

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.01

# 基于 SWAT 模型的小清河流域总氮输出模拟研究

姜德娟<sup>1</sup>, 王琼<sup>1,2</sup>, 李瑞泽<sup>1</sup>, 张华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 小清河流域工业和农业发达, 点源和非点源污染均比较严重, 致使河流总氮含量严重超标, 对下游河口及莱州湾的水生态与环境产生了深刻影响。本文基于实测径流和总氮资料, 对小清河流域 SWAT 模型进行了校准和验证, 在此基础上, 模拟和分析了流域 2008-2013 年总氮负荷的时空特征, 并对其污染来源进行了甄别。研究表明: 小清河流域总氮的年输出量与年径流量趋势总体一致, 表现出明显的年际特征, 总氮负荷多年均值为  $38.0 \times 10^3$  t。空间上, 各子流域的总氮输出量均较高, 其中, 位于农业发达的寿光市和章丘市、工业企业较多的邹平县、人口密度大的济南市区等区域的子流域总氮输出量最高。流域总氮负荷主要来自非点源污染源, 其中, 农业施肥引起的氮素流失和畜禽养殖的污水排放对流域总氮输出的贡献分别为 32.5% 和 29.5%, 另外, 工业和城镇污水的氮排放量也较高, 分别占流域总氮输出量的 19.4% 和 16.5%。为此, 须结合点源和非点源污染源对小清河流域氮污染物进行总量控制和削减。

**关键词:** SWAT 模型; 总氮; 点源; 非点源; 小清河流域

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0001-07

## Simulation of total nitrogen transport based on SWAT model in Xiaoqinghe River Basin of Shandong Province

JIANG Dejuan<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1,2</sup>, LI Ruize<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Serious point source and non-point source pollution in Xiaoqinghe River Basin, primarily caused by advanced industries and agriculture, have resulted in the excess of river water total nitrogen, which further have deteriorated the aquatic ecology and environment of Xiaoqinghe Estuary and Laizhou Bay. Based on observed streamflow and total nitrogen data, the SWAT model, established for Xiaoqinghe River Basin, has been calibrated and verified. Then, the spatial and temporal characteristics of total nitrogen load for the period of 2008-2013 have been simulated and analyzed, and the pollution source of total nitrogen has been identified. The results show that accordant with the annual streamflow, the annual total nitrogen load indicates an obvious inter-annual variability with the annual average value of  $38.0 \times 10^3$  t. Spatially, total nitrogen load is relatively high for various sub-basins, among which the highest output in the sub-basins located in Shouguang City and Zhangqiu City with advanced agriculture, Zouping County with many engineering enterprises, Jinan urban district with high population density. The primary source of total nitrogen load is dominated by non-point pollution source. Nitrogen losses from agriculture fertilizer and livestock manure account for 32.5% and 29.5%, respectively of the total nitrogen load. In addition, nitrogen emissions from industries and urban wastewater contribute greatly to the total nitrogen load with the proportion of 19.4% and 16.5%, respectively. Therefore, point and non-point pollution

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-09-01

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院“一三五”规划(烟台海岸带研究所)生态突破项目(Y254021031); 国家自然科学基金项目(41671473)

作者简介: 姜德娟(1979-), 女, 山东日照人, 博士, 副研究员, 主要从事流域水文水环境模拟研究。

通讯作者: 张华(1977-), 男, 河南长葛人, 博士, 研究员, 主要从事海岸带环境水文过程与模拟研究。

source should be overall considered for the total amount control and reduction of total nitrogen in Xiaoqinghe River Basin.

**Key words:** SWAT model; total nitrogen; point source; non-point source; Xiaoqinghe River Basin

## 1 研究背景

2015年4月,国务院印发了《水污染防治行动计划》的通知,强调推动经济结构转型升级,全面控制污染物排放。2015年8月,国务院又印发了《全国海洋主体功能区规划》的通知,指出我国入海河流污染物排放总量大,近岸海域水质恶化趋势没有得到遏制,其中,要求严格控制陆源污染物排放,推进莱州湾污染治理和生态环境修复。据《中国海洋环境质量公报》显示,近年来莱州湾水环境污染形势一直比较严峻,其中,小清河河口周边大范围海域无机氮含量劣于第四类海水水质标准。小清河流域工农业发达,点源和非点源污染均比较严重,河流氮、磷等污染物含量较高,尤其是氮超标严重,是山东省污染最重的流域,成为莱州湾高浓度无机氮的主要陆源污染来源,其携带入海的营养盐等污染物对莱州湾的生态与环境产生重要影响<sup>[1-4]</sup>。因此,定量评价小清河流域的氮污染特征具有重要意义。

目前,已有学者对小清河流域氮污染开展研究,但大多集中在非点源氮的量化研究方面,如李虎等<sup>[5]</sup>基于DNDC模型估算了小清河流域农田氮素淋失潜力,王立刚等<sup>[6]</sup>和高懋芳等<sup>[7]</sup>研究了小清河流域畜禽养殖氮素污染特征,惠二青等<sup>[8]</sup>估算了小清河流域无机氮非点源污染负荷,这些研究均未考虑小清河流域的点源输出及其对河流氮排放的影响。为此,本文将综合考虑点源和非点源污染源,采用SWAT模型对小清河流域氮污染的时空特征进行模拟和分析,并对其主要污染来源进行识别,以便为小清河及莱州湾氮污染物的总量控制和削减提供科学依据和支持。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是20世纪90年代初由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)研制开发的、在SWRRB模型基础上发展起来的流域分布式水文模型<sup>[9]</sup>,可以模拟集水区不同土地利用方式和管理措施对流域径流、泥沙和营养盐负荷量的长期影响<sup>[10]</sup>。其优点包括:易操作,空间分异性好(计算单元为HRU),水循环完整,模型概念清晰,具有很强的物理机制,以日为时间单位进行连续计算,可长时期模拟,水量水质可同时模拟,源代码免费获取等<sup>[11]</sup>。此外,SWAT模型不仅可以对非点源污染进行模拟,而且对受点源

影响较大的河流同样具有较好的模拟效果<sup>[12]</sup>。该模型是目前应用较广、综合性较强的分布式水文模型,在许多国家和地区得到了广泛应用。

## 2 研究区概况

小清河发源于济南西郊睦里闸,流经济南、淄博、滨州、东营和潍坊的5市18县(市、区),最终于寿光市羊口镇汇入渤海的莱州湾,河流全长237 km,具有泄洪、灌溉、养殖、排污等多项功能<sup>[6,13]</sup>。本文中的小清河流域为源头至下游王道闸(潮汐上溯的最顶端)所包含的区域,面积为10 336 km<sup>2</sup>(图1)。小清河流域属暖温带大陆性季风气候,流域降水年际变化大、年内分配不均,多年平均降水量为647 mm,其中70%以上集中在汛期(6-9月)<sup>[6]</sup>。气温年内和年际变化也较大,年均气温在12~14℃之间,空间上整体呈现由东北向西南递增的态势。

小清河流域连接“山东半岛蓝色经济区”、“黄河三角洲高效生态经济区”和“省会城市群经济圈”,工业和农业均比较发达,是山东省重要的作物生产区和经济发展区,在山东省经济社会发展中占据重要地位<sup>[6,14]</sup>。流域内工业以化工、石油加工、建材、纺织、造纸等为主,农业以冬小麦、夏玉米和蔬菜种植为主。截止2010年底,流域生产总值为5 855.6 × 10<sup>8</sup>元,流域总人口数1 136.3 × 10<sup>4</sup>,人口密度为699人/km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。受工农业生产等人类活动的强烈影响,小清河流域水环境污染严重,主要污染物COD和氨氮严重超标,其排放量分别超出环境容量的3.5倍和11.8倍<sup>[15]</sup>。

## 3 SWAT模型

### 3.1 模型数据库构建

SWAT模型输入参数包括空间数据和属性数据两部分<sup>[16]</sup>。空间数据包括DEM、土地利用类型图和土壤类型图。其中,DEM来源于国际科学数据服务平台提供的空间分辨率为90 m × 90 m的SRTM数据。土地利用类型图是基于2005年的Lansat TM/ETM+影像解译获取,空间分辨率为1:10万<sup>[17]</sup>,主要包括耕地、林地、草地、水域、居民点与工业用地、裸地等6个类型(图2)。土壤类型图是通过山东省1:50万土壤类型图矢量化获得,褐土和潮土是流域内的主要土壤类型(图3)。

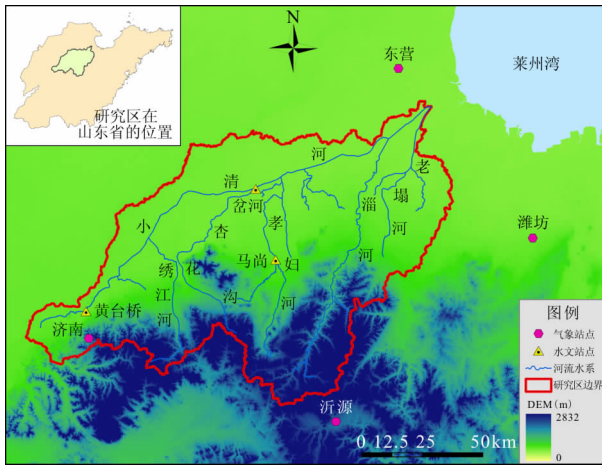


图 1 研究区位置示意图

属性数据主要包括气象数据、土地利用属性数据、土壤属性数据、点源数据、农业管理数据等。其中,气象数据来源于国家气象信息中心,包括 5 个气象站点(惠民、垦利、潍坊、沂源、济南)2003 - 2013 年的逐日降水、最高/最低气温、相对湿度、风速和太阳辐射等要素数据。土地利用属性数据应用 SWAT 模型自带的土地利用属性数据库信息。土壤属性数据包括物理和化学属性信息,主要通过结合山东省第二次土壤普查结果数据<sup>[18]</sup>估算获取。工业和城镇生活点源数据是根据山东省济南、淄博、滨州、东营和潍坊 5 个地市的统计年鉴以及山东省环保厅的《小清河流域污染治理专项规划方案》<sup>[15]</sup>估算得到。农业管理数据包括作物类型、耕作方式和施肥情况等信息,主要来自统计年鉴。

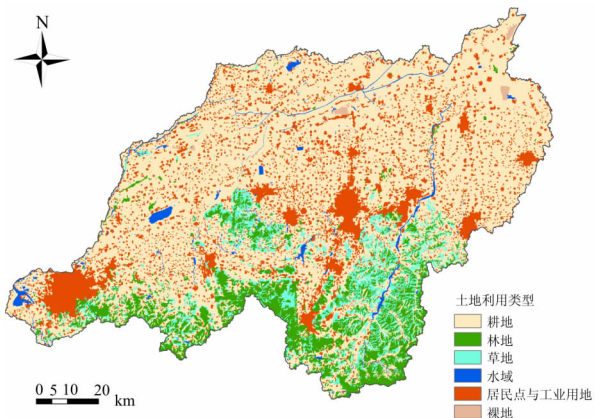


图 2 研究区 2005 年土地利用空间分布图

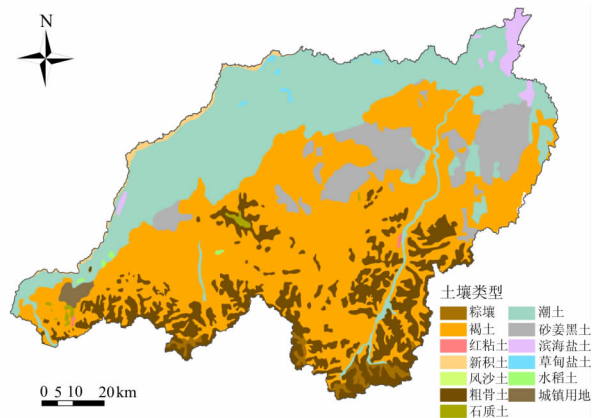


图 3 研究区土壤类型空间分布图

水文水质数据主要用于 SWAT 模型的校准和验证。其中,水文数据包括黄台桥、马尚和岔河 3 个水文站点 2006 - 2008 年的逐日流量数据(黄台桥站 2007 年流量资料缺失),来源于山东省水文局和全国水情信息网。水质资料通过野外实地采样和室内测试分析方法获取,监测时间为 2012 年 6 月 4 - 7 日、2013 年 7 月 16 - 18 日和 2013 年 9 月 25 - 28 日。

### 3.2 模型空间离散化

空间上,SWAT 模型基于 DEM 数据将研究区划分为多个子流域,然后再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空间单元,即水文响应单元(HRU),每个 HRU 具有相同的植被类型、土壤条件和坡度。本文应用 90 m × 90 m 的 DEM 数据将小清河流域划分为 60 个子流域(图 4)和 682 个 HRU。

### 3.3 模型校准和验证

应用 SWAT - CUP 自带的敏感性分析方法对模型参数进行敏感性分析。其中,对径流量敏感的参数

主要包括 CN2、ALPHA \_ BF、ESCO、SOL \_ AWC、GWQMN 等,对氮负荷敏感的参数主要有 NPERCO (氮下渗系数)、RS4(河道内有机氮的迁入系数)、RS-DCO(作物残留系数)、BIOMIX(作物混合有效系数)、USLE\_P(土壤侵蚀中的水土保持措施因子)等。

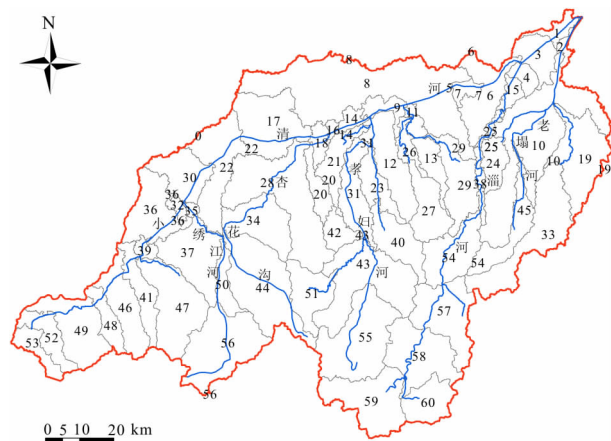


图 4 小清河流域子流域划分图

关于径流量的校准,黄台桥站选取2006年作为校准期,2008年作为验证期,马尚站和岔河站选取2006-2007年作为校准期,2008年作为验证期。本文由于缺少泥沙实测数据,无法校验泥沙。关于氮负荷的校准,因为实测资料较少,所以氮实测数据均用于模型参数率定。应用 Nash-Suttcliffe 效率系数 ( $E_{ns}$ ) 和确定性系数 ( $R^2$ ) 评估模型的模拟结果,其表达式分别为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

式中: $Q_{obs,i}$  为实测流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{sim,i}$  为模拟流量,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_{obs}$  为实测流量平均值,  $m^3/s$ ;  $\bar{Q}_{sim}$  为模拟流量平均值,  $m^3/s$ ;  $i$  为时间序列,  $d$ ;  $n$  为实测数据个数。当  $E_{ns} = 1$  时,说明模拟效果最好,如果  $E_{ns}$  为负值,说明模拟效果较差。

以往研究通常认为 SWAT 模型对日径流量模拟的评价指标  $E_{ns} > 0.4$ ,  $R^2 > 0.5$ ,其模拟结果是满意的<sup>[19-20]</sup>。由表1可见,SWAT 模型对小清河流域3个水文站点日径流量模拟的  $E_{ns}$  在校准期和验证期均大于0.4,  $R^2$  均大于0.5,说明该模型对研究区径流量的模拟结果是可以接受的。

对照而言,流域源头黄台桥站的模拟结果相对较差,中游岔河站的模拟结果相对较好,  $E_{ns}$  大于0.7,  $R^2$  在0.8左右。图5为3个水文站点日径流量模拟值与实测值的比较,可见,SWAT 模型对汛期径流量的模拟结果相对较好,而对非汛期特别是春季的模拟结果相对不足。

表1 小清河流域3个水文站点日径流量校准和验证结果

站点	时期	$R^2$	$E_{ns}$
黄台桥	校准期(2006年)	0.51	0.44
	验证期(2008年)	0.66	0.50
马尚	校准期(2006-2007年)	0.65	0.51
	验证期(2008年)	0.87	0.65
岔河	校准期(2006-2007年)	0.83	0.77
	验证期(2008年)	0.79	0.78

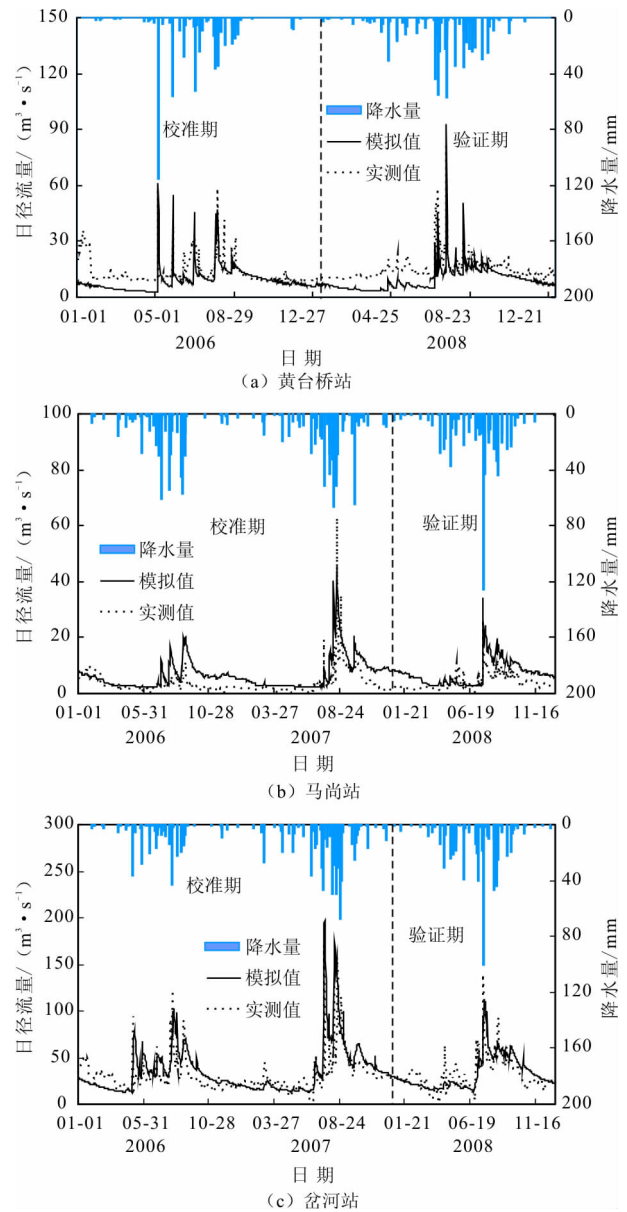


图5 小清河流域3个水文站点日径流量模拟值和实测值比较

图6为岔河和王道闸站总氮实测值与模拟值的比较,总的来说,SWAT 模型对小清河流域总氮的模拟结果基本可以接受。其中,个别月份出现较高或较低的模拟偏差,主要原因可能在于小清河不仅受非点源污染的影响,同时也受工业和城镇污水等点源污染的影响,使得模拟结果存在一定误差。

## 4 结果和讨论

### 4.1 总氮负荷时间变化特征

利用校准后的 SWAT 模型对小清河流域2008-2013年的总氮输出量进行模拟和分析,由图7可见,流域总氮的年输出量为  $30.86 \times 10^3 \sim 43.87 \times 10^3$  t,多年均值为  $38.00 \times 10^3$  t,该数值高于李虎

等<sup>[5]</sup>的计算结果( $23.65 \times 10^3$  t),主要是因为李虎等<sup>[5]</sup>的研究仅估算了农田氮的流失,未考虑畜禽养殖和点源输出等因素。

2008-2013 年期间,小清河流域总氮输出量与年径流量的趋势总体上比较一致,存在上升的态势。径流是流域氮污染物迁移与输出的基本动力条件,

气候条件,特别是降水强度、降水时间、降水分布等因素通过对径流过程的控制作用而影响氮污染物的输移过程<sup>[21]</sup>。

由图 5、7 可见,小清河流域总氮的输出与径流、降水也存在密切关联,说明降水条件和径流过程是研究区氮迁移和输出的重要影响因素。

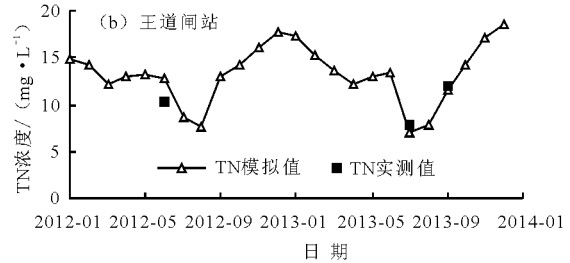
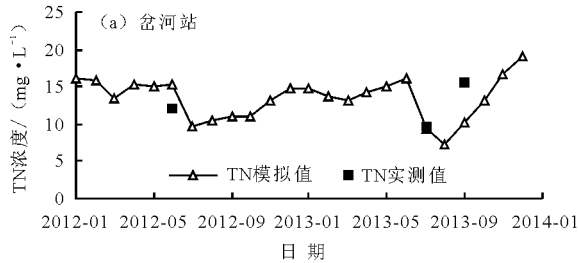


图 6 岔河站和王道闸站均总氮模拟值和实测值比较

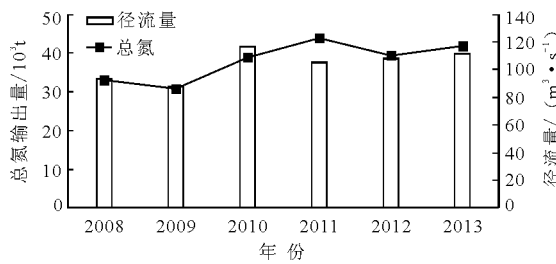


图 7 研究区径流量和总氮负荷量的年际变化

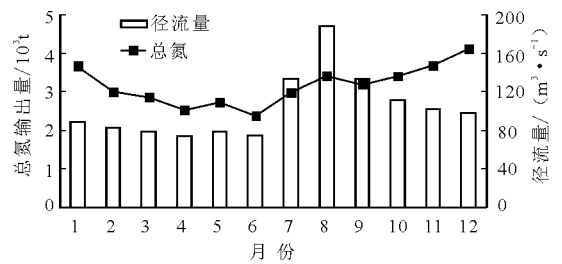


图 8 研究区径流量和总氮负荷量的年内分布

图 8 是多年月均总氮负荷量与径流量的比较,由图 8 可见,径流量和总氮负荷量均存在明显的季节性特征,在降水丰富的 7-9 月,径流量大,氮输出量也相对较高。

然而,从 10 月份开始,总氮输出量并未随径流量的减少而减少,相反出现增加的现象,这是因为总氮负荷量除了受径流季节性的影响外,也受农作物施肥等因素的影响。10 月份是冬小麦的种植季节,播种前会施用大量的氮肥作为底肥,11 月份是作物生长期,通常会追肥一次,这些施肥事件可能导致同时期的氮输出量有所增加。另外,小清河点源污染比较严重,也会影响总氮的输出。而且,地下水也会作为氮污染物输移的载体,携带氮污染物进入河流中<sup>[21-22]</sup>。

4.2 总氮负荷空间分布特征

图 9 为研究区不同子流域总氮负荷量的空间分布图。整体而言,小清河各子流域的总氮输出量均较高,其中,子流域 49、28、8、10 和 19 的总氮输出量最高,超过 2 000 t/a。子流域 49 位于济南市市区,该区域人口密度大,城镇居民生活废水排放量也大,可能导致该区域总氮输出量较高。

子流域 28 位于邹平县,该县工业企业较多、规

模大,加上非点源氮的输入,导致该子流域的氮输出量也较大。子流域 10、19 均位于寿光市,寿光市是我国最大的蔬菜产地,蔬菜种植施用大量化肥导致这些区域的总氮输出量也较高。子流域 8 位于高青县和博兴县,受点源(工业废水排放)和非点源(畜禽养殖等)的共同影响,总氮的输出量也较高。另外,位于章丘市的几个子流域(如 32、44、37、56 等)的总氮输出量也较高,主要是因为章丘市农业发达,农田施肥量高,畜禽养殖规模大<sup>[5-6]</sup>,导致该地区总氮输出量也相对较高。

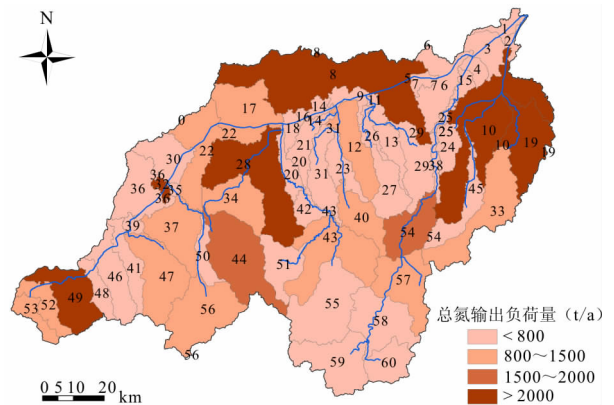


图 9 不同子流域总氮负荷量的空间分布图

### 4.3 总氮负荷来源分析

小清河流域氮污染物来源的类型主要包括环境背景源和人为活动源,环境背景主要指自然环境,如土壤的理化性质、地质地貌、土地利用结构等因素,而人为活动污染源则主要指工农业生产、畜禽养殖和居民生活(农村和城镇)污水排放等。本文通过在 SWAT 模型中模拟有无相应污染源输入时流域出口处总氮排放量来估算小清河流域内不同的人为污染源对流域氮污染的贡献。由图 10 所示,小清河流域总氮输出主要来自非点源污染源,占流域总氮排放量的 64.09%,其中,农业生产引起的化肥流失和畜禽养殖产生的氮素排放分别占流域总氮输出量的 32.5% 和 29.47%。另外,工业和城镇污水排放分别占流域总氮输出量的 19.4% 和 16.5%。

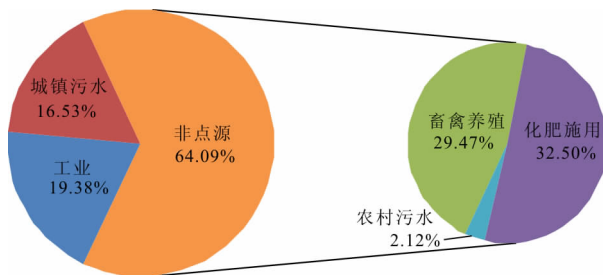


图 10 小清河流域总氮排放量不同污染源贡献百分比

小清河流域农业比较发达,耕地是研究区最主要的土地利用类型,所占流域总面积的比重为 63.7%。农作物种植会向土壤中施加大量化肥,通常超过作物的需求量和吸收量,在降雨或灌溉发生的情况下易导致氮素大量流失。区域上,章丘市和寿光市等地区的施肥量相对最高,甚至超过 1 000 kg/hm<sup>2</sup>[5],远远超出发达国家 225 kg/hm<sup>2</sup> 的安全上限。章丘市是山东省重要的粮食生产基地,寿光市则是我国重要的蔬菜生产基地,因此这些区域的氮输出量也相对较高。另外,小清河流域的畜禽养殖业也很发达,流域内畜禽存栏总量占山东省的 36.6%,其中 80% 的畜禽养殖模式以规模化养殖为主,然而流域内粪便配套设施不完善,畜禽排泄物得不到妥善处理,造成了比较严重的环境污染[7]。其中,小清河流域上游地区(主要为济南市郊、长清、历城和章丘等县)畜禽养殖产生的粪便量最大,约占整个流域的 58%,对流域氮污染起重要作用[6]。

同时,小清河流域的工业也很发达,工业排放的废水量占流域废水排放总量的 39%,其中,淄博市工业废水排放量最大,占全流域工业排放量的 43% (图 11(a))。流域内工业和企业数量多,主要废水

排放企业有 730 多家,前 90 位的企业废水排放量占流域工业废水排放量的 80%,主要的废水排放行业以化学原料及化学制品制造业、造纸及纸制品业、纺织业和食品加工相关行业为主,其废水排放量占工业废水排放量的比例分别为 28%、26%、13% 和 9% [15] (图 11(b))。另外,小清河流域人口多,密度大,生活污水排放量也大,其所占流域废水排放总量的比重达 61%,其中济南市、淄博市的生活污水排放量占流域生活污水排放总量的 80% 以上,是流域内的主要生活污水来源。

总的来说,小清河流域的点源和非点源污染均比较严重,导致小清河大多监测断面氮含量严重超标[3],小清河干流、孝妇河、织女河、猪龙河等河流由于长期受到污染,水生态系统遭到严重损害,进而严重影响了莱州湾的水生态与环境。因此,小清河流域氮污染的综合治理需结合点源和非点源两方面对氮排放进行同步控制。

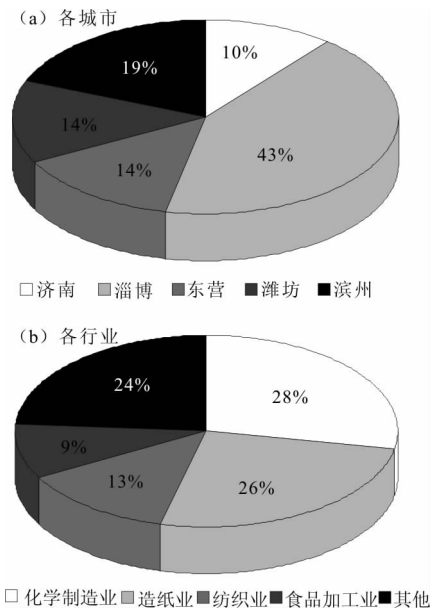


图 11 流域内各市及各行业工业废水排放量比重

## 5 结 论

本研究的主要结论如下:

(1) 小清河流域总氮的年输出量表现出明显的年际特征,其与年径流量的趋势总体一致,多年平均总氮负荷量为  $38.0 \times 10^3$  t。

(2) 空间上,受点源和非点源不同程度的影响,各子流域的总氮输出量均较高,其中,子流域 49、28、8、10 和 19 (主要位于农业发达的寿光市和章丘市、工业企业较多的邹平县、人口密度大的济南市区

等)的总氮输出量最高,超过2 000 t/a。

(3)非点源是流域总氮排放的主要来源(占64.09%),特别是农业施肥引起的氮素流失和畜禽养殖的污水排放,占流域总氮排放量的比重分别为32.5%和29.5%。另外,工业和城镇污水排放占流域总氮排放量的比重分别为19.4%和16.5%。

总的来说,小清河流域工业和农业均比较发达,点源和非点源污染均比较严重,导致河流总氮含量超标严重,对小清河的河流-河口以及莱州湾的水生态与环境产生了严重影响。本研究结果将为小清河和莱州湾氮污染物的总量控制和削减提供科学依据和支持。今后工作将加强对小清河流域观测资料的积累,特别是加强对河流氮排放的监测,并在此基础上,结合小清河水功能区以及莱州湾的水环境容量,开展小清河流域氮污染物总量控制和削减模拟与分析工作。

#### 参考文献:

- [1] 马绍赛,幸福言,崔毅,等. 黄河和小清河主要污染物入海量的估算[J]. 海洋水产研究,2004,25(5):47-51.
- [2] 单志欣,郑振虎,邢红艳,等. 渤海莱州湾的富营养化及其研究[J]. 海洋湖沼通报,2000(2):41-46.
- [3] 王琼,姜德娟,于靖,等. 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(2):137-145.
- [4] Heydebreck F, Tang J H, Xie Z Y, et al. Alternative and legacy perfluoroalkyl substances: differences between European and Chinese river/estuary systems[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8386-8395.
- [5] 李虎,邱建军,高春雨,等. 基于DNDC模型的环渤海典型小流域农田氮素淋失潜力估算[J]. 农业工程学报,2012,28(13):127-134.
- [6] 王立刚,李虎,王迎春,等. 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(5):986-992.
- [7] 高懋芳,邱建军,李长生,等. 应用Manure-DNDC模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报,2012,28(9):183-189+294.
- [8] 惠二青,陈友媛,刘贯群,等. 小清河流域无机氮非点源污染的量化研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(S1):108-113.
- [9] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [10] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型:理论方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [11] 左其亭,王中根. 现代水文学[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- [12] 杨武志,苏保林,罗运祥,等. 点源影响下的SWAT模型非点源负荷核定方法[J]. 水电能源科学,2013,31(3):21-24.
- [13] Zhuang Wen, Gao Xuelu. Assessment of heavy metal impact on sediment quality of the Xiaqinghe estuary in the coastal Laizhou Bay, Bohai Sea: Inconsistency between two commonly used criteria[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(1): 352-357.
- [14] 张琨,张宝雷,冯朝阳,等. 基于复杂网络的小清河流域土地利用/覆被变化研究[J]. 水土保持通报,2013,33(4):81-84.
- [15] 山东省环境保护厅. 小清河流域污染治理专项规划方案[R]. 2012.
- [16] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009[M]. <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. 2011.
- [17] 吴莉,侯西勇,徐新良,等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. 农业工程学报,2013,29(5):207-216+293.
- [18] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1994.
- [19] Green C H, Griensven A V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds[J]. Environmental Modeling & Software, 2008, 23(4): 422-434.
- [20] Green C H, Tomer M D, Luzio M D, et al. Hydrological evaluation of the soil and water assessment tool for a large tile-drained watershed in Iowa[J]. Transactions of the ASABE, 2006,49(2): 413-422.
- [21] 姜德娟,毕晓丽. 流域-河口-近海系统氮、磷营养盐输移研究综述[J]. 水科学进展,2010,21(3):421-429.
- [22] 陶月赞,蒋玲. 地下水补给对河流污染物浓度衰减过程的影响[J]. 水利学报,2008,39(2):245-249.