

新安江上游流域 SWAT 模型的构建及适用性评价

李泽利¹, 吕志峰¹, 赵越², 王玉秋¹, 张震³

(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研究院, 北京 100012; 3. 天津市环境监测中心, 天津 300191)

摘要:以新安江上游屯溪流域为研究区域,建立了 SWAT 模型的气象、土壤、土地利用和农作物管理等数据库,并利用 2000-2010 年逐月实测的径流、泥沙及非点源溶解态氮负荷数据进行了多参数、多站点的率定和验证,使用多目标(纳氏系数、线性相关系数和相对误差)对模型适用性进行了评价。结果表明:径流模拟效果非常好,泥沙和营养盐模拟结果令人满意,SWAT 模型在屯溪流域适用性较好,可以模拟分析该地区的非点源污染问题,研究所构建的数据库和率定的参数可为进一步研究新安江流域的水环境管理提供科学依据和决策支持。

关键词:径流; 泥沙; 营养盐; SWAT 模型; 非点源污染; 适用性; 新安江

中图分类号:P334.92; X522

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)01-0025-07

Construction of SWAT model and its applicability evaluation in upper basin of Xin'an river

LI Zeli¹, LÜ Zhifeng¹, ZHAO Yue², WANG Yuqiu¹, ZHANG Zhen³

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

2. Chinese Academy for Environment Planning, Beijing 100012, China; 3. Environment Monitoring Center, Tianjin 300191, China)

Abstract: Taking Tunxi watershed in the upper of Xin'an river as study area, the paper built the database of SWAT model about weather, soil, land use and crop management. Based on the monthly observed runoff, sediment loads and dissolved nitrogen load data from 2000 to 2010, it carried out calibration and validation of multi-parameters, and multi-site. It evaluated the applicability and reliability of SWAT model in Tunxi watershed basin by use of multi-objective, Nash-Sutcliffe efficiency, linearly dependent coefficient and relative error. The results showed that the simulation of runoff is very good. The simulation results on sediment and nutrients salt are desirable. The model has good adaptability and may analyzed the non-point pollution problems in Xin'an river basin. The constructed database and calibrated parameters can provide a reliable scientific basis and decision support for the further water environmental management in the basin.

Key words: runoff; sediment; nutrients; SWAT model (soil and water assessment tool); non-point source pollution; applicability; Xin'an River

新安江发源于黄山市休宁县境内,是安徽省第三大水系,干流长度 242.3 km,经省界断面(街口)流入浙江省千岛湖,其出境水量占千岛湖年均入库水量的 68% 以上。新安江流域地处南方典型的红壤丘陵农业区,目前正面临着水土流失严重、水体氮负荷升高等非点源污染问题^[1],导致千岛湖入境水质恶化,湖水富营养化趋势加速,蓝藻侵袭时有发

生^[2]。加快推进对新安江流域水污染的防治工作,确保千岛湖这一重要水源地的水利功能和生态功能不受破坏,已日益成为中央和相关地方环境管理工作的重点。2011 年 3 月,财政部、环保部印发《关于启动实施新安江流域水环境补偿试点工作的函》,标志着我国第一个跨流域生态补偿试点工作正式启动,由中央财政和浙江省安排专项资金,要求安徽省

收稿日期:2014-09-23; 修回日期:2014-11-11

基金项目:环保部环境规划院水污染防治综合项目(2012A012、2013A009、2014A029)

作者简介:李泽利(1984-),男,河北承德人,博士研究生,研究方向:非点源污染模型模拟与水土保持试验研究。

通讯作者:王玉秋(1965-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,研究方向:水环境管理决策与技术支持。

加快新安江上游水污染防治进程,促进水质不断改善,保证出境河段水质达到下游要求的水质标准。

大量研究及实践表明,应用非点源模型是进行流域水环境管理的有效手段。非点源模型可以定量描述流域系统及污染机理过程,识别污染产生的来源与时空分布特征,预测分析污染负荷及其对水体造成的影响,评价土地利用变化及不同管理措施对污染过程与水质的影响,从而为流域规划与污染控制管理提供决策支持。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部农业研究局开发的流域尺度半分布式水文模型,广泛地应用于径流模拟^[3]、土壤侵蚀^[4]、非点源污染^[5]、气候变化^[6]、土地利用变化^[7-9]和农业管理^[10-11]等领域,国内已经成功地用于黄河^[12-13]、长江^[7,14]、海河^[15-16]、晋江^[17]和西北黑河^[18-19]等水系的子流域以及湖库流域^[20-21],证明了SWAT模型在不同气候和下垫面条件下良好的适应性。

选取新安江的上游-屯溪流域为研究区域,基于ArcSWAT2009平台建立屯溪流域非点源污染数据库,收集2000-2010年径流、泥沙和营养盐氮的实测数据,使用SWAT-CUP程序的SUF1-2算法^[22]及模型自带的SCE-UA校准算法,基于月尺度对模型的径流、泥沙和氮循环参数进行率定和验证。采用纳氏系数等指标对模型的适用性进行评价,得到了适合该流域的模型参数体系,为进一步研究新安江流域的水环境问题打下基础,为跨区域水环境补偿工作提供科学的决策依据。

1 研究区概况

屯溪流域(地理位置:117°38'E~118°29'E,29°27'~30°6'N)位于安徽省黄山市,是以屯溪区黄口水文站为节点的新安江上游流域,主要由率水和横江两大支流汇集而成,流域面积2 674 km²。流域人口约45万人,以农业和旅游业为主,工业水平较低。研究区地处北亚热带,属于湿润性季风气候,年平均气温15°~16°C,年平均降水量1 700 mm左右,降雨量受地形因素影响显著^[23],78%的降水集中于春、夏两季,雨季水土流失较为严重。流域以山地丘陵为主,海拔115~1 614 m(图1),土壤类型以红壤、水稻土和紫色土为主,分别占54.4%,14.6%和9.8%(图2)。主要土地利用类型为林地、灌木林、水田、旱地和草地,分别占62.4%,14.6%,12.46%,5.7%和3.4%,以茶叶、油菜和水稻种植为主(图3)。

2 数据库的建立

SWAT模型数据库包括空间数据库和属性数据库。空间数据包括DEM图(图1,分辨率为90 m×90 m),土壤图(图2,2008年第二次全国土壤普查,比例尺为1:100万)和土地利用图(图3,2010年,比例尺为1:100万),分别来自中国科学院的地理空间数据云网站、南京土壤研究所和地理科学与资源研究所。将3张图统一投影到北京54坐标系(中央经度选取为117°E),并转化成栅格大小为100 m×100 m的空间图层。

模型所需的属性数据库建立过程如下。

2.1 气象数据库建立

气象数据由黄山市气象局提供。首先根据屯溪和黄山2个气象站点1956-2010年的气象数据,包括日降雨量、最高和最低气温、风速、相对湿度、日照时数等,利用SWAT官网下载的WGNmaker软件生成天气发生器参数,导入到数据库中;然后将流域内及周边的26个雨量站点2000-2010年逐日降水数据整理成规范格式的.dbf文件。

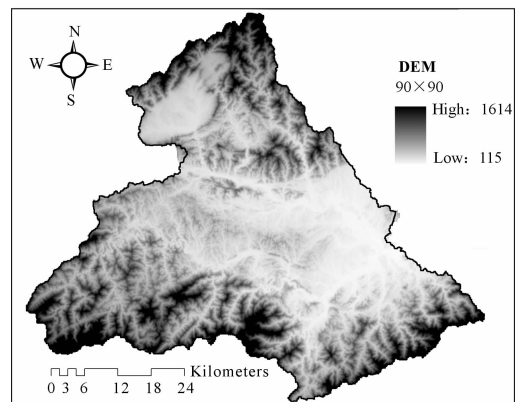


图1 屯溪流域 DEM 图

2.2 土壤数据库建立

土壤数据库包括物理属性和化学属性数据两大类。土壤的物理属性决定土壤剖面中水和气的运动状况,对水文响应单元(HRU)中的水循环起重要作用^[8];土壤的化学属性决定土壤的肥力及植物可利用性,对养分循环和非点源污染模拟起重要作用。土壤数据库建立的基础数据主要来源于中国土壤数据库网站。初始土壤类型图的制图单元为亚类,而每个亚类有多个土种,选择的原则就是以面积最大的土种来代表整个亚类,最终在该网站获得了土壤的分层数、土层深度、国际制的粒径组成、有机质含量以及土壤全氮、全磷和可溶态磷含量等基础数据。

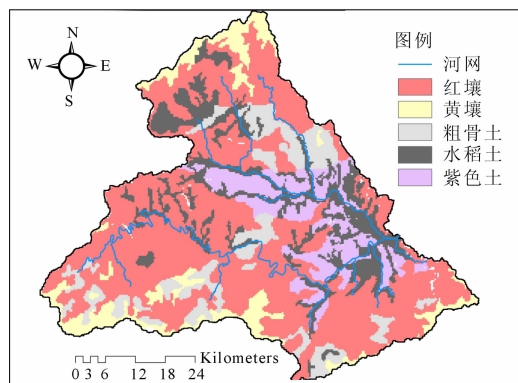


图 2 屯溪流域土壤图

土壤物理属性库建立:①利用 MATLAB 进行土壤质地转换,根据土壤颗粒分布特征和拟合效果,合理使用双参数修正的经验逻辑生长模型^[24]和线性插值法将国际制转化成美国制;②土壤水文学分组划分,根据转化后的表层土壤粒径计算土壤的渗透属性,将各个土壤分为 A、B、C、D 4 类^[25];③利用土壤水特性计算程序 SPAW,估算土壤湿密度、有效持水量、饱和水力传导系数等参数;④根据土壤粒径、有机质含量可以计算得到有机碳含量、土壤侵蚀 USLE - K 因子^[25]以及土壤反射率^[26]等参数;⑤其余参数使用默认值。屯溪流域土壤物理属性库主要参数见表 1。

表 1 屯溪流域表层土壤物理属性数据库

土壤类型	层数	水文分组	湿密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	有效持水量/ ($mm \cdot mm^{-1}$)	饱和导水率/ ($mm \cdot h^{-1}$)	有机碳/ %	粘土/ %	壤土/ %	砂土/ %	K 因子	反射率
水稻土	4	C	1.40	0.163	8.53	1.28	25.0	49.8	25.1	0.161	0.021
红壤	3	C	1.25	0.162	12.1	2.61	29.9	46.3	23.8	0.137	0.002
黄壤	3	C	1.14	0.191	27.1	3.19	22.1	57.0	20.8	0.157	0.001
紫色土	3	A	1.47	0.105	39.7	1.42	11.6	27.2	61.2	0.147	0.016
粗骨土	2	A	1.49	0.063	129.0	0.74	0.90	17.1	82.0	0.135	0.056

土壤化学属性库建立:利用土壤全氮、全磷和有效磷含量的基础数据,参考 SWAT 理论手册的经验公式估算出硝酸盐氮、有机氮和有机磷含量。

$$NO_3^-_{conc,z} = 7 \exp\left(\frac{-z}{1000}\right) \quad (1)$$

$$orgN_{ly} = 10^4 \left(\frac{orgC_{ly}}{14}\right) \quad (2)$$

$$orgP_{ly} = 0.125 orgN_{ly} \quad (3)$$

式中: z 为土壤深度; $NO_3^-_{conc,z}$ 为 z 处的硝酸盐氮含量; $orgN_{ly}$ 、 $orgP_{ly}$ 、 $orgC_{ly}$ 分别为该土层的有机氮、有机磷和有机碳含量。屯溪流域土壤化学属性库主要参数见表 2。

2.3 土地利用数据库

根据屯溪流域的土地使用情况对原始的土地利用类型重分类,并建立其与 SWAT 植被数据库的关联。根据黄山农业统计年鉴及实地调查可知,流域

内耕地主要以水稻和油菜种植为主,因此在模型中设定水田种植水稻,水浇地和旱田种植油菜。茶叶种植是黄山的特色产业,也是该地区的重要经济来源,近年来由于其经济效益种植面积逐年加大,增加了水土流失的风险。研究区内茶树品种属于灌木范畴,原始的土地利用分类未将其从灌木中解译出来,但由年鉴可计算出茶园面积占灌木林面积的 2/3,因此茶园数据库采用灌木的参数,但将其改为“施肥”模式。重新分类后的土地利用对照表和土地利用图见表 3 和图 3。

2.4 污染源及农作物管理数据库

污染源数据包括点源(工厂、污水处理厂)和非点源(大气沉降、农村生活污水、畜禽养殖和化肥施用等)数据,来自黄山市环保局以及黄山市农业统计年鉴。流域内点源较少,输入了主要的 7 家企业和 2 个县级污水处理厂。大气沉降数据使用了该地

表 2 屯溪流域表层土壤化学属性数据库

土壤类型	模型代码	全磷/%	全氮/%	硝酸盐氮/ 10^{-3}	有机氮/ 10^{-3}	有机磷/ 10^{-3}	可溶态磷/ 10^{-3}
水稻土	ZHYSHT	0.04	0.11	4.69	9.11	1.14	10
红壤	HONGR	0.04	0.25	4.69	18.64	2.33	4
黄壤	HUANGR	0.06	0.24	4.46	22.79	2.85	5
紫色土	ZST	0.04	0.12	4.25	10.11	1.26	4
粗骨土	CGT	0.07	0.06	4.93	5.30	0.66	4

表3 土地利用对照表

一级类		二级类		SWAT 分类		面积/km ²	是否施肥	
代码	名称	编码	名称	代码	分类名称			
1	耕地	11	水田	RICE	水稻	329.9	是	
		12	水浇地	CANP	油菜	151.2	是	
		13	旱田					
2	林地	21	有林地	FRST	林地	1660.3	否	
		23	疏林地					
		22	灌木林	RNGB	茶园	386.8	是	
3	草地	31	高密度草地	PAST	牧场	91.2	否	
		32	低密度草地					
4	水域	41	河渠	WATR	水域	10.2	否	
5	住宅用地	51	城镇用地	URBN	居民区	18.1	否	
		52	农村居民点					

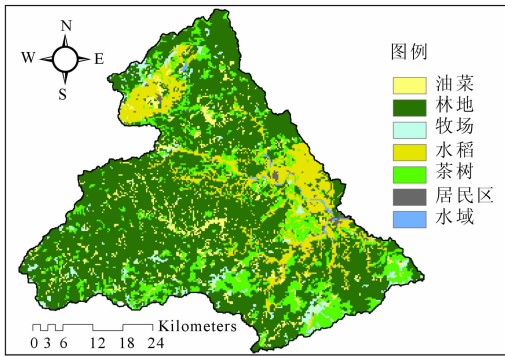


图3 重分类后的土地利用类型图

区 2012 年的观测统计数据^[1]。流域内农村人口、禽畜养殖等产生的污染物折算成尿素和过磷酸钙平均施用在不同农作物上。通过实地调研并参考 Zhai 等^[27]的研究结果,建立了当地农作物管理数据库,见表 4。

表4 屯溪流域主要农作物管理信息

代码	名称	日期	管理	施肥量/(kg·hm ⁻²)	
				尿素	过磷酸钙
RICE	水稻	05-10	播种	不施肥	
		06-20	插秧/基肥	210	225
		07-05	分蘖肥	105	0
		08-01	穗肥	210	0
		10-25	收割	收获并杀死	
CANP	油菜	10-01	播种/基肥	120	750
		11-01	提苗肥	90	0
		12-20	腊肥	45	0
		01-20	薹肥	45	0
		05-10	收割	收获并杀死	
RNGB	茶树	11-01	基肥	500	375
		02-01	催芽肥	300	0
		03-25	春肥	225	0
		07-15	夏肥	225	0

3 参数率定及适用性评价方法

输入的 DEM 及水文站点位置后最终 SWAT 模型将屯溪流域划分为 25 个子流域。由于流域地形复杂,选择复式坡度并分为 3 个等级:0~5,5~30,30~9999。设定 HRU 时,土地利用阈值取 5%,土壤类型阈值取 20%,坡度阈值取 20%,共生成 252 个 HRU。潜在蒸散发选择 Penman-Monteith 方法,地表径流采用 SCS 径流曲线数法,河道汇流采用变动存储系数方法。

基于月尺度的径流量、产沙量和溶解态氮负荷的观测值对相应的参数进行率定。以 2000 年数据为模型“预热期”,2001-2007 年数据为调试与率定期,2008-2010 年数据为模型验证期。参数率定过程把握以下 3 点原则:①遵循先上游后下游的原则,即先分别调整新亭和月潭控制的子流域(两个站点无上下游关系)参数,再利用黄口的数据调整其余子流域参数;②先调整径流参数,再调整产沙量参数,最后调整氮循环参数;③通过查阅资料和计算得到的土壤数据库参数(SOL_Z、SOL_AWC 等)、由 DEM 提取得到的地形特征参数(SLOPE 等)先不调整,先调整难以获得的、集总性质的参数,如果率定效果不好,再考虑调整上述类型的参数。研究中径流和溶解态氮参数率定过程使用了 SWAT-CUP 程序的 SUFI-2 算法,泥沙参数优选使用模型自带的 SCE-UA 算法。由于 CN 值对于径流和泥沙模拟是最为敏感和关键的参数,因此在调整 CN 值时,综合考虑土地利用类型、土壤水文组等特征(不考虑坡度影响),赋予每个 HRU 不同的 CN 值初始范围,该范围主要参考了 SWAT 模型手册给定。

选取相对误差 Re 、相关系数 R^2 及纳氏系数 NS ,

作为模型适用性评价指标,公式如下:

$$Re = \frac{\overline{Q_p} - \overline{Q_o}}{\overline{Q_o}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \overline{Q_p})(Q_{oi} - \overline{Q_o})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \overline{Q_p})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2} \quad (6)$$

式中: Q_{oi} 为观测值; Q_{pi} 为模拟值; $\overline{Q_o}$ 为多年平均观测值; $\overline{Q_p}$ 为多年平均模拟值; n 为样本个数。一般认为 NS 和 $R^2 > 0.75$ 且 $\pm Re < 10\%$, 模型适用性非常好; NS 和 $R^2 \leq 0.50$ 、 $\pm Re \geq 25\%$, 模型拟合精度不满意; 介于两者之间则认为模型适用性和拟合精度比较令人满意^[28]。除了上述 3 个指标外,还要比较模拟值 - 实测值过程线拟合效果合理与否。

4 结果与分析

4.1 径流模拟

径流模拟过程调整的参数及其取值范围见表 5

和表 6。表 5 中 CN 值的精细化率定结果表明,土地利用类型和土壤水文组是决定 CN 值的主要因素,但不同子流域具有相同土地利用和土壤类型的 CN 值也略有差异。表 6 主要调整了影响径流过程的集总参数。新亭、月潭、黄口的径流模拟的评价结果显示,对于 R^2 和 NS 指标,除新亭验证期略低外,其余均 > 0.930 ; 对于 Re 指标,均在 15% 以内(表 7); 新亭(图 4)、月潭(图 5)和黄口(图 6a)水文站径流模拟值与实测值的流量过程线也比较吻合。总体上讲,SWAT 模型在屯溪流域月尺度上径流模拟的适用性非常好。

表 5 径流曲线数(CN)的率定

土地利用	土壤水文学组	初始范围	最终取值		
			新亭	月潭	其余
FRST	A	30 ~ 45		31.50	33.60
	C	70 ~ 77	74.89	74.73	76.65
RNGB	A	30 ~ 48		35.94	37.55
	C	65 ~ 77	76.40	76.88	76.82
CANP	A	51 ~ 63		57.00	62.30
	C	74 ~ 86		74.90	83.82
RICE	A	58 ~ 65			61.29
	C	77 ~ 84		78.02	80.43
PAST	A	30 ~ 68		33.99	
URBN	A	85 ~ 95			90.00

表 6 屯溪流域径流过程参数的率定

参数	模拟过程	描述	参数范围	最终取值		
				新亭	月潭	其余
SURLAG	地表径流	地表径流滞后系数	0 ~ 10	4	4	4
ESCO	蒸散	土壤蒸发补偿系数	0.01 ~ 1	0.84	0.68	0.51
CANMX	蒸散	植被冠层截留量	0 ~ 5	1.12	0.03	1.45
ALPHA_BF	地下水	基流 α 系数	0 ~ 1	0.73	0.78	0.89
GW_DELAY	地下水	地下水延迟天数	30 ~ 50	34	23	12
GW_REVAP	地下水	地下水蒸发系数	0 ~ 0.2	0.079	0.125	0.158
REVAPMN	地下水	浅层地下水蒸发发生的临界值	0 ~ 10	1.59	9.75	7.50
GWQMN	地下水	浅层地下水回归流产生的临界值	0 ~ 2	1.13	0.99	0.18
CH_N2	河道汇流	主河道曼宁系数	0 ~ 0.3	0.238	0.125	0.189
CH_K2	河道汇流	主河道有效水力传导度	5 ~ 50	9.57	43.0	9.95

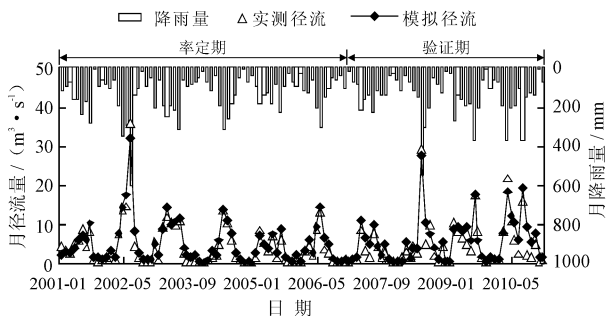


图 4 新亭站月径流过程模拟

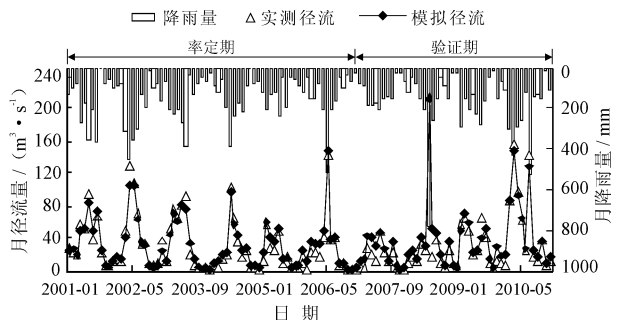


图 5 月潭站月径流过程模拟

4.2 泥沙模拟

泥沙模拟过程调整的主要参数及取值范围见表8。针对不同土地利用和管理方式,调整 MUSLE 方程中的土地覆被(C因子)和水土保持因子(P因子);调整影响河道泥沙输移演算的参数,包括计算挟沙能力的线性系数和指数系数,主河道和支流河道泥沙演算的洪峰速率调整因子,以及河道侵蚀和覆盖因子。率定期与验证期泥沙负荷的 R^2 和 NS 值均 > 0.84 ,效果较好,但相对误差 Re 却较大。这是因为在屯溪流域内:①枯水期基本检测不到泥沙(实测值为0,见图6(b));②强降雨事件主要发生在5-7月,洪水携带大量泥沙涌入河道,且退水也较快,观测值与实际情况可能存在较大误差。总体来说,SWAT模型对研究区泥沙负荷的模拟精度是可以接受的,可以用来预测泥沙负荷。

表7 径流量率定和验证结果统计指标

模拟	水文站	率定期(2001-2006)			验证期(2007-2010)		
		R^2	NS	$Re/\%$	R^2	NS	$Re/\%$
径流	新亭	0.947	0.930	10.20	0.871	0.847	13.40
	月潭	0.946	0.934	9.73	0.961	0.951	9.19
	黄口	0.957	0.948	8.91	0.975	0.963	11.50
泥沙	黄口	0.857	0.840	20.90	0.954	0.878	-11.70
溶解态氮	黄口	0.801		14.40	0.826		15.80

注:由于溶解态氮数据不连续,故不统计其 NS 指标。

表8 屯溪流域产沙过程参数的率定

参数	描述	参数范围	最终取值
SPCON	挟沙能力线性指数	0.0001~0.01	0.0006
SPEXP	挟沙能力幂指数	1~2	1.669
PRF	主河道洪峰速率调整因子	0~2	0.9
ADJ_PKR	支流洪峰速率调整因子	0.5~2	0.8
CH_COV1	河道侵蚀因子	-0.05~1	0.170
CH_COV2	河道覆盖因子	-0.001~1	0.766
USLE_C	USLE 植物覆盖因子最小值	0.001~0.5	林地、草地 0.003;耕地0.03
USLE_P	USLE 水土保持措施因子	0~1	林地、草地 0.9;耕地0.3

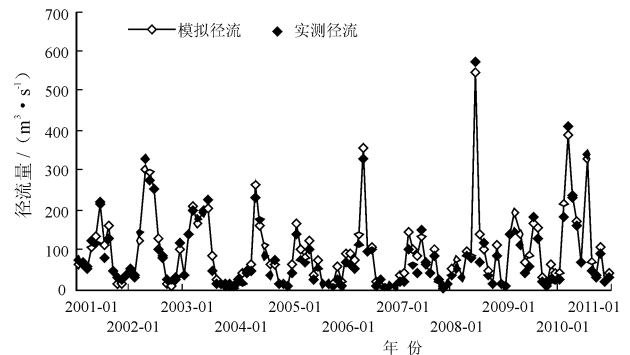
4.3 溶解态氮模拟

SWAT模型中考虑的氮素包括硝酸盐、亚硝酸盐氮、氨氮和有机氮,此处溶解态氮指的是前三者之和,主要率定的参数及取值范围见表9,其中降水中氮的浓度(RCN)和浅层地下水中硝酸盐浓度(SHALLST_N)的初始范围来自于当地观测值^[1]。从率定和验证结果来看(表7),率定期和验证期相关系数 R^2 平均 > 0.80 ,相对误差 Re 在15%左右,

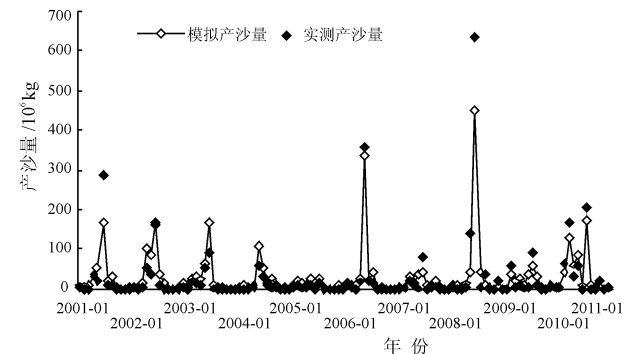
拟合精度令人满意,SWAT模型可以应该用于该流域的营养盐模拟。从图6(c)也可以看出,SWAT模型能很好地捕捉到溶解态氮负荷的峰值和谷值。

表9 屯溪流域营养盐参数的率定

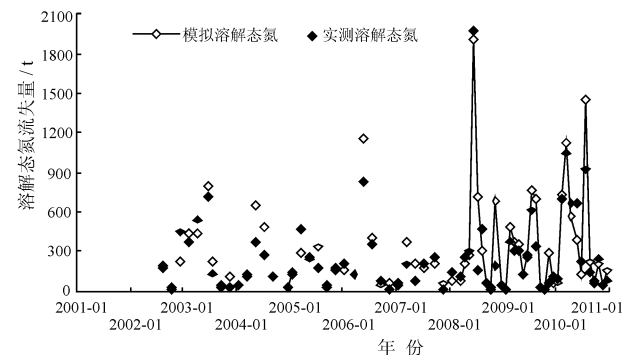
参数	描述	参数范围	最终取值
CDN	反硝化指数速率系数	0~3	2.64
CMN	腐殖质矿化速率系数	0.0001~0.003	0.0010
SDNCO	反硝化发生的含水量临界值	0.9~1.2	0.920
N_UPDIS	氮吸收分布参数	0~100	43.4
NPERCO	氮渗透系数	0~1	0.875
RSDCO	作物残留矿化率	0.002~0.1	0.086
RCN	降水中氮的浓度	0~2	1.90
SHALLST_N	浅层地下水硝酸盐初始浓度	0~10	1.43
HLIFE_NGW	浅层地下水硝酸盐半衰期	0~200	126.0



(a) 径流



(b) 产沙量



(c) 溶解态氮

图6 黄口站径流、泥沙和溶解态氮模拟与实测数据比较

5 结 语

本文基于 SWAT 模型建立了新安江屯溪流域的非点源污染数据库,并根据流域内 2000 - 2010 年的气象、水文和水质数据,对流域的径流、泥沙以及溶解态氮负荷进行率定和验证,选取纳氏系数、线性相关系数和相对误差 3 个指标进行模型适用性评价,结果表明:屯溪流域径流量、泥沙和氮负荷的模拟值和实测值存在着较好的一致性,SWAT 模型对于我国南方湿润地区中尺度径流、泥沙和非点源污染模拟具有较好的适应性和可靠性。根据校准好的模型参数可进一步研究该流域的水环境问题,进行氮、磷等污染物的来源解析、时空分布特征及关键区识别研究,通过解译不同时期的遥感影像来评价土地利用变化对污染过程与水质的影响,还可以对生态补偿项目所实施的管理措施进行绩效评估,以期作为跨流域水环境补偿工作提供科学的决策依据。

致谢:感谢黄山市环保局和黄山市环境监测站提供的基础监测数据;感谢中科院地理空间数据云网站、中国土壤数据库网站;感谢环保部环境规划院对此项目的大力支持。

参考文献:

- [1] Li Zeli, Liu Maohui, Zhao Yue, et al. Application of regional nutrient management model in tunxi catchment: in support of the trans-boundary eco-compensation in eastern China [J]. *Clean - Soil, Air, Water*, 2014, 42 (12): 1729 - 1739.
- [2] 谭湘萍, 闵 怀. 千岛湖生态环境主要问题及保护对策 [J]. *环境污染与防治*, 2004, 26(3): 200 - 203.
- [3] 张 东, 张万昌, 朱 利, 等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究 [J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 434 - 440.
- [4] 肖军仓, 罗定贵, 王忠忠. 基于 SWAT 模型的抚河流域土壤侵蚀模拟 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 14 - 18 + 24.
- [5] 罗 倩, 任 理, 彭文启. 辽宁太子河流域非点源氮磷负荷模拟分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 178 - 186.
- [6] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应 [J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 71 - 82.
- [7] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 833 - 836.
- [8] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 290 - 299.
- [9] 孙丽娜, 卢文喜, 杨青春, 等. 东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(8): 1459 - 1467.
- [10] 许其功, 席北斗, 于会彬, 等. 土地管理措施对营养物质排放的影响 [J]. *环境科学*, 2009, 30, (11): 3243 - 3248.
- [11] 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.
- [12] 罗睿, 徐宗学, 程 磊. SWAT 模型在三川河流域的应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(5): 28 - 33.
- [13] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI - 2 算法的渭河流域月径流分布式模拟 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5): 490 - 496.
- [14] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 267 - 275.
- [15] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 105 - 111.
- [16] 王中根, 朱新军, 夏 军, 等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4): 1 - 6.
- [17] 林文娇, 王 林, 陈兴伟. 晋江东溪流域土壤侵蚀分布式模拟 [J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(3): 38 - 40 + 44.
- [18] 胥彦玲, 秦耀民, 李怀恩, 等. SWAT 模型在陕西黑河流域非点源污染模拟中的应用 [J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 114 - 117 + 219.
- [19] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用 [J]. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 8 - 15.
- [20] 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(自然科学版)*, 2006, 46(3): 355 - 359.
- [21] 李 爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 的南四湖流域非点源氮磷污染模拟 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 236 - 242.
- [22] Abbaspour K C, Johnson A M, van Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure [J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(4): 1340 - 1352.
- [23] 何文英, 毕孟飞, 李泽利, 等. 新安江流域降雨量空间插值方法和参数筛选 [J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 130 - 134.
- [24] 刘建立, 徐绍辉, 刘 慧. 几种土壤累积粒径分布模型的对比研究 [J]. *水科学进展*, 2003, 14(5): 588 - 592.
- [25] 郑海金, 杨 洁, 喻荣岗, 等. 红壤坡地土壤可蚀性 K 值研究 [J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 425 - 428.
- [26] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 21 - 27.
- [27] Zhai Xiaoyan, Zhang Yongyong, Wang Xuelei, et al. Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 1627 - 1640.
- [28] 翟晓燕, 夏 军, 张永勇. 基于 SWAT 模型的沙澧河流域径流模拟 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(2): 142 - 145 + 155.