



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.201911108

中图分类号 X502

文献标识码 A

陈铁, 孙飞云, 杨淑芳, 等. 基于 SWAT 模型的观澜河流域城市面源污染负荷量化及影响效应评估[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2866-2875.

CHEN Tie, SUN Feiyun, YANG Shufang, et al. Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Guanlan river basin based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2866-2875.

基于 SWAT 模型的观澜河流域城市面源污染负荷量化及影响效应评估

陈铁¹, 孙飞云^{1,*}, 杨淑芳², 陈立春², 熊向陨³, 汪燕⁴

1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518055

2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 深圳 518029

3. 深圳市环境监测中心站, 深圳 518049

4. 深圳市水务科技信息中心, 深圳 518036

第一作者: 陈铁(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 面源污染、海绵城市。E-mail: chentie_anywhere@qq.com

*通信作者: 孙飞云(1982—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 膜处理、海绵城市等。E-mail: sun_fy@hit.edu.cn

摘要 随着我国城市区域污水收集、截污系统的完善与水质净化厂出水标准的提高, 点源污染逐步得到控制, 城市面源污染对河流水质的影响越来越凸显。针对当前城市内河流集水区域城市面源污染负荷难以量化、对水体水质影响效应难以解析等问题, 以深圳市观澜河流域为研究对象, 通过对流域的现场勘察调研与地表累积物采样研究, 来修正流域土地利用类型数据与 SWAT 模型的城镇数据库, 构建流域城市面源污染评价模型。结果表明: SWAT 模型城镇数据库中地表沉积物最大累积量(DIRTMX)、地表沉积物中总氮含量(TNCONC)、地表灰尘累积半饱和时长(TNALF)与地表灰尘总磷含量(TP CONC)对 TN 与 TP 负荷的模拟最为敏感; 建立的 SWAT 模型对观澜河流域径流量、TP 与 TN 模拟验证期的纳什效率系数(E_{NS})分别为 0.79、0.7、0.67, 决定系数(R^2)分别为 0.81、0.77、0.81, 模型拟合结果较好。应用 SWAT 模型分析了 2018 年观澜河流域 TN 和 TP 的城市面源污染时空分布特征: TN 和 TP 输出最高值为 13.31~14.91 t·km⁻² 和 1.69~1.86 t·km⁻²; 8 月份观澜河流域降雨径流污染最为严重, TN 和 TP 负荷分别为 2.15 t·km⁻² 与 0.24 t·km⁻²。上述评估结果可为区域城市面源污染的负荷量化与影响效应评估提供参考。

关键词 城市面源污染; SWAT 模型; 负荷量化; 影响效应评估

在我国城市区域, 由于不透水区域占比较大、生产活动复杂、污染来源多样, 导致城市内河流污染较为严重。城市面源污染是仅次于农业面源污染的第二大面源污染源^[1]。近年来, 随着我国城市区域污水收集、截污系统的完善与水质净化厂出水标准的提高, 点源污染逐步得到控制, 城市面源污染对河流水质的影响越来越凸显, 急需对城市内河流面源污染进行负荷量化与影响效应研究, 为城市内河流水质进一步改善提供数据支持。

目前, 国内对于城市面源污染的负荷量化多利用经验公式进行估算, 缺乏较为精确的负荷量

收稿日期: 2019-11-20; 录用日期: 2020-03-01

基金项目: 深圳市技术攻关项目(JSJG20170414101900541); 深圳市基础研究项目(JCYJ20160406162038258)

化方法。王军霞等^[2]通过对内江市不同城市下垫面场次降雨事件平均浓度的研究，估算了内江市全年降雨径流污染中氨氮、COD、TN 与 TP 负荷；杨龙等^[3]基于事件平均浓度统计法，估算了 2012 年北京市城市面源污染物 SS、COD 等污染物负荷。随着科技水平的提高，西方发达国家开发了大量的分布式水文模型(如 SWAT、HSPF、AnnAGNPS 模型等^[4])，能实现对大尺度流域农业面源污染负荷较高精度的模拟，但对于城市内河流的小尺度流域的城市面源污染的负荷量化与影响效应分析的模型应用研究较为缺乏。李丹等^[5]利用改进的 SWAT 模型，模拟了对太湖流域浙西区的西苕溪流域面源污染 TN 与 TP 负荷；赵雪松^[6]利用改进的 AnnAGNPS 模型，实现了对汤河西支流流域农业面源污染 TN 与 TP 负荷较高精度的模拟。

深圳市观澜河流域为典型的城市内河流集水区域。目前观澜河流域内各水质净化厂出水已达到地表准Ⅳ类，对于区域的截污系统日臻完善，城市面源污染成为影响观澜河水质的主要污染类型。因此，选择深圳市观澜河流域为研究对象，模拟分析城市内河流面源污染的潜在模型——SWAT 模型，通过现场勘察调研与地表累积物采样研究，来修正所获取的土地利用数据与模型城镇数据库，从而实现对于观澜河流域的城市面源污染负荷量化与影响效应解析，为我国类似城市内河流的城市面源污染分析提供参考。

1 研究区域概况

观澜河流域位于我国南方深圳市中北部，北与东莞市交界，流域总集水面积为 189.66 km²。观澜河流域地处北回归线以南，属亚热带海洋性季风气候，夏季盛行东南风和西南风。观澜河流域多年平均气温为 22 ℃，多年平均降雨量为 1 825 mm，且降雨量在全年分布不均，4—9 月为雨季，降雨量约占全年降雨量的 84%。观澜河流域集水区域内包含一条干流及 14 条一级支流，其中干流观澜河沿河建有的水质处理设施包括龙华水质净化厂一期、二期，观澜水质净化厂一期、二期，坂雪岗水质净化厂、清湖人工湿地与观澜河口调蓄池，是观澜河主要的点源输入与补水水源。观澜河流域地理位置与流域水系分布如图 1 所示。

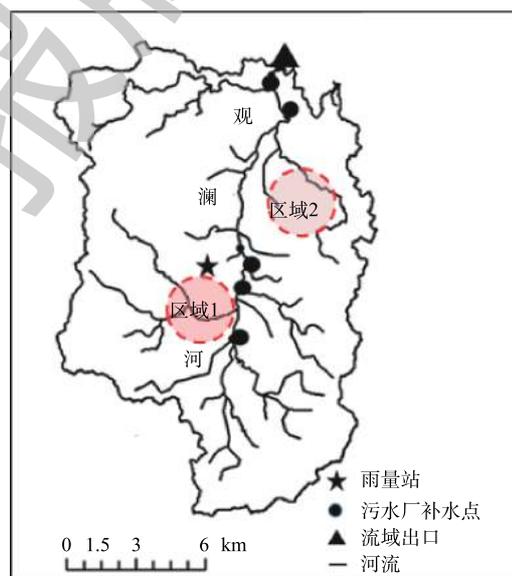


图 1 观澜河流域水系分布

Fig. 1 Distribution of water systems in the Guanlan River Basin

2 研究方法与数据处理

2.1 研究方法

SWAT 模型是常见的面源污染分析模型，其组成包括降雨模拟、产汇流、河流水质扩散等模块^[7]。SWAT 模型因具有农药/杀虫剂组件与农业管理组件，因此，常被运用于模拟流域农业面源污染，而很少用于城市面源污染的研究。通过《ArcSWAT 2009 用户指南》^[8]以及《SWAT 2009 输入输出文件手册》^[9]，发现 2009 以上的版本的 SWAT 模型具有城镇数据库，已完善了流域土地利用数据与模型城镇数据库，可以用 SWAT 模型模拟流域城市面源污染。SWAT 模型城镇数据库的关键参数^[9]如表 1 所示。

本研究通过对研究区域地表累积物的监测分析确定 DIRTMX、TNCONC、TPCONC 与 TNO3CONC 的取值。目前，通常的地表累积物采样方法有 2 大类：干式采样法和湿式采样法^[10]。干式采样法根据使用工具可以细分为用毛刷或者扫帚清扫法与用吸尘器真空采样法。湿式采样法

表1 SWAT模型城镇数据库参数

Table 1 Parameters of urban land use database of SWAT model

序号	参数名称	含义
1	URBNAME	字型代码, 当添加新的城市用地类型时, 其4位字符代码必须唯一
2	FIMP	不透水区域占城市土地类型总区域的分数, 包括直接与间接有水力联系的不透水区域
3	FCIMP	有水力联系的不透水区域占城镇土地类型总区域的分数
4	CURBDEN	城镇土地类型中街边石的长度密度
5	URBCOEF	去除不透水区域地表沉积物的冲刷系数
6	DIRTMX	不透水区域沿单位长度街边石的地表沉积物最大累积量
7	THALF	不透水区域地表沉积物从0累积到1/2 DIRTMX所需的时间
8	TNCONC	不透水区域地表沉积物中总氮含量
9	TPCONC	不透水区域地表沉积物中总磷含量
10	TNO3CONC	不透水区域地表沉积物中总硝酸盐含量
11	URBCN2	城镇土地类型水分条件II下不透水区域的SCS径流曲线系数CN值

是先利用去离子水清洗地面, 在通过真空吸尘器吸取泥水混合样^[11]。本研究采用羊毛刷与800 W德国卡赫真空吸尘器对研究区域进行干式采样, 其采样过程如下。

1) 在选定的采样区域沿街道边石布点采样, 根据采样区域面积确定采样点数, 每个区域布点不少于5个, 在采样处放置自制的1.0 m×1.0 m的采样框, 在框内采集。

2) 采样时, 先用吸尘器横竖交叉吸取框内灰尘, 然后再用毛刷往复清扫框内地表, 以使紧密附着在地表的颗粒物脱离, 再使用真空吸尘器吸取框内灰尘, 以此重复3~5次。

3) 将真空吸尘器集尘袋内收集的地表灰尘移入无菌采样袋内并贴好标签。

已有研究表明, 地表污染物随着雨前干旱时长最终会趋于饱和。KIM^[12]通过研究美国南加州高速公路的地表累积物中TSS、COD等污染物随雨前干旱时长的累积速率, 发现时长为10~70 d内的TSS与COD的累积速率相比1~10 d分别下降了79%与78%。边博^[13]通过对城市地表污染物累积过程的研究发现雨期干旱时长在7 d以上, 地表污染物含量达到饱和。因此, 本研究选择在雨前晴时长为7 d以上的无风条件下进行采样, 远离清扫时间, 收集一个区域内的混合样品。本研究所布设观澜河流域地表污染物累积监测点位主要集中在2个片区, 采样覆盖区域面积可达22 km², 布设的采样片区内覆盖了观澜河流域主要的6类城市用地类型(图2): 工业用地、高密度住宅用地(简称高密住宅)、中密度住宅用地(简称中密住宅)、商业用地、交通用地与公共管理服务用地(简称公管用地), 每个片区内所布设的6类城市用地类型地表沉积物采样取样均为5个, 故总的2个片区内6类城市用地类型采样区域总数为60个。为确定观澜河6类城市用地类型的DIRTMX、TNCONC、TPCONC与TNO3CONC的取值, 在2018年10月—2019年10月, 进行了5次地表污染物

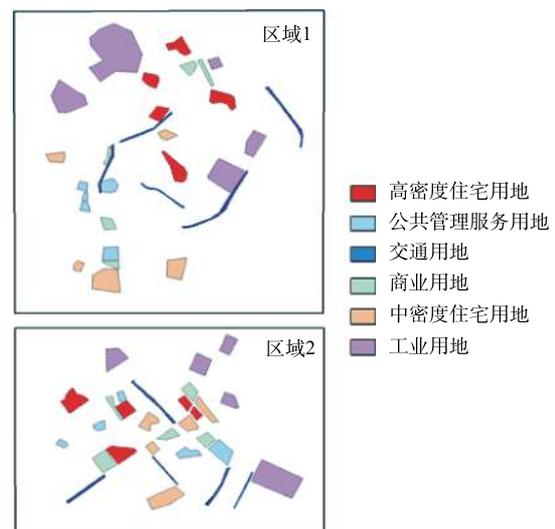


图2 地表灰尘采样区域分布

Fig. 2 Distribution of land surface dust sampling area

累积采样监测, 采样包括降雨次数较多的雨季与降雨次数较少的旱季时期, 共获得样品数 300 个。

2.2 数据处理

根据施为光^[14]的研究, 城市降雨径流污染主要是由粒径为 50~1 000 μm 的细尘引起的。因此, 本研究对收集到的地表累积物使用金属筛进行筛分, 对于小于 1 mm 的颗粒物样品进行称量并记录, 再反复颠簸以使不同粒径的颗粒能均匀分布, 每个样品取 5 g 溶于 1 L 的去离子水中, 测混合后水样的 TN、硝态氮以及 TP, 每组样品设置 3 组平行样品。

本研究通过基础数据收集、现场监测分析相结合的手段来获取 SWAT 构建所需要的相关数据, 数据类型可分为空间数据和地表观测数据 2 个部分, 与以往研究不同的是, 观澜河流域农业用地较少, 城镇用地占比较大, 因此, 在进行数据收集时, 不收集农业管理数据。SWAT 模型构建所需数据及基本信息如表 2 所示。

表 2 SWAT 模型构建所需数据来源及基本信息
Table 2 Required data sources and basic information for SWAT model building

数据类型	名称	来源	说明
空间数据	流域地形数据	水经注软件(付费)	分辨率为 10 m DEM 栅格数据
	流域土地利用类型数据	中科院地理研究所资源环境数据云平台	1 km \times 1 km 土地利用/覆被矢量数据
	流域土壤类型分布数据	中科院地理研究所资源环境数据云平台	1:1 000 000 土壤类型矢量数据
地表观测数据	气象数据	中国气象数据网、深圳气象局	2000—2018 年气象要素日变化数据
	点源数据	深圳市环境监测中心	2018 年污水厂尾水水量、水质日变化数据
	控制断面水量、水质数据	深圳市环境监测中心	2014—2018 年企坪断面水量、水质日实测数据
	土壤属性数据	中国土壤数据库、SPAW 软件、参数计算公式等 ^[7]	更新模型土壤属性数据库
	城镇用地类型属性数据	现场监测研究、文献等	更新模型城镇属性数据库

为了便于模型的构建, 须对空间数据进行预处理, 图 3 是本研究所收集到的原始空间数据以及处理后的数据。

本研究选择时空不确定性适应算法 SUFI-2 进行模型的校准与参数率定。该方法是一种全局敏感性分析法, 取决于目标函数值与拉丁超立方生成的参数之间的多元回归系统, 其表达式^[15]见式 (1)。

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot b_i \quad (1)$$

每个参数 b_i 相对显著性用 t 检验来确定, 各参数的敏感度用算法输出参数 t_{stat} 来衡量, 绝对值越大, 则敏感度越高。

对于 SWAT 模型的模拟结果验证, 本研究使用决定系数 R^2 与纳什效率系数 E_{NS} 进行综合评价, 其计算方法见式 (2) 和式 (3)。当 $E_{\text{NS}} \geq 0.5$ 且 $R^2 \geq 0.6$ 时, 模型拟合结果较好^[16]。

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_t - Q'_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_t - \bar{Q}_0)^2} \quad (2)$$

式中: Q'_0 为 t 时刻的观测值; Q'_m 为 t 时刻的模拟值; \bar{Q}_0 为观测值的平均值; E_{NS} 取值为负无穷至 1, E_{NS} 接近 1, 表示拟合程度好, 模型可信度高。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^T (Q'_i - \bar{Q}_0) \cdot \sum_{i=1}^T (Q'_i - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^T (Q'_i - \bar{Q}_0)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^T (Q'_i - \bar{Q}_m)^2}} \right] \quad (3)$$

式中： \bar{Q}_m 为模拟值的平均值； R^2 的取值范围为0~1， R^2 值越接近于1，则模型拟合程度越高。

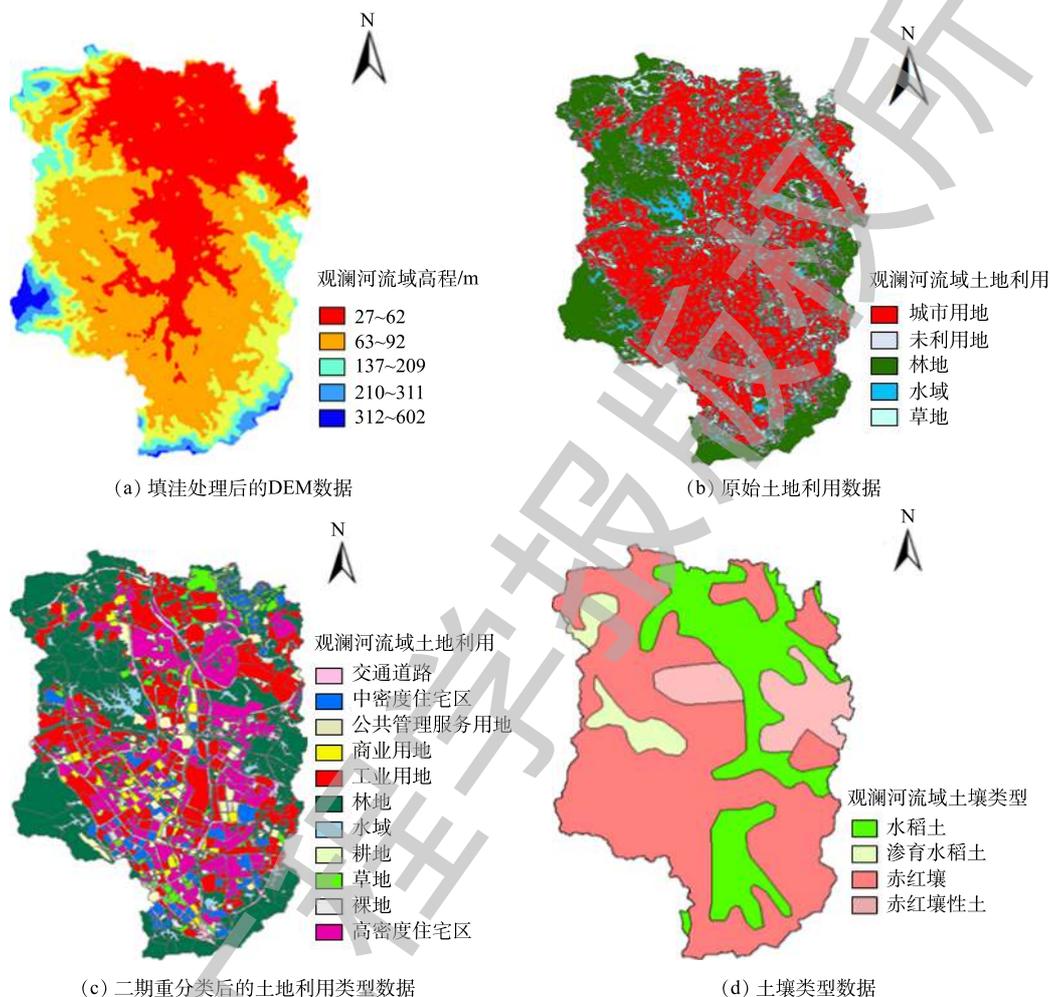


图3 所收集到的原始空间数据及其处理后的数据

Fig. 3 Original spatial data collected and its processed data

3 结果与分析

3.1 城镇数据库构建

通过对观澜河流域城镇用地类型的地表累积物的采样研究，参考《SWAT 2009 输入输出手册》^[9]提供的相关参数范围和观澜河流域已有的研究成果，构建了观澜河流域SWAT模型城镇数据库。其中FIMP、FCIMP、CURBDEN根据现场研究确定，DIRTMX、TNCONC、TPCONC与TNO3CONC根据地表沉积物研究确定，URBCOEF、THALF、URBCN2参考《SWAT 2009 输入输出手册》^[9]与白凤姣等^[17]关于深圳市观澜河流域CN值的校正研究确定。

如图4所示，观澜河流域6类城市用地类型地表沉积物的DIRTMX的均值中最大值为中密度居住区 $21.69 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ ，最小值为公管用地 $6.04 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-1}$ ；TNCONC的均值最大值为高密度居住区 $81.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最小值为公管用地 $17.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；TNO3CONC的均值最大值为高密度居住区 $9.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，

最小值为公管用地 1.72 g·kg⁻¹；TPCONC 的均值最大值为高密度居住区 0.65 g·kg⁻¹，最小值为公管用地 0.18 g·kg⁻¹。建立的 SWAT 模型城镇数据库关键参数初始数值如表 3 所示，SWAT 模型的城镇数据库的 DIRTMX、TNCONC、TNO3CONC 与 TPCONC 在观澜河流域的实测值与 SWAT 模型提供的参考值差别较大，这是由于 SWAT 模型城镇数据库默认的参数值是基于美国城市建设区域的相关研究，与我国城市面源污染现状差别较大。因此，在构建 SWAT 模型研究流域城市面源污染时，须根据当地特征修正模型 SWAT 模型城镇数据库参数值。

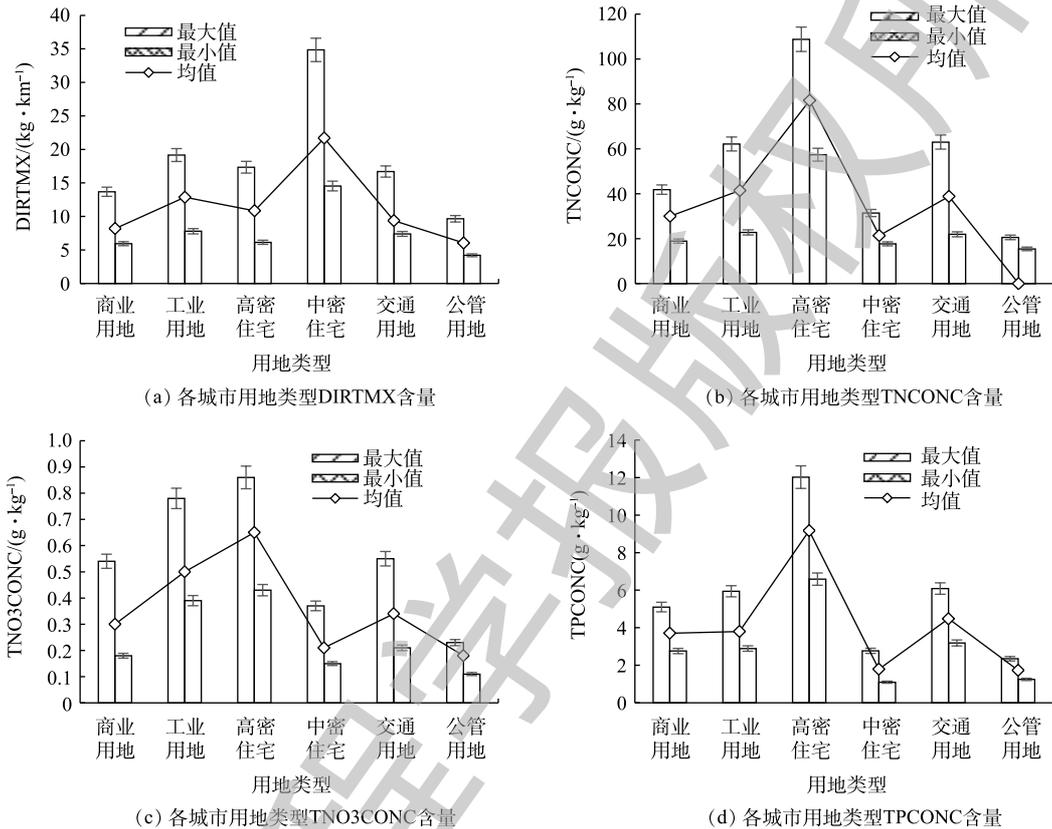


图 4 观澜河流域城市用地类型地表沉积物监测的研究结果

Fig. 4 Research results of land surface sediment monitoring of urban land use types in Guanlan river basin

表 3 观澜河流域 SWAT 模型城镇数据库关键参数初始数值

Table 3 Initial values for key parameters of urban database of SWAT model for Guanlan river basin

用地类型	FIMP	FCIMP	CURBDEN/ (km·km ⁻²)	URBCOEF/ mm ⁻¹	DIRTMX/ (kg·km ⁻¹)	THALF/ d	TNCONC/ (g·kg ⁻¹)	TNO3CONC/ (g·kg ⁻¹)	TPCONC/ (g·kg ⁻¹)	URBCN2
商业用地	0.94	0.83	26	0.13	8.19	1.60	30.03	3.71	0.30	98
工业用地	0.76	0.72	15	0.13	12.86	2.35	41.46	3.80	0.50	98
高密住宅	0.92	0.81	34	0.13	10.84	0.75	81.54	9.17	0.65	98
中密住宅	0.57	0.49	30	0.13	21.69	0.75	21.40	1.79	0.21	98
交通道路	0.90	0.90	13	0.13	9.37	3.90	38.80	4.48	0.34	98
公管用地	0.44	0.35	20	0.13	6.04	3.90	17.80	1.72	0.18	98

3.2 模型的校准与验证

设置不同的子流域集水面积能影响 SWAT 模型基于观澜河流域 DEM 数据生成河流情况与子流域生成个数。本研究通过多次设置子流域的集水面积，发现子流域的集水面积 ≥ 300 hm² 时，

SWAT模型生成的观澜河流域河流情况与实际较为一致，其划分的子流域为34个。根据观澜河流域特征本研究设定的土壤类型面积阈值为15%，用地类型面积阈值为0，坡度分为3级： $<2\%$ 、 $2\% \sim 5\%$ 与 $>5\%$ ，共划分为326个HRUs。通过SU2F-2对参数进行敏感性分析，确定了流域中对径流最为敏感的10个参数，以及对氮磷负荷最为敏感的10个参数，其中径流曲线数、土壤饱和导水率、土壤有效含水量与地下水滞后系数对径流量的模拟最为敏感；有效磷沉降速率、地表灰尘TP含量、地表灰尘TN含量与地表灰尘最大累积量对TN与TP的模拟最为敏感(图5)。本研究收集到观澜河流域控制断面——企坪断面2014—2018年的水量与水质数据，以此对企坪断面进行了径流量与水质的校准和验证，模拟步长设置为月，以 $E_{NS} \geq 0.5$ 、 $R^2 \geq 0.6$ 为判断运行结束的标准。

月径流量、TP与TN负荷的模拟值与实测值分析对比结果见图6。月径流量校准期的 E_{NS} 为

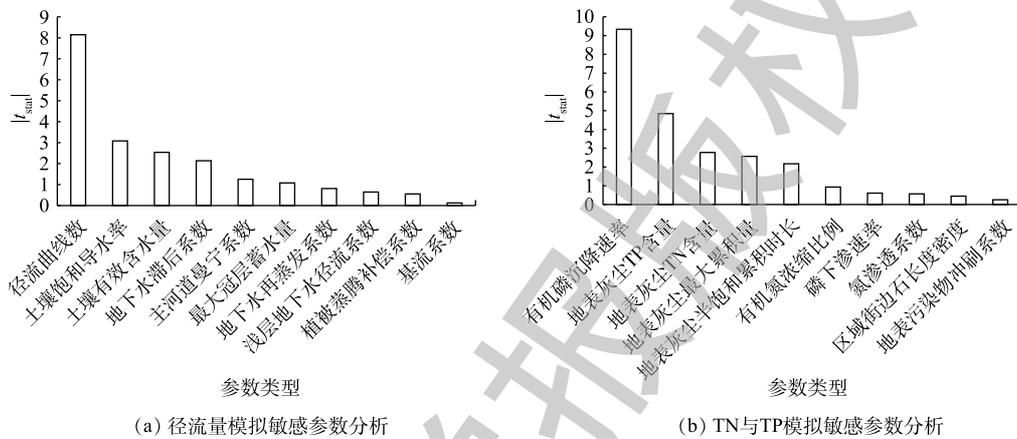


图5 研究区域参数敏感性分析结果

Fig. 5 Parameter sensitivity analysis results of study region

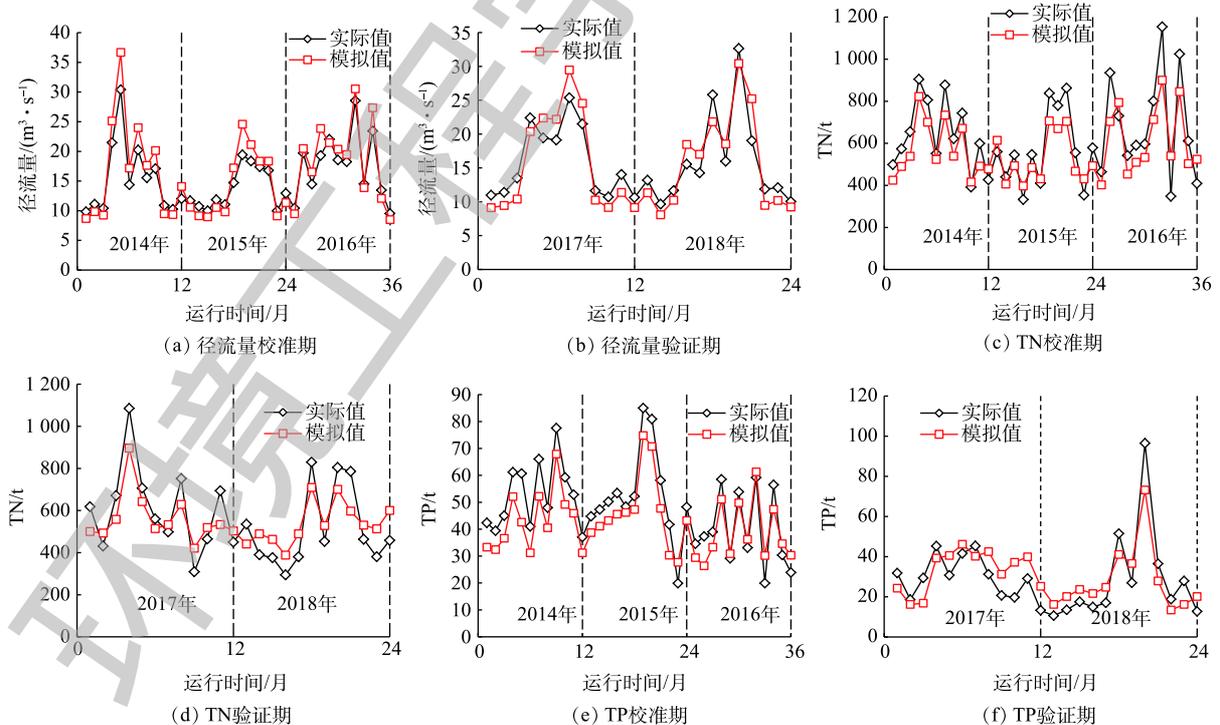


图6 SWAT模型对径流量、TN与TP的模拟

Fig. 6 Simulation of monthly runoff, TN and TP by SWAT model

0.83, R^2 为 0.93; 验证期的 E_{NS} 为 0.79, R^2 为 0.81。月 TN 与 TP 负荷的校准期的 E_{NS} 分别为 0.70、0.68, R^2 分别为 0.86、0.87; 月 TN 与 TP 负荷验证期的 E_{NS} 分别为 0.7、0.67, R^2 分别为 0.77、0.81。由此可见, 模型模拟结果可信度较高, 与实际值的拟合度较好, 这与城镇数据库参数修正的结论一致: DIRTMX、TNCONC、TPCONC 与 THALF 是模型建立的关键参数。

3.3 流域城市面源污染空间分布特征

通过 SWAT 模型分析了 2018 年观澜河流域 TN 与 TP 单位面积的面源污染输出负荷的空间分布特征与各类型功能区输出的面源污染负荷对总负荷的贡献率(图 7 和图 8)。2018 年, 观澜河流域 TN 与 TP 单位面积的面源污染输出负荷的空间分布特征表现一致, 均在子流域为 10、15、26、31 号子流域内最高, 分别为 TN 13.31~14.91 $t \cdot km^{-2}$ 和 TP 1.69~1.86 $t \cdot km^{-2}$ 。在观澜河流域 6 类功能区中, 高密度居住区输出的 TN 与 TP 负荷贡献最高, 分别为 52% 和 49%, 其次是工业用地, 分别为 27% 和 32%, 公管用地最低, 分别为 1.5% 和 2.3%。

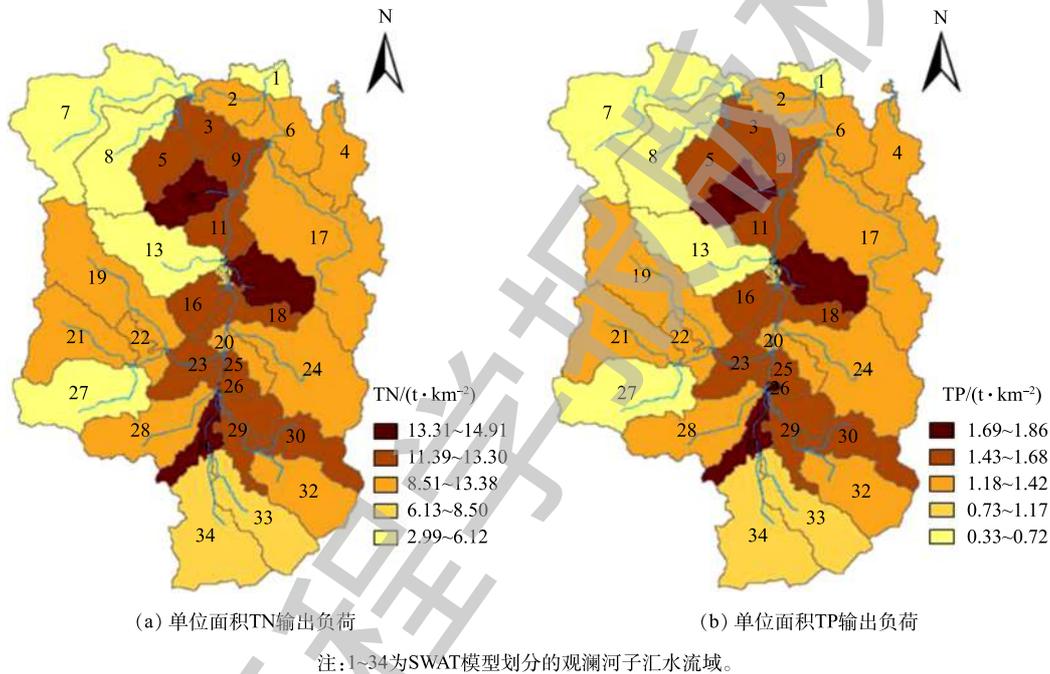


图 7 2018 年观澜河流域 TN 与 TP 单位面积的面源污染年输出负荷空间分布特征

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of annual output loads of non-point source pollution of TN and TP per unit area in Guanlan river basin in 2018

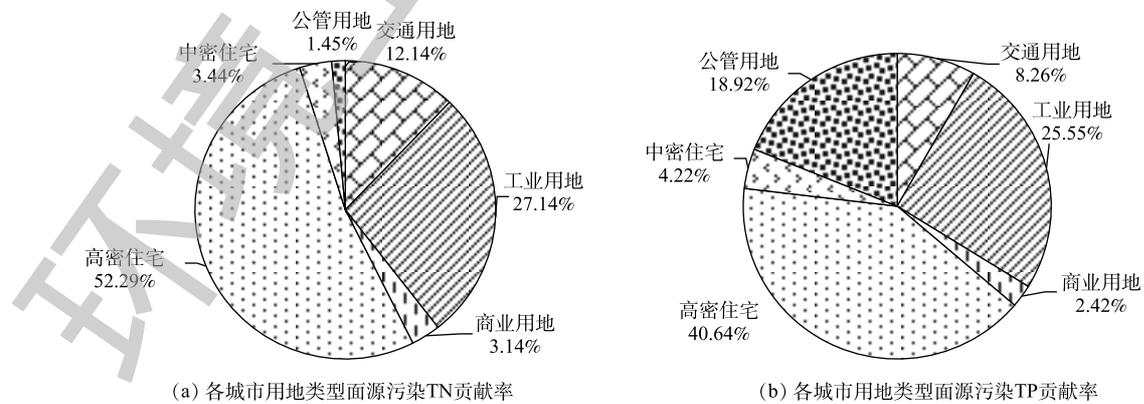


图 8 2018 年观澜河流域六类功能区面源污染负荷贡献率

Fig. 8 Contribution ratio of nonpoint pollution load of six urban land use types in Guanlan river basin in 2018

3.4 流域城市面源污染时间分布特征

观澜河流域主要的输入点源为干流沿岸建设的水质净化厂尾水, 通过利用收集到的2018年观澜河流域各水质净化厂尾水水量与水质日变化数据, 建立SWAT模型的点源输入数据库, 并基于模型分析了2018年观澜河流域城市面源污染对控制断面——企坪断面处水体TN与TP负荷的贡献情况(图9)。2018年观澜河流域4—9月的降雨径流污染产生的TN与TP负荷均高于1—3月份、10—12月, 8月观澜河流域降雨径流污染最为严重, TN与TP负荷分别为 $2.15 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 与 $0.24 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

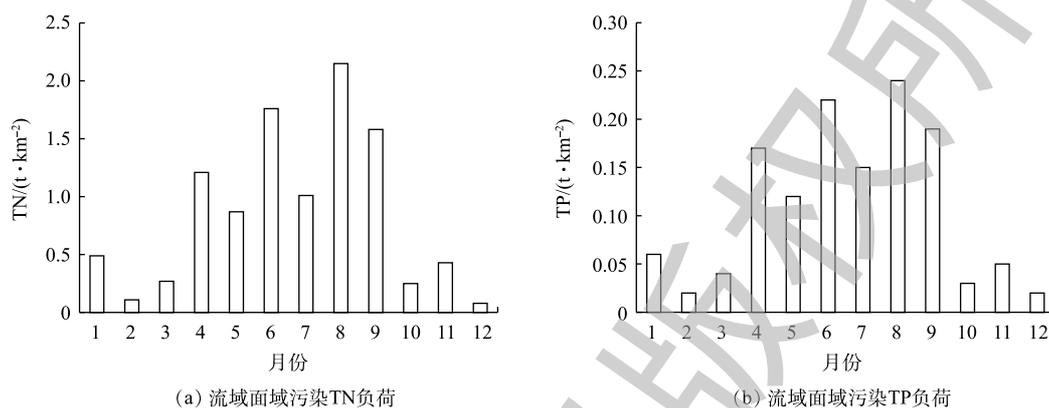


图9 2018年观澜河流域城市面源污染对水体TN与TP的贡献率

Fig. 9 Contribution rate of urban nonpoint pollution to TN and TP of water body in Guanlan river basin in 2018

4 结论

1) 通过对观澜河流域6类城市用地类型的地表沉积物采样监测研究与区域的现场调研, 构建了SWAT模型城镇数据库并对数据库参数进行了本地化校正, 发现: SWAT模型的城镇数据库的DIRTMX、TNCONC、TNO3CONC与TPCONC这4类参数在观澜河流域的实测值与SWAT模型提供的参考值差别较大, 后续的相关研究应重点关注这几类城镇数据库参数的本地化校正。

2) SWAT模型参数敏感性分析表明: 参数DIRTMX、TNCONC、TNALF与TPCONC对月TN与TP负荷的模拟最为敏感; 构建的SWAT模型对控制断面径流量、TP与TN负荷模拟验证期的 E_{NS} 分别为0.79、0.68和0.67, R^2 分别为0.81、0.87和0.81, 模型模拟结果可信度较高, 与实际值的拟合度较好。同时表明, 通过对流域地表累积物的采样研究, 建立并校正SWAT模型城镇数据库的方式来构建流域城市面源污染分析的SWAT模型的方法可行。

3) 利用SWAT模型分析2018年观澜河流域TN与TP的时空分布特征发现: 观澜河流域TN与TP单位面积年输出负荷空间分布最高值为TN $13.31\sim 14.91 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 和TP $1.69\sim 1.86 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$; 在流域6类城市用地类型中, 高密度住宅区输出的TN与TP负荷贡献最高, 分别为52%与49%, 公共管理服务用地最低, 分别为1.5%与2.3%; 2018年观澜河流域4—9月的降雨径流污染产生的TN与TP负荷均高于1—3月、10—12月, 8月观澜河流域降雨径流污染最为严重, TN与TP负荷分别为: $2.15 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 和 $0.24 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

参考文献

- [1] CHENG X, CHEN L D, SUN R H. Estimation of non-point source pollution loads of Beijing-Tianjin-Hebei region considering precipitation and topography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 124(9): 869-879.
- [2] 王军霞, 罗彬, 陈敏敏, 等. 城市面源污染特征及排放负荷研究: 以内江市为例[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 151-156.
- [3] 杨龙, 孙长虹, 王永刚, 等. 城市面源污染负荷动态更新体系构建研究[J]. 环境保护科学, 2015, 41(2): 63-66.
- [4] RADCLIFFE D E, CABRERA M L, RADCLIFFE D E, et al. Modeling phosphorus in the environment[J]. Modeling Phosphorus in the Environment, 2007, 89(1): 278-283.

- [5] 李丹, 薛联青, 郝振纯. 基于SWAT模型的流域面源污染模拟影响分析[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(3): 4-7.
- [6] 赵雪松. 基于改进的AnnAGNPS模型的区域农业面源污染模拟研究[J]. *水利技术监督*, 2016, 24(4): 64-67.
- [7] 王昌根, 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.
- [8] 温切尔, 邹兵. ArcSWAT 2009用户指南[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [9] 阿诺德, 邹松兵. SWAT 2009输入输出文件[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [10] BRIS F J, GARAUD S, APPERRY N, et al. A street deposit sampling method for metal and hydrocarbon contamination assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 235(23): 211-220.
- [11] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1153-1158.
- [12] KIM J. Estimating pollutant mass accumulation on highways during dry periods[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 27(3): 30-41.
- [13] 边博. 城市地表污染物累积模型研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(6): 137-141.
- [14] 施为光. 街道地表物的累积与污染特征: 以成都市为例[J]. *环境科学*, 1991, 12(3): 18-23.
- [15] 芦昌兴, 王甲荣, 宫雪亮. 基于SWAT模型对洮赵新河流域径流的模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(6): 19-24.
- [16] 王立, 李海强, 马放. 基于SWAT模型的沙颍河上游非点源污染模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [17] 白凤姣, 李天宏. 基于GIS和L-THIA模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2667-2673.

(本文编辑: 郑晓梅)

Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Guanlan river basin based on SWAT model

CHEN Tie¹, SUN Feiyun^{1*}, YANG Shufang², CHEN Lichun², XIONG Xiangyun³, WANG Yan⁴

1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Shenzhen 518029, China

3. Shenzhen Environmental Monitoring Center Station, Shenzhen 518049, China

4. Shenzhen Water Technology Information Center, Shenzhen 518036, China

*Corresponding author, E-mail: sun_fy@hit.edu.cn

Abstract In recent years, with the improvements of sewage collection, interception systems in urban region of China and effluent standards of water purification plants, point source pollution has been gradually controlled, and the impact of urban non-point source pollution on water quality of river has becoming more and more significant. Aiming at the problems such as being difficult to quantify the current urban non-point source pollution load in river catchment areas of cities and to analyze the impact on water quality, Shenzhen Guanlan river basin was taken as the research object, site survey and investigation of land surface accumulation were performed in the river basin, then the land use type data of the river basin and the urban database of SWAT model were revised to build an urban non-point source pollution assessment model. The results showed that in the urban database of SWAT model, maximum accumulation of land surface sediments (DIRTMX), TN in land surface sediments (TNCONC), half saturation time of land surface dust accumulation (TNALF) and TP in land surface dust (TPCONC) were most sensitive to the simulation of TN and TP loads. Nash efficiency coefficients (E_{NS}) of the built SWAT model for the runoff of the Guanlan river basin, TP and TN simulation verification periods were 0.79, 0.7 and 0.67, the corresponding coefficients of determination (R^2) were 0.81, 0.77 and 0.81, respectively. The model simulation results were good. The built SWAT model was used to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of urban non-point source pollution of TN and TP in the Guanlan river basin in 2018. The highest values of TN and TP export were 13.31~14.91 t·km⁻² and 1.69~1.86 t·km⁻². In August, rainfall runoff pollution in the Guanlan river basin was the most serious, and TN and TP loads were 2.15 t·km⁻² and 0.24 t·km⁻², respectively. The result can provide reference for load quantification and effect evaluation of regional urban non-point source pollution.

Keywords urban non-point source pollution; SWAT model; load quantification; effect evaluation