

基于 SWAT 模型的图们江流域 氮磷营养物非点源污染研究

尹 刚^{1,2}, 王 宁^{1*}, 袁 星¹, 张 捷³

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2. 中科院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 浙江省象山县环境保护监测站, 宁波 315700)

摘 要 运用数学模型模拟非点源污染物的空间分布及其输移转化机制, 是当前农业非点源污染研究中的重要手段和途径之一。流域尺度长时段分布式水文模型 SWAT (soil and water assessment tool) 应用于我国南方许多流域的非点源污染模拟上都取得了较好的结果。利用 SWAT 模型建立了东北图们江流域非点源污染数据库, 对该流域(中国一侧)划分为 5 个小流域 46 个水文单元, 分别进行了水文模拟、降雨径流和土壤侵蚀量计算。结果表明, 图们江流域农业非点源污染主要的发生区在流域中部, 海兰河和布尔哈通河交界的区域内。该区内有机氮和有机磷的非点源污染负荷明显高于其他地区, 推测认为该区域为延边州首府延吉市所在地, 城市建设和经济发展带来了繁荣, 也造成了局部地区的植被破坏、土地裸露, 水土保持能力下降, 因此水土流失现象比较严重。另外, 通过分析流域内有机氮和有机磷的时空变化特征发现, 2007 年延吉、龙井地区为氮磷营养物非点源污染最大发生区(有机氮 $9.76 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 有机磷 $1.24 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 而 2008 年除延吉、龙井地区外, 珲春地区有机氮和有机磷非点源污染均有加重的趋势(分别由 $1.39 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $3.82 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, $0.17 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $0.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)。氮磷营养物的空间分布特征表明, 2007 年与 2008 年除了延吉、龙井一带为最大发生区外, 珲春地区有机氮流失有所加重(从 $1.39 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $3.81 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 有机磷流失也有所加重($0.17 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $0.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), 而安图等地区则有所减轻。

关键词 SWAT 模型; GIS; 非点源污染; 图们江流域

中图分类号 X522 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2011)04-0704-07

Non-point Source Pollution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients Using SWAT Model in Tumen River Watershed, China

YIN Gang^{1,2}, WANG Ning^{1*}, YUAN Xing¹, ZHANG Jie³

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Xiangshan Environmental Protection Monitoring Station of Zhejiang Province, Ningbo 315700, China)

Abstract The mathematical model is an important tool and method in the study of agricultural non-point source pollution. It is particularly useful for simulating spatial distribution, as well as the transport and transformation mechanism of non-point source pollutants. SWAT (soil and water assessment tool), a watershed scale and long term distributed hydrologic model, has been applied in the simulation of non-point source pollution in many watersheds of southern China. In this paper, a database of non-point source pollution from Tumen River watershed in the northeast of China was established by using SWAT model. The Chinese side of this watershed was divided into 5 sub-basins and 46 HRUs (hydrologic response units). The hydrologic simulation, runoff and soil erosion were calculated for these sub-basins and HRUs, respectively. The results showed that the agricultural non-point source pollution mainly happened in the joint area of Hailan River and Buerhatong River, and the middle area of Tumen River watershed. These areas had an evidently higher non-point source pollution load of organic nitrogen and organic phosphorus than other areas. The reason might be attributed to the highly contribution of non-point source pollution from the Yanji city, the capital of Yanbian state. The urban construction and economic development in the areas not only brought the prosper-

收稿日期 2010-08-13

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB426305); 东北师范大学测试基金资助

作者简介 尹 刚, 博士研究生, 主要研究方向为环境物质地表过程及 GIS 应用。E-mail gyin@niglas.ac.cn

* 通讯作者 王 宁 E-mail nwang@nenu.edu.cn

ity, but also led to the vegetation deterioration and decline of conservation capacity to the water and soil, causing serious water and soil loss in these areas. At the same time, the analysis of spatial and temporal variation of organic nitrogen and organic phosphorus in the studied area showed that in 2007, the most serious non-point source pollution of nitrogen and phosphorus happened in the areas of Yanji city and Longjing city (with organic nitrogen $9.76 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and organic phosphorus $1.24 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), and in 2008, the non-point source pollution of organic nitrogen and organic phosphorus had a increasing trend over time in Hunchun area (from $1.39 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ to $3.82 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, and $0.17 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ to $0.48 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ for organic nitrogen and organic phosphorus, respectively), except the areas of Yanji city and Longjing city. The spatial distribution of nitrogen and phosphorus showed that from 2007 to 2008, the loss of organic nitrogen and organic phosphorus appeared in the areas of Yanji city and Longjing city. The loss in Hunchun city area increased over time as well. However, the loss declined over time in the area of Antu city.

Keywords SWAT model; GIS; non-point source pollution; Tumen River watershed

SWAT (soil and water assessment tool) 模型^[1]由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)研发的流域尺度分布式水文模型。SWAT 模型是在集总式田间尺度非点源污染模型 CREAMS^[2]、SWRRB 模型^[3]和 ESWAT^[4]、SWIM^[5]和 SWAT-C^[6-9]等各类改进模型基础上研发的,包括 701 个方程和 1 013 个中间变量,能够模拟流域内水、泥沙、营养物以及其他化学品水文循环的物理过程。

SWAT 模型按照不同的土地利用方式和土壤类型将流域分为若干子流域,并在各子流域中进一步划分出水文响应单元 HRUs (hydrologic response units)。模型在各个 HRU 上独立运行,并将结果在子流域的出口进行汇合^[10]。模型的模块包括水文、气象、泥沙、土壤温度、植物生长、营养物、农业/杀虫剂和农业管理等 8 个组件,水文气象组件可模拟各个 HRU 上地表径流、下渗、蒸散发等水文过程^[11-14]、向模型输入或通过模型中的天气发生器自动生成降雨量、气温、太阳辐射、相对湿度和风速等气象因素变量;泥沙组件通过修正的土壤流失方程 MUSLE(modified universal soil loss equation)计算泥沙负荷量以确定土壤侵蚀状况;营养物组件采用了整合的 EPIC 模型,对其中 N、P 两种营养元素进行独立模拟^[15-16];由于嵌入了 GLEAMS 模型,SWAT 模型可以模拟地表径流、渗漏、土壤挥发、泥沙携带等过程中农药/杀虫剂的迁移损耗状况以及多年生作物轮作和每年三季作物的种植情况;汇流演算模块包括河道汇流演算和蓄水体汇流演算两部分,可以比较准确地进行流域内水、泥沙、营养物和杀虫剂等河网中运动迁移的计算。

SWAT 模型在美国、加拿大、欧洲、亚洲和非洲等地区得到了广泛应用,并获得了不断的发展,研究内容涉及流域水量平衡、非点源污染、流域水文管理以及模型的改进和相关研究等诸多方面。Santhi 等^[17]对美国德克萨斯州的 West Fork 流域在执行水质管理规

划(WQMPs)前后两个情景进行模拟,来评价执行该规划对非点源污染的长期影响;Grizzetti 等^[18]利用 SWAT 模型研究了芬兰 Vantaanioki 流域的 N、P 循环和转化;Bouraoui 等^[19]应用 SWAT 模型研究了北非突尼斯 Medjerda 流域不同管理措施对该流域地表水产生的潜在影响,得出流域内氮磷负荷的增加主要是由于农业施肥率的增加等。

SWAT 模型引入我国较晚,目前主要是应用 SWAT 模型模拟产沙产流、非点源污染研究和模型输入参数的研究等。郝芳华等^[20]应用 SWAT 模型对官厅水库的非点源污染进行了定性分析和定量计算,得出非点源污染负荷与降水量成正比;张运生等^[21]应用 SWAT 模型分析土地利用方式对有机氮、有机磷、硝态氮、可溶性磷和矿化磷的迁移量有明显影响;苏保林等^[22]建立了基于 SWAT 模型的密云水库流域非点源污染模型系统,其研究表明该系统完全能应用于密云水库入库的非点源污染负荷模拟和预测;胡远安等^[23-24]利用 SWAT 模型分别对江西省萍乡市芦溪小流域和赣江上游袁水小流域的非点源污染进行了模拟,取得了较好的结果。这些研究均证明,SWAT 模型用于我国部分流域是基本可行的,在非点源污染的模拟计算中也有一定作用。

1 基于 SWAT 模型的图们江流域氮磷营养物非点源污染研究

水环境的非点源污染是伴随人类社会经济发展而日益凸显的问题之一。由于其时空范围广泛、空间差异大、不确定性强、信息获取难度大、组成成分和迁移过程复杂多变等特点,研究、控制与管理都比较困难^[25-26]。

我国对农业非点源污染的研究涉及用土壤流失方程和水文模型来模拟和估算其污染负荷量,同时也不断地进行相关模型的改进,使之更适合我国的特

点。但在我国北方地区应用 SWAT 模型研究非点源污染问题还不多见。

1.1 研究区概况

1.1.1 自然地理及经济发展状况

图们江是我国与朝鲜、俄罗斯与朝鲜的界河,地理位置为 $41^{\circ}59'15''\sim 44^{\circ}1'30''N$ 和 $128^{\circ}17'\sim 131^{\circ}18'E$ 。图们江发源于长白山主峰——白头山东麓,注入日本海,全长 525 km,流域面积 33 168.4 km²,我国境内的流域面积 22 861 km²,主要支流有红旗河、嘎呀河、布尔哈通河、海兰河、珲春河等^[27]。

图们江流域地处天山—阴山纬向构造带和长白山新华夏系第二褶皱隆起带交界处东部,区内构造体系复杂多样,褶皱强烈,地层多变,岩性复杂。岩石以花岗岩、正片麻岩为主,还有闪长岩、安山岩、玄武岩等。流域地貌类型复杂多样,以低山丘陵为主,构造盆地相间,地势高低相差悬殊,河流深切,陡坡广布。山地面积约占 62.6%,台地 20.9%,平原 16.5%。

图们江流域是我国与俄罗斯、朝鲜重要的通商口岸,也是我国朝鲜族聚居区,经济比较发达,GDP 和人均国民收入高于全省和全国平均水平。其中,轻工业和旅游、餐饮服务行业等第三产业比较发达,轻工业产值占全部工业总产值 60%左右。轻工业中食品、造纸工业发展迅速,具有一定优势和市场竞争能力。而由于自然及社会经济方面的原因,该区农业基础相对比较薄弱,农业产值只占工农业总产值的 10%左右。

本论文研究对象为我国境内的图们江流域,研究区位于 $41^{\circ}59'\sim 43^{\circ}47'N$, $128^{\circ}44'\sim 131^{\circ}07'E$ 之间,总面积约为 22 861 km²。

1.1.2 流域非点源污染状况及原因

图们江流域近年来水质呈现干流污染加重、支流水质较好的趋势,干流中主要污染物为 COD、BOD、氨氮和石油类等^[28],原因包括点源污染和非点源污染两个方面。

根据 2003 年延边州入河排污口的调查结果^[29],开山屯镇和图们市每年排放的 3 364 万 t 污水、70 926 t COD 和 441 t 氨氮,都直接进入了图们江干流。此外,明月镇、延吉市、和龙市、龙井市、汪清镇和石岘镇排放的 6 006 万 t 污水、47 782 t COD 和 1 395 t 氨氮也通过嘎呀河、布尔哈通河与海兰河排入了图们江。近年来延吉、图们等城市相继建设了城市污水处理厂,点源污染得到了一定的控制。

近年来我国农田氮肥的施用量占世界的近 30%^[30],

全国化肥的平均施用量达 400 kg·hm⁻²,远远超过国际上为防止水体污染而设置的 225 kg·hm⁻² 的化肥使用安全上限。2006 年,图们市单位机耕面积上的化肥施用量为 813.9 kg·hm⁻²^[31],珲春市、和龙市、汪清县的单位机耕面积上的化肥施用量分别为 503.7、495.5 kg·hm⁻² 和 767.6 kg·hm⁻²,而安图县单位机耕面积上的化肥施用量则高达 1 096.8 kg·hm⁻²。农村发展养殖业是农民致富的途径之一,但养殖粪便随处排泄,对河流水体也带来极大的影响和危害。图们江珲春河流域几乎所有的村庄农户都饲养牲畜,圈河村和九沙坪村 500 多户农民,饲养的大牲畜多达 1 700 余头,且多数村民都将牲口散养,不但对草地破坏极大,牲畜粪便也经常随雨水进入河道。可见,图们江由农业化肥施用带来的水质污染现象是该流域的关键问题。

1.2 图们江流域非点源研究的 SWAT 模型应用

1.2.1 流域数据库建立和空间数据的准备

SWAT 模型的运算过程中涉及多种水文过程,首先需要建立数据库。模型所需数据包括各类地图主题和表格数据。地图主题是 Grid 格式的研究区域数字高程模型 DEM、Grid 或 Shp 格式的土地利用和土壤图。表格数据则主要是与模型运行有关的地理、气候、水文以及污染物排放等方面数据,以 dBase 或 ASCII (TXT) 表文件的格式存储。

空间数据的准备包括 DEM、土地利用和土壤类型图的转换。本研究中,DEM 和土地利用类型的数据来自东北师范大学中国东北区域开发信息工程实验室的吉林地区数字高程模型,栅格大小为 90 m×90 m,见图 1;土壤类型数据采用吉林省 1:50 万土壤图,通过扫描仪输入到计算机中生成 Tiff 格式栅格图,按照流域边界进行剪切,然后利用屏幕矢量化软件 R2V 进行配准和图形数字化,将栅格图像转换为矢量图,同时,借助 ArcGIS 软件为不同的土壤类型赋予属性值。为了便于计算,在进行土壤类型赋值之前,参考中国东北土壤和吉林土壤两书将研究区域内土壤重新划分为 9 个土类。其中,暗棕色森林土和白浆土是主要土壤类型,占流域总面积的 90.26%。

1.2.2 属性数据的准备

SWAT 模型中进行非点源污染模拟预测所需的属性数据包括土壤、气候以及水文的属性数据。

土壤属性数据包括土壤物理属性和化学属性数据。物理属性包括土壤表面到各层土壤的深度、砂粘粒含量、土壤容重、有效田间持水量、饱和导水率、土

壤可蚀性系数 K 、田间反照率和土壤有机质含量,化学属性主要输入每层的硝态氮、有机氮和有机磷的浓度。

土壤水文组渗透率的分类按照 SWAT2000 用户手册中对土壤水文组的分类规定,依据各类土壤表层 0.5 m 饱和导水率大小,将不同土壤类型的土壤水文组依次划分为较高、中等、较低和很低渗透率 4 个组别。

模型运行所需气候数据包括模拟期内的逐日降水量、最高和最低温度、太阳辐射量、相对湿度和平均风速。当某项气象资料不全时,应用模型的天气发生器通过已获得的气象资料月平均数据(如气温和太阳辐射的月平均值、标准差等)的统计规律加上随机噪声矩阵来模拟周期性的气象变化过程,实现站点气象资料不全时的填补或气象数据缺测时的模拟。本研究采用 1951 至 1970 年间吉林延边州 5 个气象站的气候资料作为天气发生器的模拟输入数据,还采用 2007 至 2008 年的气象数据作为模型模拟时的计算

数据。

1.2.3 子流域划分

SWAT 模型的预测原理是将流域划分为若干个子流域,将预测条件均一化后进行的。这一过程按照“流域→子流域→水文响应单元”步骤来完成。首先,SWAT 模型基于 DEM(数字高程模型)对整个流域提取水系,然后在流域内部划分子流域。整个流域共划分为 46 个子流域,见表 1。在此基础上,SWAT 模型根据每个子流域内部的土地利用类型和土壤类型的叠加生成 HRU(水文响应单元)。整个流域内共生成 113 个 HRU,见表 1 和图 2。

1.2.4 模拟计算

在进行水文或非点源污染模拟后,各个子流域内的所有 HRU 将各自的模拟值汇总到子流域的主河道,集成为此子流域自身的产出量,下级子流域的汇集量减去内部损失量,作为出口总量汇总于上一级子流域直到总流域出口,并将该值作为整个流域的模拟结果。

表 1 子流域的划分

Table 1 The divide of subbasins

子流域 Subbasin	水文响应单元数 HRUs	面积/km ² Area	面积百分比/% Percentage of area	子流域 Subbasin	水文响应单元数 HRUs	面积/km ² Area	面积百分比/% Percentage of area
1	1	781.85	3.42	24	1	57.15	0.25
2	1	626.39	2.74	25	1	457.22	2
3	3	937.30	4.1	26	4	2.29	0.01
4	3	130.31	0.57	27	6	457.22	2
5	3	384.06	1.68	28	2	420.64	1.84
6	4	729.27	3.19	29	2	768.13	3.36
7	5	4.57	0.02	30	4	1 035.60	4.53
8	2	475.51	2.08	31	3	258.33	1.13
9	1	987.60	4.32	32	6	388.64	1.7
10	1	619.53	2.71	33	3	203.46	0.89
11	4	50.29	0.22	34	2	425.21	1.86
12	4	201.18	0.88	35	1	347.49	1.52
13	1	397.78	1.74	36	4	345.20	1.51
14	1	649.25	2.84	37	1	603.53	2.64
15	1	765.84	3.35	38	3	578.38	2.53
16	3	427.50	1.87	39	1	34.29	0.15
17	3	1 056.18	4.62	40	1	356.63	1.56
18	2	137.17	0.6	41	1	598.96	2.62
19	2	59.44	0.26	42	2	2.29	0.01
20	1	2 571.86	11.25	43	1	1 972.90	8.63
21	3	390.92	1.71	44	2	317.77	1.39
22	2	384.06	1.68	45	5	13.72	0.06
23	3	409.21	1.79	46	3	38.86	0.17

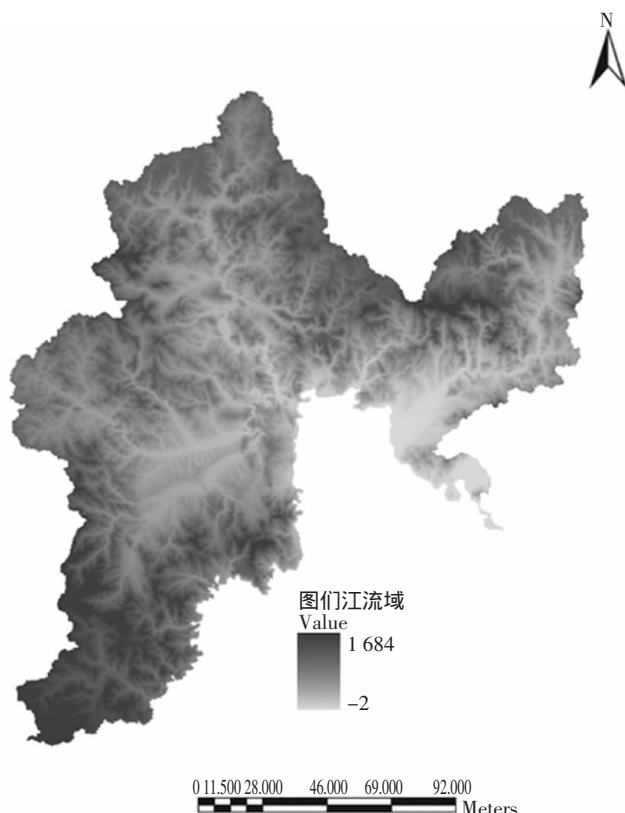


图 1 图们江流域高程图

Figure 1 DEM of Tumen river watershed

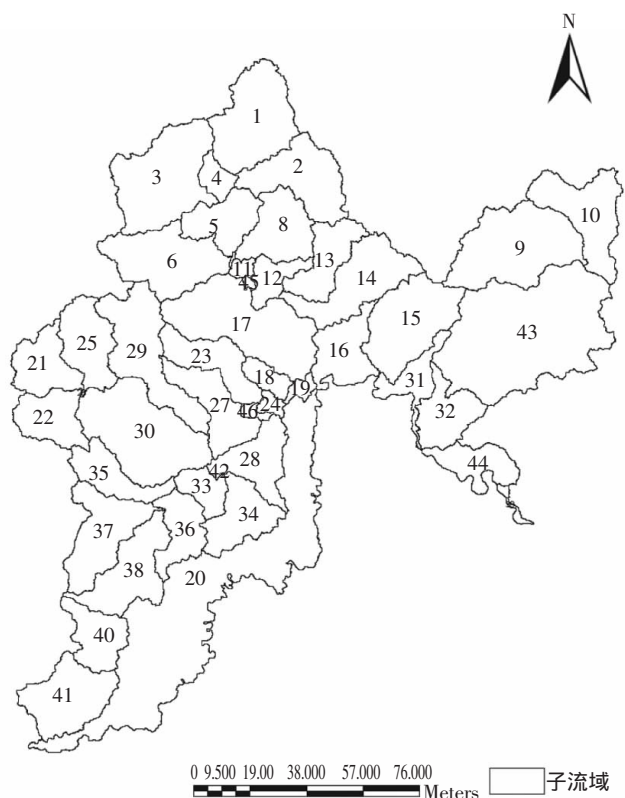


图 2 子流域的划分

Figure 2 The divide of HRUs

通过对图们江流域进行子流域划分,提取HRU,并在此基础上对各个 HRU 的氮磷非点源污染数据进行集成,最终在流域尺度上获得了有关图们江流域氮磷非点源污染的相关信息,见表 2 和图 3、图 4。

2 图们江流域非点源污染状况分析

由图 3 和图 4 可见,延吉、龙井一带为图们江流域有机氮、有机磷的非点源污染最大发生区,该区属于海兰河和布尔哈通河地区,有机氮为 $16.15 \sim 25.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机磷为 $2.04 \sim 3.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,珲春地区次之,有机氮为 $9.82 \sim 16.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机磷为 $1.24 \sim 2.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;从全区的空间分布来看,有机氮污染重于有机磷污染,尤其表现在布尔哈通河流域的安图地区。

分析污染发生的原因认为,这些地方均为流域中

表 2 图们江流域泥沙与营养物产生量模拟结果

Table 2 Results of simulation for the production of sand and nutrient in Tumen river watershed

时间 time	产水量/t Water production	产沙量/t Sand production	有机氮/t Organic nitrogen	有机磷/t Organic phosphorus
2007	3.28×10^9	3.17×10^6	2 356.42	124.00
2008	1.87×10^9	181×10^6	1 906.29	100.22

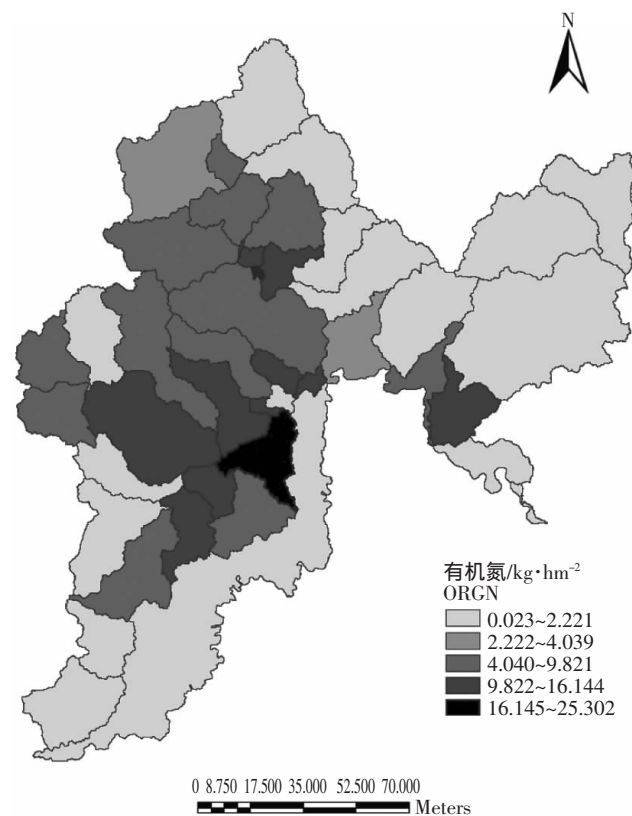


图 3 流域 2008 年有机氮空间分布

Figure 3 Spatial distribution of organic nitrogen in 2008

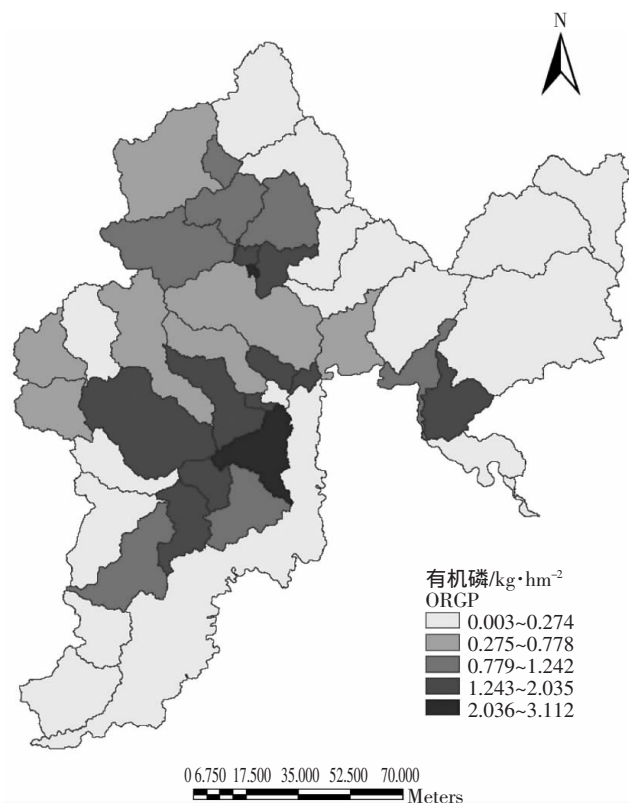


图4 流域2008年有机磷空间分布

Figure 4 Spatial distribution of organic phosphorus in 2008

人类活动比较频繁的地区。延吉市和珲春市是延边州相对发达地区,经济发展的同时,营养物质的污染也相对偏重;龙井属于海兰河流域的一级阶地区,大面积农业生产带来了氮磷营养物的流失;另外,近年来由于经济社会发展的需要,大量开发土地资源,造成水土保持能力下降,水土流失现象也比较严重。因此,这些地区都成为图们江流域氮磷非点源污染发生的关键区。

3 结论

通过对 SWAT 模型在图们江流域非点源污染研究中适用性的研究,证实该模型可应用在图们江流域的非点源污染模拟上,模拟精度在可接受的范围内。

建立了流域非点源污染数据库,通过计算有机氮和有机磷的流失量来分析其空间的分布特征,发现该流域氮磷营养物非点源污染的关键发生区主要位于延吉和龙井地区,并有逐年加重的趋势,这均与当地的人类活动有关。

参考文献:

[1] Arnold J G, Kiniry J R, Neitsch S L, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000[M]. College Station :Texas Wa-

ter Resources Institute, 2002.

- [2] Knisel W G. CREAMS :A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems[R]. Conservation Research Report No.26, 1980.
- [3] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. SWRRB :A basin scale simulation model for soil and water resources management[M]. College Station :Texas A&M Press, 1990.
- [4] Griensven A V, Bauwens W. Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin[J]. *Hydrological Processes*, 2005(19) :827-838.
- [5] Krysanova V, Muller-Wohlfeil D I, Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds[J]. *Ecological Modelling*, 1998, 106 :261-289.
- [6] Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basinwide water management :The case of the Rattlesnake Creek basin in south central Kansas[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 214 :179-196.
- [7] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT -G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27(9/10) :641-644.
- [8] McKeown R A, Gordon P, Arnold J G. Modifications of the soil water and assessment tool(SWAT-C) for stream flow modeling in a small, forested watershed on the Canadian Boreal Plain[EB/OL]//The Third International SWAT Conference :46.
- [9] Gassman P W. The I_SWAT software package :A tool for supporting SWAT watershed applications[EB/OL]//The Second International SWAT Conference :229-236.
- [10] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1) :79-86.
WANG Z G, LIU C M, HUANG Y B. The principle, structure and application of SWAT model[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(1) :79-86.
- [11] Soil Conservation service. Urban hydrology for small watershed [R]. Washington :Technical Release No. 55, USDA, 1975 :215-250.
- [12] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Applied Engr Agric*, 1985(1) :96-99.
- [13] Priestley C H, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Mon Weather Rev*, 1972, 100 :81-92.
- [14] Monteith J L. In the state and movement of water in living organisms 19th Symposia of the Society for experimental Biology[M]. London : Cambridge Univ. Press, UK, 1965 :205-234.
- [15] Williams J R, Hann R W. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints [R]. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ, 1987 :341-355.
- [16] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS :Groundwater loading effects of agricultural management systems[J]. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(5) :1403 - 1418.
- [17] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, et al. Modeling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed(Finland) using the SWAT model[J]. *Ecological Modeling*, 2003, 169 :25-38.
- [18] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT

- model on the Medjerda river basin(Tunisia)[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30 :497–507.
- [19] M S. Kang, S W. Park, J J Lee, et al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 79(1) :72–92.
- [20] 郝芳华, 孙 峰, 张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2) :385–386.
- HAO F H, SUN F, ZHANG J Y. The progress of non-point source pollution study in watershed of Guanting reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2) :385–386.
- [21] 张运生, 曾志远, 李 硕. GIS 辅助下的江西潦水河流径流的化学组成计算机模拟研究[J]. *土壤学报*, 2005(7):559–569.
- ZHANG Y S, ZENG Z Y, LI S. Simulation of chemical component in the runoff of Lianshui river, Jiangxi Province, with the assistance of GIS [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005(7):559–569.
- [22] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源模型系统 [J]. *清华大学学报*, 2006, 46(3) :355–359.
- SU B L, WANG J P, JIA H F, et al. Non-point source pollution model of Miyun reservoir watershed [J]. *J Tsinghua University*, 2006, 46(3) :355–359.
- [23] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟 :以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(5) :29–32.
- HU Y A, CHENG S T, JIA H F. Hydrological simulation of nonpoint source pollution model :A case study of application of SWAT model in Luxi watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(5) :29–32.
- [24] 胡远安, 程声通, 贾海峰, 等. 袁水上游小流域非点源污染研究 :实验设计与数据初步分析[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3) :442–445.
- HU Y A, CHENG S T, JIA H F, et al. Study of nonpoint source pollution in the watershed of Yuanshui river upper reaches :experimental design and preliminary analysis of data[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3) :442–445.
- [25] Leon L F, Soulis E D, Kouwen N, et al. Nonpoint source pollution :A distributed water quality modeling approach[J]. *Water Research*, 2001, 35(4): 997–1007.
- [26] Fitzhugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on agricultural non-point source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236 :35–53.
- [27] 林哲浩, 郑梅花, 李永奎. 图们江流域生态环境问题及其对策[J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 1999, 25(1) :70–74.
- LIN Z H, ZHENG M H, LI Y K. The problem of ecological environment in Tumen river watershed and its solution[J]. *Journal of Yanbian University(Natural Science)*, 1999, 25(1) :70–74.
- [28] 王 微, 王 宁, 袁 星, 等. 图们江流域水环境质量变化规律研究 [J]. *水资源保护*, 2010, 5 :1–7.
- WANG W, WANG N, YUAN X, et al. Study on the change rule of water quality in Tumen river watershed[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 5 :1–7.
- [29] 时淑英, 昌镜伟. 图们江干流水质状况评价分析 [J]. *吉林水利*, 2006, 7 :31, 35.
- SHI S Y, CHANG J W. Assessment of water quality in the main stream of Tumen river[J]. *Jilin Water Resources*, 2006, 7 :31, 35.
- [30] 蔡明凯, 邓春光. 我国农业面源污染调控办法分析[J]. *农机化研究*, 2008, 2(2) :211–213.
- CAI M K, DENG C G. Analysis of control measures for agricultural area source pollution in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008, 2(2) :211–213.
- [31] 吉林省统计局编, 吉林统计年鉴[M]. 北京 :中国统计出版社, 2007 :232.
- Statistic Bureau of Jilin Province. Statistic yearbook of Jilin Province [M]. Beijing :China Statistics Press, 2007 :232.