].中国农村水利水电,2015(3):14-17+21.
- [3] 陈肖敏,郭平,彭虹,等.子流域划分对SWAT模型模拟结果的影响研究[J].人民长江,2016,47(23):44-49.
- [4] SHI Yingyuan, XU Gaohong, WANG Yonggui, et al. Modelling hydrology and water quality processes in the Pengxi River basin of the Three Gorges Reservoir using the soil and water assessment tool [J]. Agricultural Water Management, 2017,182:24-38.
- [5] 夏军,NGHIA H H,曾思栋.高强度人类活动影响下永定河北京段水质水量模拟[J].水文,2013,33(5):1-6+27.
- [6] WANG Yonggui, ZHANG Wanshun, ENGEL B A, et al. A fast mobile early warning system for water quality emergency risk in ungauged river basins [J]. Environmental Modelling & Software, 2015,73:76-89.
- [7] YASARER L M W, SINNATHAMBY S, STURM B S M. Impacts of biofuel-based land-use change on water quality and sustainability in a Kansas watershed [J]. Agricultural Water Management, 2016,175:4-14.
- [8] 夏函,李斗果,王永桂,等.社会经济发展对三峡澎溪河流域氮磷负荷的影响[J].人民长江,2016,47(22):26-31.
- [9] 赵佳婧,张万顺,王永桂,等.基于较高精度土壤库的三峡水库汇水区径流模拟[J].水土保持研究,2017,24(3):45-52+58.
- [10] MEKONNEN B A, MAZUREK K A, PUTZ G. Modeling of nutrient export and effects of management practices in a cold-climate prairie watershed: Assiniboine River watershed, Canada [J]. Agricultural Water Management, 2016,180:235-251.
- [11] KERR J M, DEPINTO J V, MCGRATH D, et al. Sustainable management of Great Lakes watersheds dominated by agricultural land use [J]. Journal of Great Lakes Research, 2016,42(6):1252-1259.
- [12] 姜德娟,王琼,李瑞泽,等.基于SWAT模型的小清河流域总氮输出模拟研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):1-7.

(下转第80页)

- (质)模型的建立及其研究[J]. 净水技术, 2011, 30(3):78-82.
- [49] 郑祎, 吕金燕, 洪德松, 等. 管网水力模型在城市供水规划中的应用[J]. 山西建筑, 2014, 40(9):134-135.
- [50] LÖWE R, URICH C, DOMINGO N S, et al. Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations - a new generation of urban planning Tools[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550:355-367.
- [51] 李伟, 刘冬梅, 赵博. 河闸泄流特性及对应洪水淹没范围模拟试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(18):96-100+105.
- [52] 侯燕, 马山玉. 基于 MIKE 与 GIS 的城市洪水风险分析及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11):72-76.
- [53] 徐速. 城市雨水管网与地面流的一、二维集成模拟研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9):71-73+77.
- [54] 王文亮, 边静, 李俊奇, 等. 基于模型分析的低影响开发提升城市雨水排水标准案例研究[J]. 净水技术, 2015, 34(4):100-104.
- [55] 曹东卫. 基于 ArcGIS 和 MikeBasin 模型的还乡河流域污染负荷通量估算[J]. 水科学与工程学报, 2015(1):64-67.
- [56] 杜倩, 苗伟波. 基于 Mike Basin 的复杂水库群联合调度模型研究[J]. 人民长江, 2016, 47(4):88-92.
- [57] 莫铠, 李军, 贾鹏. MIKE BASIN 水资源模型对复杂水库调度程序的开发及应用[J]. 水科学与工程学报, 2008(5):24-27.
- [58] 田开迪, 沈冰, 贾宪. MIKE SHE 模型在灞河径流模拟中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):91-95.
- [59] 卢小慧, 李奇龙. 基于 MIKE SHE 模型的流域地下水水文响应[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(1):11-15+20.
- [60] 李静, 焦树林, 梁虹, 等. 基于 MIKE SHE 分布式水文模型的降水时间尺度对喀斯特流域径流模拟的影响研究——以红水河系六硐河流域为例[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4):388-394.

(上接第 70 页)

- [13] 徐华山, 徐宗学, 刘品. 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选[J]. 环境科学, 2013, 34(3):882-891.
- [14] 石雯倩. 汤浦水库流域水质变化及污染物总量控制模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [15] 付意成, 臧文斌, 董飞, 等. 基于 SWAT 模型的浑太河流域农业面源污染物产生量估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):1-8.
- [16] 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. 环境科学, 2018, 39(1):77-88.
- [17] GREEN C H, GRIENSVEN A V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds [J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(4):422-434.
- [18] 姜德娟, 王琼, 李瑞泽, 等. 基于 SWAT 模型的小清河流域总氮输出模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6):1-7.
- [19] 李家科, 杨静媛, 李怀恩, 等. 基于 SWAT 模型的陕西沔河流域非点源污染模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4):11-17.
- [20] 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.
- [21] 高正, 黄介生, 曾文治, 等. 基于 SWAT 模型的清江长阳段非点源污染及其控制方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):174-177.