

# 仿真流域的总氮模拟 ——SPARROW 模型应用方法研究

陈瑜<sup>1</sup>, 刘光逊<sup>1</sup>, 赵越<sup>2</sup>, 王东<sup>2</sup>, 王红艳<sup>1</sup>, 王玉秋<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012)

**摘要:** SPARROW 模型是以非线性回归方程为核心的流域负荷模型, 该模型以流域河网结构为基础, 通过建立污染源、流域空间属性、水质监测数据之间的内在联系, 评估和预测目标流域中不同污染源组成特征对流域水体污染状况的宏观影响。本文应用该模型对构建的中国北方仿真流域进行总氮模拟, 结果显示, 仿真流域中影响总氮污染的主要污染源为农业源(贡献率为 63.7%), 其次为生活源(贡献率为 19.8%)和工业源(贡献率为 16.5%)。

**关键词:** SPARROW 模型; 流域; 总氮; 源解析

中图分类号: TU991.21

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0098-04

## Research on the total nitrogen simulation of imitation watershed by using the SPARROW model

CHEN Yu<sup>1</sup>, LIU Guangxun<sup>1</sup>, ZHAO Yue<sup>2</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, WANG Hongyan<sup>1</sup>, WANG Yuqiu<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Sparrow (spatially referenced regressions on watershed) model is a watershed loading model which consists a kernel of nonlinear regression function. Spatial referencing is accomplished through linking nutrient source, land-surface characteristic, and loading information to a geographically defined river-reach data set. The model evaluated and predicted contaminant flux, concentration in streams and identified important contaminant sources and transport variables over large spatial scales. The mechanics of the model was comprehensively reviewed, and the model was applied to a virtual watershed in northern China for total nitrogen estimation and prediction. The result of SPARROW model indicated that agricultural sources in the watershed contribute 63.7% of total nitrogen, follow by wastewater nitrogen source (19.8%), whereas industrial source is the least contributor of total nitrogen (16.5%).

**Key words:** SPARROW model; watershed; total nitrogen; source resolve

SPARROW (Spatially Referenced Regressions On Watershed attributes) 模型是由美国国家地质调查局 (U. S. Geological Survey) 开发并应用的流域模型, 此模型将流域水环境质量与监测点位所在子流域的空间属性紧密联系起来, 反映大中尺度流域中长期水质状况及揭示主要影响因子。SPARROW 模型主要应用于分析地表水中营养物质、农药和悬浮物等的迁移过程, 可以较为准确地预测和估计营养物质负荷通量, 定量表征上游产生的污染物对流域下游水体的影响等<sup>[1]</sup>。

目前, SPARROW 模型不仅应用于美国全国整体性水质评估工作中<sup>[2]</sup>, 同时还应用于多个重点流域和地区, 如密西西比河流域<sup>[3]</sup>, 新英格兰地区<sup>[4]</sup>, 切萨比克湾流域<sup>[5]</sup>等; 并推广应用于其它国家和地区, 如新西兰的 Waikato River 流域<sup>[6]</sup>、欧洲英国、法国、捷克部分流域等<sup>[7]</sup>。近年来, SPARROW 模型也得到了我国学者的关注<sup>[8]</sup>, 但在我国的应用鲜有报道。本研究旨在建立与我国北方流域相似的仿真流域, 利用 SPARROW 模型进行总氮模拟, 在流域尺度上揭示影响总氮的主要环境因子和环境过程, 表征

收稿日期: 2012-01-18; 修回日期: 2012-03-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目 (2008ZX07631-01-04); 国家环境保护规划专项资助项目 (2010A0080)

作者简介: 陈瑜 (1987-), 女, 湖南浏阳人, 硕士研究生, 主要从事流域地表水环境模型研究。

通讯作者: 王玉秋 (1965-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境管理决策与技术支持, 流域及水源地保护战略等研究。

总氮的传输过程,探索模型应用方法对流域管理的支持作用,为该模型在我国的推广应用做技术储备。

## 1 模型原理

SPARROW 模型以监测数据为因变量,污染源、流域空间属性为自变量,通过非线性方程建立变量之间的联系。图 1 为 SPARROW 模型的结构示意图,来自非点源的污染物经陆域传输过程(landscape transport)进入河段(reach),来自点源的污染物无陆域传输过程而直接进入河段。进入河段后污染物通过水域传输过程(aquatic transport)至河段出口。利用河段出口处的监测数据对模拟方程进行校准,得到模拟方程系数。SPARROW 模型方程基本形式如下:

$$L_i = \sum_{n=1}^N \sum_{j \in J(i)} \beta_n S_{n,j} e^{(-\alpha'Z_j)} e^{(-\delta'T_{i,j})} \quad (1)$$

其中: $L_i$ 为河段  $i$  内的污染物负荷; $n$  为第  $n$  个污染源; $N$  为污染源总数; $J(i)$  为包含河段  $i$  在内的其所有上游河段集; $\beta_n$  为第  $n$  个源的估计参数; $S_{n,j}$  为第  $j$  河段第  $n$  个污染源的污染物质量; $\alpha$  为从陆域传输到水域的估计矢量; $Z_j$  为表征与第  $j$  河段排水有关的地表土地特征; $\delta$  为河道内损失系数的估计矢量; $T_{i,j}$  为河道污染物传输迁移特征。

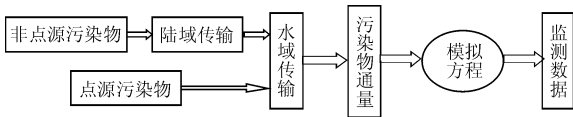


图 1 SPARROW 模型结果示意图

## 2 模型输入

### 2.1 仿真流域介绍

选择与我国北方某流域具有相似河网结构和土

地利用类型的流域作为仿真区域,基于其 DEM 地图并利用 ArcHydro 工具提取流域空间属性相关信息(图 2)<sup>[9]</sup>。该流域由 3 条干流及其各级支流组成,共计 234 条河段。该流域主要由平原和丘陵组成,主要土地利用类型为耕地,林地以及建设用地(图 3)。流域内的主要城市 A、B、C 分别分布在流域出口以及流域中部地区。流域内河流年均流量为  $1.13 \sim 393.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

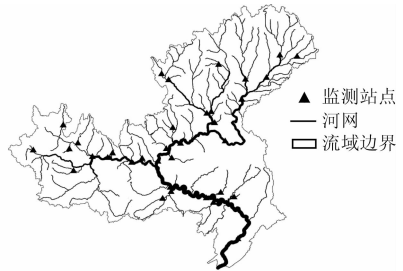


图 2 仿真流域河网及监测点分布图

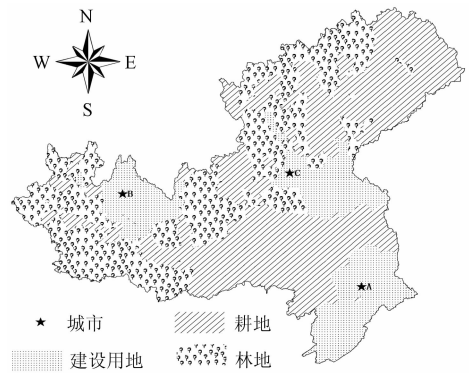


图 3 仿真流域土地利用图

### 2.2 模型输入数据

SPARROW 模型需要河网拓扑数据、空间属性数据、污染源数据、监测数据等 4 类数据(表 1)。

表 1 SPARROW 总氮仿真模拟数据说明

数据类型	数据内容	数据来源
河网拓扑数据	河段长度,子流域面积	DEM 图
空间属性数据	土地利用,土地坡度,河网密度,温度,降水,土壤渗透性(soil permeability)	DEM 图,土壤渗透性参照美国相似土壤类型的数据
总氮污染源数据	工业源,生活源,农业源总氮排放数据	数据量级参考我国国家污染源普查数据量级
监测数据	35 个监测点总氮监测数据	数据量级参考我国北方流域 2008 年总氮监测数据量级

## 3 模型模拟

### 3.1 模型调试

仿真流域总氮 SPARROW 模拟研究选择工业源、生活源、农业源作为备选污染源参数;温度、坡度、降水、河网密度、土壤渗透性等空间属性作为陆域传输备选参数;仿真流域中无湖泊和水库,只考虑

河段衰减,将流域内河段按流量分为 3 级: $\delta_1 (< 21.23 \text{ m}^3/\text{s})$ ,  $\delta_2 (21.23 \sim 169.8 \text{ m}^3/\text{s})$ ,  $\delta_3 (> 169.8 \text{ m}^3/\text{s})$ 。各级流量的河段水力保留时间均作为水域传输备选参数,分别估计各级流量河段的反应速率常数。

依据上述参数构建非线性方程,经过调试、筛选,最终得到拟合精度较高、参数系数较灵敏的模拟

方程。

### 3.2 参数估计结果

经过模型调试,仿真流域总氮模拟  $R^2$  为 0.83。参数估计结果表明总氮 3 个污染源对仿真流域总氮均有显著影响(表 2)。作为点源的工业源系数明显小于 1,说明部分工业源排放去向为模拟河段的下级支流(模型中未模拟的河流),该部分污染物由水域传输至模拟河段过程中存在衰减<sup>[10]</sup>;作为点源的生活源系数略小于 1 说明在管网输送过程中有部分污染物发生了衰减;作为非点源的农业源系数明显大于 1,是由于土壤中的部分氮在雨水冲刷以及地表径流作用下进入地表水,最终进入河流,从而导致实际进入河流的污染物负荷通量偏高。

在 3 个陆域传输系数中,土壤渗透性与总氮负荷成负相关,表明土壤渗透性越强,总氮负荷进入地下水体的量就越大,地表水的总氮负荷就越少<sup>[2]</sup>。河网密度与总氮负荷正相关,说明河网密度大的流域水力传输时间比河网密度小的流域短,总氮衰减率小<sup>[2]</sup>。其中温度显著性相对较低,可能是由于该流域的年平均温度普遍较低,氮的反硝化影响效果不明显,因而温度对总氮负荷的变化影响不显著<sup>[11]</sup>。

河段衰减系数均表现出很高的显著性,且流量越大的河段总氮衰减率越低,这是由于河段中总氮衰减多发生在与河床接触面积大的底层水体中<sup>[2]</sup>,

而流量大的河段底层水体所占的比例相对较少,所以衰减率较低。

表 2 仿真流域总氮 SPARROW 模拟的参数估计结果

模型参数	系数估计值	p 值
总氮污染源( $\beta$ )		
工业源	0.45	0.13
农业源	2.36	0.08
生活源	0.76	0.07
陆域传输系数( $\alpha$ )		
土壤渗透性	-1.10	0.01
温度	0.18	0.69
河网密度	2.91	< 0.005
水域传输系数( $\delta$ )		
$\delta_1$	0.29	0.005
$\delta_2$	0.21	0.005
$\delta_3$	0.12	0.09
$R^2$	0.83	
监测点数	35	

## 4 分析与讨论

### 4.1 仿真流域综合情况

表 3 为仿真流域总氮综合情况。结果表明整个仿真流域总氮浓度水平偏高,总氮污染物主要来自于农业。河段平均水域衰减率大于 50%,说明来自上游河段的污染物比较少,河段污染物主要来自于本地负荷。

表 3 仿真流域总氮综合情况

模拟结果		
水质	总氮平均浓度 2.16 mg/L 达 III 类水( $\leq 1.00$ mg/L)河段占比例 37.4%	达 V 类水( $\leq 2.0$ mg/L)河段占比例 62.6%
污染源结构	工业源占 16.5%	生活源占 19.8% 农业源占 63.7%
水域传输衰减率	平均衰减率为 64%	衰减率 > 50% 的河段占比例为 65% 衰减率 > 75% 的河段比例为 48%

### 4.2 仿真流域污染源解析

图 4~图 6 为仿真流域 3 类污染源对总氮贡献率的分布图。农业源为主要总氮贡献的区域(贡献率大于 50%)分布在仿真流域东北部以及南部干流所在流域,农业源贡献较低的区域(贡献率小于 20%)分布在流域东部、西北部以及流域出口(图 4)。结合仿真流域土地利用情况(图 3),农业源对总氮负荷贡献大的区域覆盖了大部分的耕地和部分林地地区。在这些区域农业源总氮负荷比较大,化肥使用是主要的总氮来源。生活源为主要总氮贡献的区域集中在流域中部城市 B、C 以及流域出口城市 A 地区(图 5),上述城市区域人口比较密集,生活废水是主要的总氮来源。工业源贡献比较大的区域主要分布在人口比较密集的城镇(建设用地区)周

围(图 6)。工业园区和经济开发区的工厂是主要的氮来源。

### 4.3 管理措施评估

基于仿真流域水质模拟结果(表 3),需要对仿真流域拟进行的污染削减措施进行效果预测评估,以期水质在规定时间内达到国家相关水质标准要求。根据污染源贡献率分布图(图 4~图 6),分别选择各污染源负荷较大且该污染源贡献率较高的子流域进行削减策略的情景分析。选择生活源贡献较大的 C 城市所在流域作为目标子流域 1(代表城市区),模拟水质现状为 1.70 mg/L;选择流域东北部农业源负荷大且贡献率高的子流域为目标子流域 2(代表农业区),模拟水质现状为 1.35 mg/L;选择流域西南部工业源负荷大且贡献率高的子流域为目标

子流域 3 (代表工业区),模拟水质现状为 1.61 mg/L;选择流域上游 3 个污染源贡献率较均衡的子流域为目标子流域 4(代表综合区)。对目标子流域采取以下 2 类削减策略:

策略 1:采取统一管理政策,各污染源同步削减,农业源,生活源,工业源总氮均为每 5 年削减 10%;

策略 2:考虑各污染源实际情况,实行有针对性的削减措施,如表 4 所示。

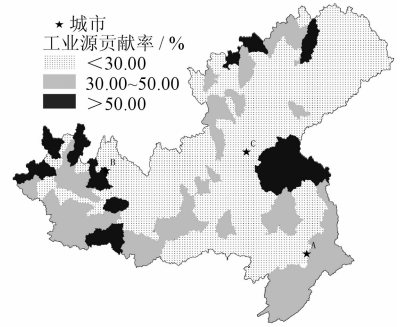
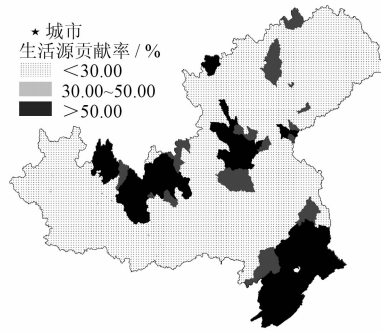
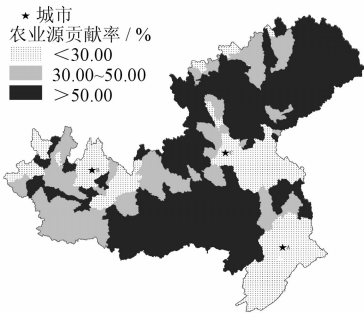


图 4 农业源对总氮负荷贡献率分布

图 5 生活源对总氮负荷贡献率分布

图 6 工业源对总氮负荷贡献率分布

表 4 总氮负荷削减策略 %

时间	2010 - 2015	2015 - 2020	2020 - 2025	2025 - 2030
农业源	10	10	10	10
生活源	20	15	10	5
工业源	15	15	10	10

借助 SPARROW 模型计算,图 7 为执行削减策略 1 后各目标子流域水质预期变化情况。各目标子流域的总氮浓度均稳步下降,农业区和综合区由于其水质现状相对较好,因此到 2030 年可达 III 类水质标准(1 mg/L);而城市区和工业区采取削减策略 1 后到 2030 年水质仍未能达到 III 类水质标准。由于

各污染源是等比例削减,污染源结构并未发生变化。

图 8 为执行削减策略 2 后各目标子流域水质预期变化情况。各目标子流域的总氮浓度下降速率均不相同,到 2030 年基本上均能达到 III 类水质标准。由于各污染源采取的削减比例不同,导致各子流域均发生了污染源结构的变化。以目标子流域 4 为例,图 9 为在执行削减策略 2 后目标子流域 4 的污染源结构变化。

该子流域现状为总氮污染源贡献率以生活源和工业源居多,其次是农业源。执行削减策略 2 后,该子流域各污染源对总氮的贡献率发生了变化。

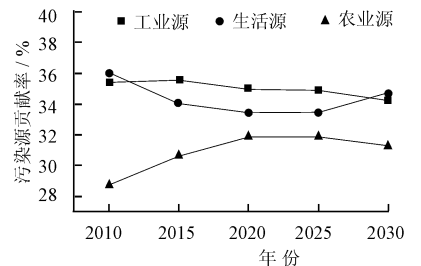
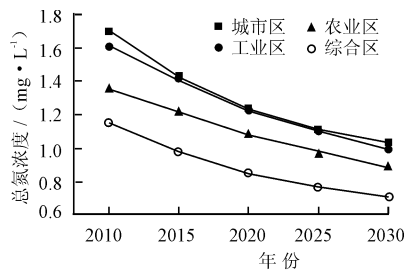
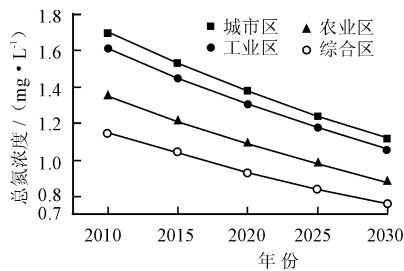


图 7 水质浓度变化(削减策略 1)

图 8 水质浓度变化(削减策略 2)

图 9 污染源结构变化(削减策略 2)

工业源整体呈现下降趋势,生活源贡献率先下降后升高,农业源贡献率上升后略有下降。污染源结构随着削减执行时间处于不断变化中。在流域污染治理时,应该把握流域主要污染源的变化趋势,进行成本效益分析,适时修订削减策略,提高削减效率。

农业源构成,各污染源的贡献率分布与流域土地利用类型分布情况基本吻合;

## 5 结 语

应用 SPARROW 模型对仿真流域进行总氮模拟得到以下结论:

(2) 仿真流域河段中的总氮负荷通量在水域传输过程中损失较大,子流域内部产生的总氮污染是该子流域总氮负荷通量的主要来源;

(3) 不同子流域可能体现出不同的污染源结构特征,应抓住主要污染源进行治理;对各污染源采取有针对性的削减措施可能会改变污染源结构,应及时修订削减方案,以提高削减效率;

(1) 仿真流域总氮污染源由工业源、生活源和

(下转第 106 页)

行了静态吸附实验,并使用五种动力学模型进行模拟,选取最适合油田稠油污水的树脂、最优动力学模型以及确定吸附机理,结果如下:①动力学研究表明,根据两种模型模拟的结果可得,拟二级反应动力学模型更适合模拟树脂对稠油污水的吸附过程。②树脂吸附扩散过程中的吸附速率受粒内扩散和液膜扩散共同控制,但主要受粒内扩散控制。③根据拟一级和拟二级反应动力学模型可知,大孔强酸、弱酸以及凝胶强酸树脂中,大孔弱酸树脂的工作交换容量最大;而大孔氨基磷酸树脂和大孔亚氨基二乙酸树脂相比,亚氨基二乙酸树脂的反应速率最快。

#### 参考文献:

- [1] 张建鹏,刘如玲,盛兆琪. 乳化液的破乳与可生化性研究[J]. 上海环境科学, 1994, 13(10): 20-23.
- [2] 余志荣,陆晓千,陆斌. 超滤法处理清洗乳化液废水的应用研究[J]. 上海环境科学, 2000, 19(1): 35-36.
- [3] Zouboulis A I, Avranas A. Treatment of oil-in-water emulsions by a coagulation agent and dissolved-air flotation[J]. Physico-chemical and Engineering Colloids. Surf A: Aspects, 2000, 172: 153-161.
- [4] 雷乐成. 油田稠油污水深度处理回用热采锅炉的软化处

(上接第101页)

(4) 仿真流域的数据处理、模型调试方法的研究表明,我国目前的数据精度情况基本上可以满足 SPARROW 模型运行要求,而对模型模拟结果的分析表明该模型对我国流域尺度的水环境的评估与管理具有良好的支持作用。

致谢:感谢环境保护部环境规划院水环境部对模型模拟研究工作的支持和帮助。

#### 参考文献:

- [1] Schwarz G E, Hoos A B, Alexander R B, et al. The SPARROW surface water quality model theory, application and user documentation [M]. U. S. Geological Survey, Techniques and Methods. 2006.
- [2] Smith Richard A, Schwarz Gregory E, Alexander Richard B. Regional interpretation of water quality monitoring data [J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2781-2798.
- [3] Smith Richard A, Schwarz Gregory E, Alexander Richard B, et al. Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the gulf of Mexico from the mississippi river basin [J]. Environmental Science Technology, 2008, 42: 822-830.
- [4] Richard Bridge Moore, Craigm Johnston, Keith W Robinson, et al. Estimation of total nitrogen and phosphorus in New England streams using spatially referenced regression models [R]. U. S. Geological Survey, Scientific investiga-

理技术[J]. 离子交换与吸附, 2002, 18(4): 355-360.

- [5] 侯士兵,王亚林,贾金平. 用废阳离子树脂处理含油废水的研究[J]. 化工进展, 2004, 23(4): 393-396.
- [6] Kumar Y P, King P, Prasad V S R K. Equilibrium and kinetic studies for the biosorption system of copper (II) ion from aqueous solution using tectona grandis L. f. Leaves Powder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 1211-1217.
- [7] Chien S H, Clayton W R. Application of elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 198, 44: 265-268.
- [8] HO Y S, NG J C Y, McKAY G. Kinetic of pollutant sorption by biosorbents: review [J]. Separation and Purification Methods, 2000, 29(2): 189-232.
- [9] Allen S J, McKay G, Khader K Y H. Intraparticle diffusion of a basic dye during absorption onto sphagnum peat [J]. Environ Pollut, 1989, 56: 39-50.
- [10] 王学江,张全兴,李爱民. NDA-100 大孔树脂对水溶液中水杨酸的吸附行为研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 658-660.
- [11] 许光眉,施周,邓军. 石英砂负载氧化铁的表面及其除砷吸附性能研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(4): 607-612.

tions report, 2004, 5012.

- [5] Brakebill John W, Ator Scott W, Schwarz Gregory E. Sources of suspended-sediment flux in streams of the Chesapeake watershed: a regional application of the SPARROW model [J]. Journal of American water resources association, 2010, 46(4): 757-776.
- [6] Alexander Richard B, Elliott Alexander H, Shankar Ude, et al. Estimating the sources and transport of nutrients in the Waikato River basin, New Zealand [J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 1268.
- [7] Grizzetti B, Bouraoui F, Marsily G de, et al. A statistical method for source apportionment of riverine nitrogen loads [J]. Journal of Hydrology, 2005, 304: 302-315.
- [8] 吴在兴,王晓燕. 流域空间统计模型 SPARROW 及其研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 87-89.
- [9] Maidment D R. Arc Hydro: GIS for water resources [M]. ESRI Press, 2002.
- [10] Richard B Alexander, Richard A Smith and Gregory E Schwarz. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico [J]. Nature, 2000, 403: 758-761.
- [11] Preston Stephen d, Smith Richard A, Schwarz Gregory E, et al. Spatially referenced regression modeling of nutrient loading in the Chesapeake bay watershed [R]. U. S. Geological Survey, Scientific investigations report.