

基于原位土壤观测的 SWAT 关键参数及模拟优化分析

欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 郝芳华

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要:利用现场观测土壤属性数据,对基于传统数据库的率定值和监测数据的参数计算值进行模拟结果对比分析。以三江平原阿布胶河流域的现场观测数据,通过物理机制中公式或模型,计算得到 SWAT 模型关键土壤属性参数的值,再进行两次 SWAT 模型的模拟。先运用基于土壤数据库参数率定值模拟,再用观测数据计算的参数值替换掉部分率定的参数值;与已经率定好的模型进行对比,评价参数计算的结果。结果表明, SOL_AWC、SOL_K、SOL_BD 和 USLE_K 等 4 个参数在基于数据库的率定值和观测数据计算值之间有显著性差异,而 SOL_CRK 的率定值和基于观测数据的计算值之间无显著性差异。两种模拟结果相比,发现基于观测数据的农业面源负荷在数值上不存在显著性差异,且在年尺度和月尺度上具有相同的变化规律。结果表明基于观测数据的 SWAT 模型能够很好地模拟农业面源负荷在时间尺度上的变化规律。

关键词:SWAT 模型;土壤观测;参数计算;农业面源污染

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1601-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.019

Optimization of Key Parameters for SWAT Model Based on Field Soil Observation

OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, HAO Fang-hua

(School of Environment, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, onsite observed soil data were used to calculate the values of five key soil parameters by physically based mathematical formula and model in the Abujiao River basin in Northeastern China. Then two simulations of agricultural diffuse pollution were performed with SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. One model simulation was based on calibrated parameter values, while the other simulation was based on calculated parameter values. There were considerable differences between calibrated parameter values and calculated ones for SOL_AWC, SOL_K, SOL_BD and USLE_K, but no significant difference found for SOL_CRK. However, two simulations showed no significant difference in the agricultural diffuse loads. They also had similar dynamics both on yearly and monthly scales. Therefore, SWAT model based on observed soil data could be a good simulation on agricultural diffuse pollution, especially in watersheds without monitoring data on hydrology and water quality.

Keywords: SWAT model; soil observation; parameter calculation; agricultural diffuse pollution

国内外对 SWAT 模型的关键参数的敏感性和可靠性进行了深入的研究^[1-2], SWAT 模型的模拟精度与关键参数有密切关系。鉴于模拟结果受到区域地理条件、气候条件、土壤条件、土壤结构、土地利用方式、植被覆盖和降水过程等诸多参数的影响,分析关键参数对模拟结果的不确定性是提高模拟精度的主要途

径^[3]。在参数不确定性和敏感性分析中,输入的空间属性数据和耕作设置是制约敏感参数的因子^[4]。

在敏感性参数确定后,需进行参数校准和验证,用多目标函数进行权衡,可优化参数率定的结果^[5]。在常规农业面源污染模拟研究中,需先后对水文、沉积物和营养物质进行参数率定^[6]。在参数率定和模型验证阶段,观测数据的可用性能对模型的运行情况产生影响,因此观测数据需要有较高的样本频率和较长的观测时间^[7]。在有长时段有效监测和空间输入数据的 SWAT 模型模拟中,基于实测数据的参数率定及验证是常规、有效的方法。但在很多案例区,

收稿日期:2014-02-22

基金项目:农业行业公益项目(20103014);中央高校基本科研业务费专项资金;教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介:欧阳威(1980—),男,江西萍乡人,主要研究方向为水文水资源,非点源污染控制。E-mail:wei@bnu.edu.cn

输入数据总是不足的,尤其是缺乏有效的、长时段的水文和水质监测数据。在有土壤及水文监测数据的区域,在参考以往 SWAT 案例参数值的基础上,可以利用监测数据来计算模型系统中的相关参数,优化 SWAT 模型数据库。在无水文监测数据的区域,则主要通过参考与案例流域有着相似降水、土壤理化、土地利用和农业耕作等特征的已经得到率定的 SWAT 参数^[8-9]。

我国全国性的土壤数据库已经老化,严重制约 SWAT 模型模拟的准确性,由于 SWAT 模型是基于物理机制的水文模型, SWAT 模型的参数有实际的物理意义^[10]。 SWAT 模型系统中的初始值均是在基于美国德州 Temple station 实验站的监测数据计算而来,与我国各个区域的实际情况有较大出入,尤其是模型自带土壤数据库使用的数据标准和我国现有的数据标准不一致,因此直接借用基于我国土壤数据库进行参数率定的参数,将给模拟带来较大的不确定性。本文在现场观测数据的基础上,计算 SWAT 模型的 5 个关键参数,将计算值与基于数据库 SWAT 模型的率定值及基于两种类型参数的模拟结果进行对比,进而分析基于土壤观测数据的参数计算值对 SWAT 模拟效果的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

案例研究选取位于三江平原农业开发区域的阿布胶河流域(47.25°N, 134.02°E),流域面积 141.5 km²。海拔西高东低,最高处位于西部,海拔 129 m;最低处位于东部,海拔 38 m。区域气候条件是寒温带大陆性季风气候,年平均降水量为 583.18 mm,降水主要集中在 5—9 月。依据中国 1:100 万土壤空间数据,

研究区土壤划分为草甸土、草甸白浆土、沼泽土、白浆土、潜育白浆土、暗棕壤土等 6 种类型(图 1)。用 1.5 km×1.5 km 的网格单元,在研究区内采样点位 149 个,每点采集 0~20 cm 及 20~40 cm 两层土壤样品。采样时间为 2011 年 4 月施肥翻地之前(4 月 22 日—30 日),并避开田埂、路边、农舍及明显受到扰动的土壤。每个样点采集 5 个重复样品并用手混匀后密封在塑料袋中。土壤属性、具体采样方法及分析流程见文献^[11]。

1.2 关键参数的筛选及评价

基于已有监测及案例研究数据,运用常规流程,在阿布胶河流域开展了 SWAT 模拟研究,具体参数率定和模拟结果见文献^[12]。在现场观测和 SWAT 模型敏感性分析的基础上,选择关键参数。土层有效水含量、土壤容重、饱和水力传导系数、土壤孔隙度和 USLE 方程中的土壤侵蚀因子 5 个参数(表 1)是表征土壤特性的重要参数。LH-OAT 灵敏度分析^[13]表明 SWAT 的模拟结果对这 5 个参数较为敏感。

针对这 5 个敏感参数,本研究进行基于原位土壤观测数据的计算,并用计算值替换 SWAT 系统率定的参数值。在土壤观测数据中,土壤粒径分布的精度为 0.001%,有机碳含量 orgC、总氮 TN、水溶性 N、总钾 TK、速效 K、总磷 TP、有效 P 的精度为 0.000 1%,阳离子交换容量 CEC 的精度为 0.000 01 cmol(+).kg⁻¹, pH 的精度为 0.01。对这 5 个敏感参数的模型率定值和基于观测数据的计算值开展差异分析,并利用这两种类型的参数值开展农业面源污染模拟。由于研究区是小流域,缺少常规监测数据,进而无法获取面源污染的实测值。在国际上,基于参数率定的模型模拟是被广泛接受的解决方法,其模拟的结果和精度是可靠的^[14-15]。本研究将基于参数率定的模拟结果视为准确

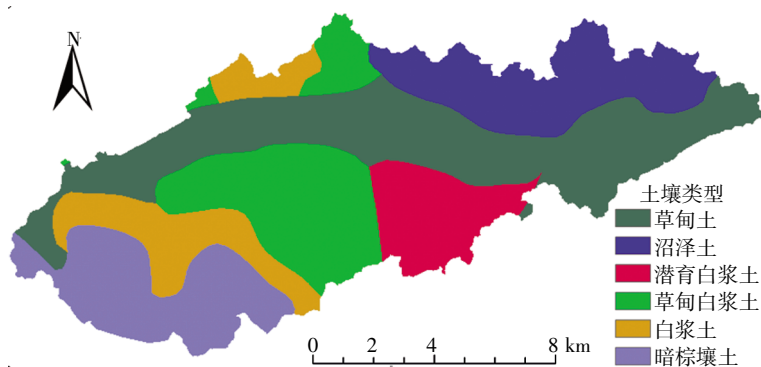


图 1 研究区土壤类型图

Figure 1 Soil types of study area

表 1 SWAT 参数的物理意义

Table 1 Physical definition of parameters for SWAT model

物理意义	参数名称	单位
土层有效水含量	SOL_AWC	fraction or mm H ₂ O
土壤容重	SOL_BD	t·m ⁻³
饱和水力传导系数	SOL_K	mm·h ⁻¹
土壤孔隙度	SOL_CRK	%
USLE 方程中的土壤侵蚀因子	USLE_K	0.013(metric ton m ² h)/(m ³ -metric ton cm)

可靠的农业面源污染负荷值。通过与基于参数率定的模拟结果进行对比,评判基于观测数据的模拟结果的精度和可靠性。本文主要运用相关性分析和 t 检验进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 基于观测值的关键参数计算

2.1.1 土层有效水含量、土壤容重、饱和水力传导系数

土层有效水含量、土壤容重、饱和水力传导系数是表征土壤水分特性的重要参数。在计算过程中,需输入粘粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)的含量信息,但由于我国土壤属性实测的粒径分布数据是以 0.002 mm、0.2 mm、2 mm 划分的,需选用土壤累积粒径的土壤对数正态分布模型^[16],由实测的累积粒径分布数据,来计算粘粒、粉粒和砂粒的含量。

$$C = C_1 + \frac{\lg D - \lg D_1}{\lg D_2 - \lg D_1} (C_2 - C_1)$$

式中: C 是对应于颗粒直径 D 的待估计的累积百分含量; C_1 和 C_2 分别是对应于两个相邻直径为 D_1 和 D_2 ($D_1 < D < D_2$) 的实测百分含量。

计算结果(表 2)表明,前述 6 种土壤机械组成有较大的差异性,尤其是白浆土和潜育白浆土的粘粒含量较少,而砂粒含量较高。在垂向上,除沼泽土外,其他 5 种土壤的表层粘粒含量均比深层少。由于本研究区土壤是在草地和湿地上开垦而来,随着集约化耕作的扰动,表层土壤机械组成受到干扰,而沼泽土主要分布在未开发的湿地区域,保有以往的机械组成。

在获得土壤的粘粒、砂粒和有机质含量信息后,借用 SPAW(Soil-Plant-Atmosphere Water System)模型的 Soil Water Characteristics 模块^[17],对 6 个土壤水分特征参数进行计算,结果见表 3。6 类土壤的 6 个土壤物理参数除土壤容重外,在类型上的差异较少,但垂向差异较大,表层土壤凋萎系数均大于底层,尤其是

表 2 各类型土壤的粘粒、粉粒和砂粒组成

Table 2 Clay, silt and sand contents of different soils

土壤代码	土壤类型	土层深度/cm	粘粒/% <0.002 mm	粉粒/% 0.002~0.05 mm	砂粒/% 0.05~2 mm
A	草甸土	0~20	5.624	30.758	63.618
		20~40	5.783	29.997	64.220
B	沼泽土	0~20	5.645	33.781	60.574
		20~40	4.985	32.520	62.495
C	草甸白浆土	0~20	4.926	30.526	64.548
		20~40	6.085	34.150	59.765
D	暗棕壤	0~20	6.180	34.380	59.440
		20~40	7.972	36.195	55.833
E	白浆土	0~20	3.956	23.844	72.199
		20~40	6.561	35.096	58.343
F	潜育白浆土	0~20	4.290	27.290	68.420
		20~40	5.085	33.219	61.696

土壤饱和含水量和饱和水力传导率,差异明显,而土壤容重有着相反的规律。土壤水分系数的差异表明,在进行农业面源污染模拟过程中,虽然土壤类型会影响模拟结果,但土壤本身的垂向差异引入的不确定性和差异更值得关注,也影响污染物的垂向运移,土壤水分的垂向差异也同样证明农业耕作对土壤属性的影响。

2.1.2 土壤孔隙度

在获得土壤容重的基础上,借鉴下式开展土壤孔隙度计算^[18]:

$$\text{SOL_CRK} = 93.947 - 32.995 \cdot \text{SOL_BD}$$

式中: SOL_BD 为土壤容重。

把 6 类土壤两层的土壤容重信息代入上式,计算不同土地类型的土壤孔隙度,结果见表 4。由于土壤孔隙度和土壤容重是一维线性关系,不同土壤类型和深度的土壤孔隙度差异与土壤容重一致,表层土壤的孔隙度均大于深层。

2.1.3 土壤侵蚀因子

本研究采用土壤侵蚀通用方程^[19],计算土壤侵蚀因子。把由土壤累积粒径的土壤对数正态分布模型计算得到的 m_c 、 m_{sil} 、 m_s 和实测的 orgC 代入该方程,得到 6 种土壤类型的土壤侵蚀因子 USLE_K 的值(表 5)。

2.2 模型自动率定值和计算值的差异分析

将基于土壤数据库率定后的参数值与基于实测数据计算得到的参数值进行对比分析(图 2)。在 5 个关键参数中, SOL_AWC、SOL_K、SOL_BD 和 USLE_K 等参数的率定值和基于观测数据的计算值之间存在不同程度的差异。对这 5 组数据进行配对 t 检验,置

表3 各类型土壤的水分特性

Table 3 Water characteristics of different soils

土壤代码	土层深度/cm	凋萎系数/%Vol	田间持水量/%Vol	饱和含水量/%Vol	土层有效水含量/%Vol	饱和水力传导系数/mm·h ⁻¹	土壤容重/g·cm ⁻³
A	0~20	7.1	18.5	50.6	11.4	84.334	1.31
	20~40	5.7	16.1	45.9	10.4	70.774	1.43
B	0~20	6.7	18.5	49.2	11.9	76.477	1.35
	20~40	4.7	15.2	44.2	10.5	68.907	1.48
C	0~20	6.7	18.0	50.7	11.3	90.071	1.31
	20~40	5.3	16.3	43.8	11.0	58.741	1.49
D	0~20	7.0	19.0	49.1	12.1	72.223	1.35
	20~40	5.9	17.4	42.0	11.4	42.714	1.54
E	0~20	6.9	16.8	52.7	9.9	112.955	1.25
	20~40	5.0	16.0	41.9	11.0	50.614	1.54
F	0~20	6.6	17.2	51.4	10.6	101.461	1.29
	20~40	4.8	15.5	44.2	10.7	67.308	1.48

表4 各类型土壤孔隙度 SOL_CRK

Table 4 SOL_CRK of different soils

土壤代码	0~20 cm	20~40 cm
A	50.71	46.60
B	49.52	45.19
C	50.84	44.79
D	49.46	43.21
E	52.57	43.14
F	51.47	45.18

信区间为95%,其观测值 t 对应的概率 P 值均小于显著性水平0.05,进一步说明这4个参数的率定值和基于观测数据的计算值之间有显著性差异。由于研究区面积较小,基于全国土壤数据库得到的土壤有效含水量和饱和水力传导系数均是一个值,而基于观测的可以提供不同土壤类型不同深度的特征值,能提供更加

准确、客观的参数。其中,土层有效水含量和饱和水力传导系数的率定值均大于基于观测数据的计算值,土壤容重的率定值整体上大于基于观测数据的计算值,有2个土壤容重参数率定值没有落入1.1~1.9 g·cm⁻³合理的范围内,而土壤侵蚀方程中的 K 因子的率定值整体上小于基于观测数据的计算值。土壤孔隙度在不同土壤类型上存在较大差异,尤其是白浆土孔隙度计算值与率定值差异明显,表明最近一段时间的耕作对白浆土孔隙度影响明显。

将这5个参数中的两类数据进行 t 统计分析(表6),土层有效水含量、土壤容重、饱和水力传导系数和USLE方程中的土壤侵蚀因子均存在显著差异。仅土壤孔隙度的率定值和观测数据的计算值很接近, t 检验值为-0.499,对应的概率 P 值为0.639,大于显著性水平0.05,表明土壤孔隙度的率定值和基于观测数据的计算值之间无显著性差异。

2.3 年尺度模拟结果差异性分析

将这5个参数的率定值和基于观测数据的计算值分别代入SWAT模型,模型的其他参数见文献[15],开展农业面源氮磷污染模拟分析。结果表明总氮负荷的两次模拟结果随着年份均有较大的波动,但时间尺度的变化趋势基本一致(图3)。在2001—2004年间两次模拟的总氮年负荷均呈下降趋势,在2004—2006年间均呈上升趋势,在2006—2008年间均呈下降趋势,在2008—2010年间均呈上升趋势。两次模拟结果的Pearson相关系数为0.809,表明两次模拟的总氮年均负荷有很强的相似性。对于总磷负荷,两次模拟结果随着年份均有较大的波动,且变化趋势有一定的相关性。两次模拟的总磷年负荷呈现先下降后上升

表5 各类型土壤侵蚀因子 USLE_K

Table 5 USLE_K of different soils

土壤代码	土层深度/cm	KUSLE
A	0~20	0.182 6
	20~40	0.183 1
B	0~20	0.184 8
	20~40	0.187 3
C	0~20	0.183 1
	20~40	0.187 3
D	0~20	0.184 5
	20~40	0.187 2
E	0~20	0.172 4
	20~40	0.188 4
F	0~20	0.179 6
	20~40	0.187 6

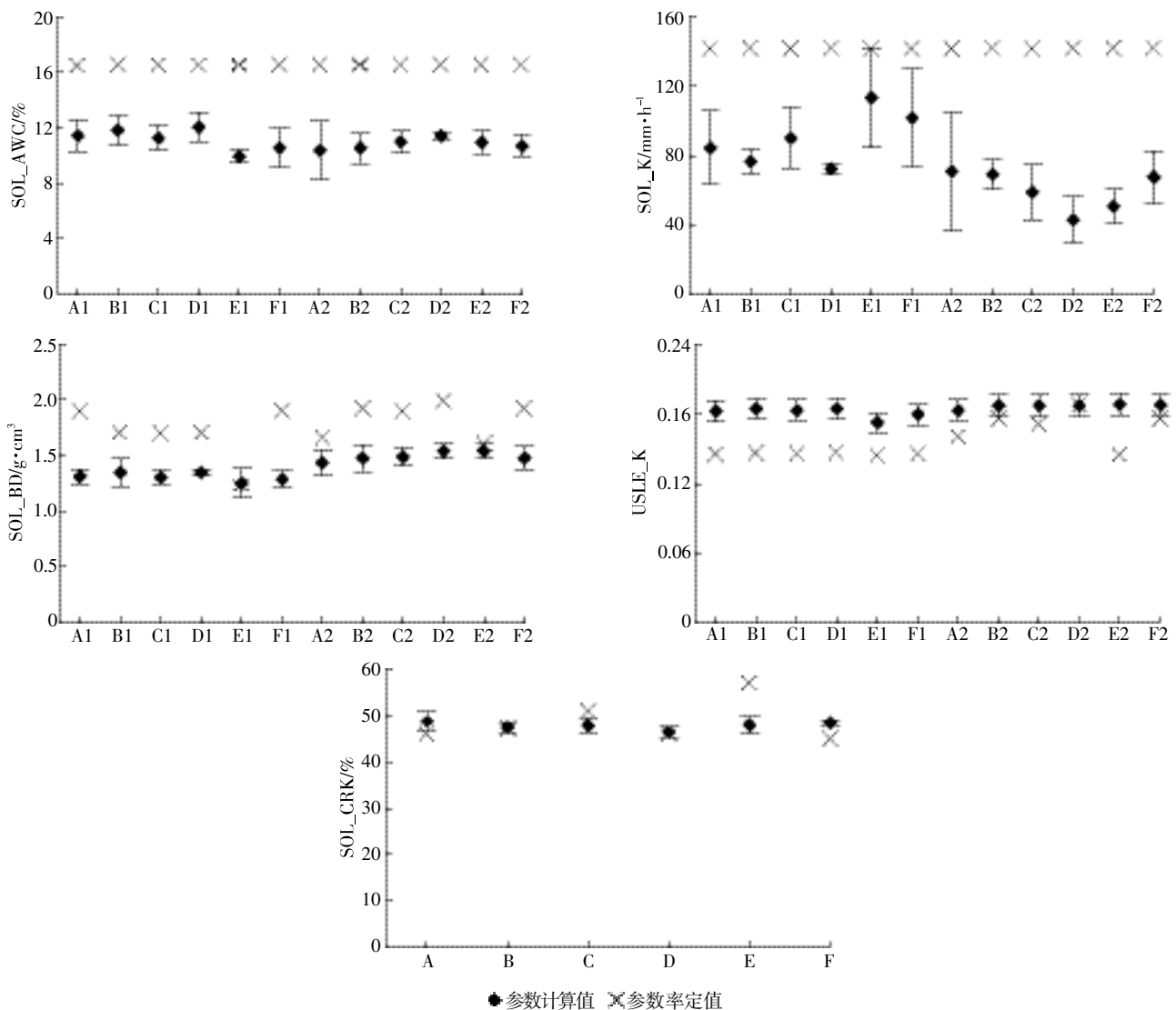


图2 参数的率定值和基于观测数据的计算值之对比(1指0~20 cm深土壤层,2指20~40 cm深土壤层)

Figure 2 Comparisons of calculated parameter values based on observed data with calibrated parameter values

的变化规律,在2001—2007年间均呈下降趋势,在2007—2010年间均呈上升趋势。两次模拟结果的Pearson相关系数为0.630。整体来看,2次模拟的结果有很强的相关性,总磷的相关性小于总氮,表明基于观测值的参数改进对磷的输出作用更加明显。

对两次模拟的总氮负荷进行配对统计分析和 t 检验(表7)。基于10年的年均统计分析表明两次模拟结果差异不大,尤其是多年平均值误差较小,表明

模型有较强的适用性。 t 检验置信区间为95%,总氮 t 值为0.583,对应的概率 P 值为0.574,大于显著性水平0.05。对两次模拟的总磷负荷进行配对 t 检验,总磷 t 值为-0.933,对应的概率 P 值为0.375。因此,对两次模拟农业面源负荷进行统计分析,结果表明2001—2010年期间两次模拟的农业面源负荷在年尺度上差异较小。

2.4 月尺度模拟结果差异性分析

在年尺度农业面源氮磷模拟的基础上,进行2001—2010年期间月均负荷对比分析,两次模拟的农业面源总氮和总磷的负荷变化基本一致(图4)。在春季的4—5月和夏季的8—9月,总氮负荷和总磷负荷有2次峰值。这和阿布胶河所处的地理位置有很大关联。阿布胶河处于中高纬度冻融区,每年有春汛和

表6 参数的率定值和基于观测数据的计算值之配对 t 检验

Table 6 Paired t test for calculated parameter values based on observed data and calibrated parameter values

关键参数	SOL_AWC	SOL_K	SOL_BD	USLE_K	SOL_CRK
观测值 t	-30.554	-11.458	-6.579	6.444	-0.499
概率 P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.639

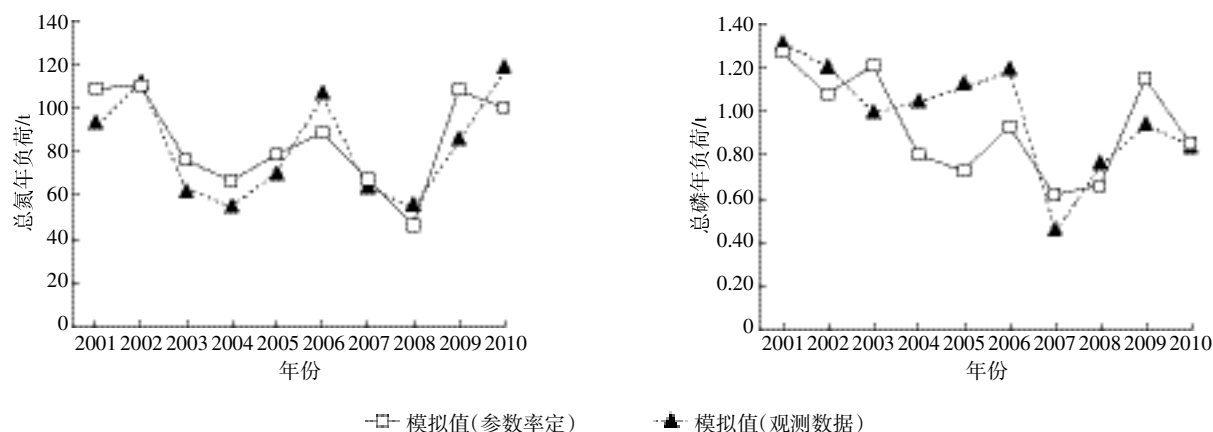


图3 两次模拟农业面源负荷的年际变化

Figure 3 Interannual variation in agricultural diffuse loading of two simulations

表7 基于系统率定参数值(a)和基于观测数据输入参数(b)值
年平均农业面源污染分析(t)Table 7 Statistical analysis for interannual variation in agricultural
diffuse loading of two simulations(t)

统计项目	总氮(a)	总氮(b)	总磷(a)	总磷(b)
均值	85.26	82.61	0.93	0.99
均值的标准误	6.87	7.64	0.07	0.08
标准差	21.72	24.17	0.23	0.25
方差	471.91	584.07	0.06	0.06
全距	63.94	63.63	0.65	0.85
极小值	46.49	55.28	0.62	0.46
极大值	110.42	118.90	1.27	1.31
相关系数	0.809		0.630	
配对t检验 $\frac{t}{P}$	0.583		-0.933	
	0.574		0.375	

夏汛两个汛期。由于农业面源污染负荷的产生和径流过程密切相关,两个汛期的径流量较大,故流域的农业面源污染负荷产生量也较大。

总氮和总磷的峰值差异有所不同。7月之前基于观测值的总氮模拟值小于基于率定参数值的模拟,而在10月开始的冬季,则有着相反的规律。总磷在4月份的月均负荷明显大于其在8月份的负荷值,主要与总磷负荷的流失特征和研究区的气候特征有关。总磷负荷的流失以颗粒态的磷(即泥沙结合形式)为主,以颗粒态流失的磷约占总磷流失负荷的70%以上^[20]。流失的泥沙越多,总磷的流失负荷也越大^[21]。其次,研究区处于东北三江平原冻融农区,在4月份农田的积雪大量融化,产生大量的地表径流;地表没有植被覆盖,水土流失量大,导致总磷的流失负荷较大。而在8月份,由于土壤被植被覆盖,泥沙流失较小,因而导致总

磷流失较小。

对两次模拟的总氮和总磷月负荷进行统计分析(表8)。配对t检验,置信区间为95%,其观测值t为-0.552,对应的概率P值为0.592,大于显著性水平0.05,则两次模拟的总氮负荷无显著性差异。同理,对两次模拟的总磷月负荷进行配对t检验,其观测值t为-0.560,对应的概率P值为0.587,大于显著性水平0.05,则两

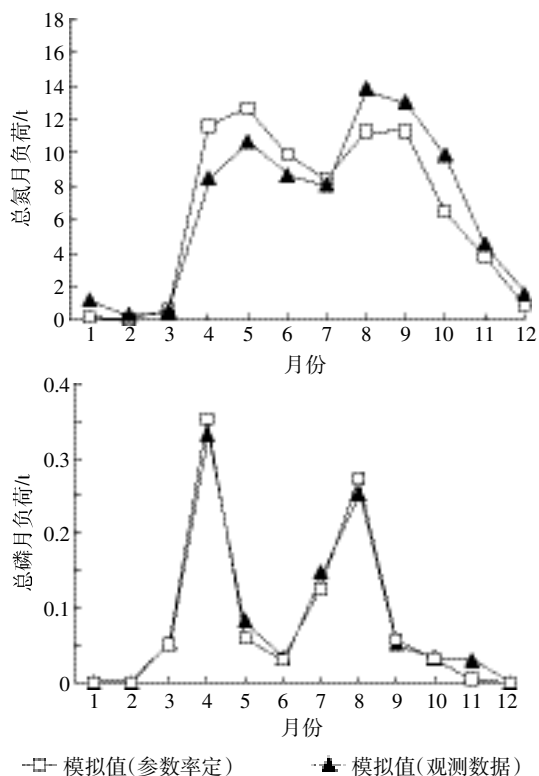


图4 两次模拟农业面源负荷的月际变化

Figure 4 Inter-monthly variation in agricultural diffuse loading of
two simulations

表 8 基于系统率定参数值(a)和基于观测数据输入参数(b)值
月度农业面源污染分析(t)

Table 8 Statistical analysis for inter-monthly variation in
agricultural diffuse loading of two simulations(t)

统计项目	总氮(a)	总氮(b)	总磷(a)	总磷(b)
均值	6.45	6.74	0.08	0.08
均值的标准误	1.45	1.41	0.03	0.03
标准差	5.03	4.90	0.11	0.11
方差	25.30	24.02	0.01	0.01
全距	12.58	13.45	0.35	0.33
极小值	0.09	0.37	0.00	0.00
极大值	12.66	13.82	0.35	0.33
相关系数	0.931		0.993	
配对 t 检验 $\frac{t}{P}$	-0.552		-0.560	
	0.592		0.587	

次模拟的总磷负荷亦不存在显著性差异。对两次模拟农业面源负荷进行统计分析,结果表明 2001—2010 年期间两次模拟的农业面源在月负荷上差异不大。两次模拟的总氮月负荷和总磷月负荷均有极强的相关性,其相关系数分别为 0.931 和 0.993,进一步表明虽然输入的参数不同,但两次模拟的总氮和总磷负荷在月际变化上均有相同的变化规律。

3 结论

针对基于实际观测值能否改进 SWAT 模型模拟结果这一热点问题,本文基于土壤原位观测数据,对 5 个关键参数进行计算分析,同时比较其与常规率定得到的参数值的差异。

(1) SOL_AWC、SOL_K、SOL_BD 和 USLE_K 这 4 个参数的率定值和基于观测数据的计算值之间有显著性差异,而 SOL_CRK 的率定值和基于观测数据的计算值之间无显著性差异。

(2) 年度和月度模型结果表明,两类参数条件下开展的模拟在统计检验上差异较小,尤其是年度平均值的差异较小,表明模型有较强的适用性。

(3) 通过和基于参数率定的模拟结果相比,发现基于观测数据的农业面源负荷在数值上不存在显著性差异,且在年尺度和月尺度上具有相同的变化规律。因此,建立基于观测数据的 SWAT 模型能够很好地模拟农业面源负荷在时间尺度的变化规律。

(4) 在缺乏水文和水质等常规监测数据的流域,利用土壤观测数据,通过计算获得 SWAT 模型的关键参数,将能够很好地模拟其农业面源污染特征。

(5) 由于观测条件有限,本文只考虑了土层有效

水含量、土壤容重、饱和水力传导系数、土壤侵蚀方程中的 K 因子和土壤孔隙度等土壤相关参数。而其他对氮磷的流失也较为敏感的参数没有进行计算分析。从分析结果来看,基于观测值来进行参数值的设定可以提高 SWAT 模型的精度。

参考文献:

- [1] 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.
HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. Non-point source pollution model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [2] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 187(1): 27-39.
- [3] 余红,沈珍瑶.三峡水库大宁河流域非点源污染参数的不确定性分析[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 554-558.
YU Hong, SHEN Zhen-yao. Analyzing parameter uncertainty of the non-point source pollution in Daning River of the Three Gorges Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 554-558.
- [4] Hamed R, Patrick W, Guido W, et al. Parameter estimation in semi-distributed hydrological catchment modelling using a multi-criteria objective function[J]. *Hydrological Process*, 2007, 21: 2998-3008.
- [5] Price K, Purucker S T, Kraemer S R, et al. Tradeoffs among watershed model calibration targets for parameter estimation[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(10): 1029-1036.
- [6] Kannan N, White S M, Worrall F, et al. Hydrological modelling of a small catchment using SWAT-2000-Ensuring correct flow partitioning for contaminant modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(1-2): 64-72.
- [7] Bosch N S, Allan J D, Dolan D M, et al. Application of the soil and water assessment tool for six watersheds of Lake Erie: Model parameterization and calibration[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37: 263-271.
- [8] 宁吉才,刘高焕,叶宇,等. SWAT 模型降水输入参数的改进研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(5): 866-875.
NING Ji-cai, LIU Gao-huan, YE Yu, et al. Study on precipitation parameters input of SWAT model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(5): 866-875.
- [9] 李慧,雷晓云,靳晟.基于 SWAT 模型的山区冰雪融水河流的日径流模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3): 105-108.
LI Hui, LEI Xiao-yun, JIN Sheng. Simulation about the daily runoff of the montane mixed replenishment of ice and snowmelt river based on the SWAT model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(3): 105-108.
- [10] 张展羽,司涵,孔莉莉.基于 SWAT 模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 93-100.
ZHANG Zhan-yu, SI Han, KONG Li-li. Migration of non-point source nitrogen and phosphorus in small watershed based on SWAT model[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2):93-100.
- [11] Ouyang W, Shan Y S, Hao F H, et al. The effect on soil nutrients resulting from land use transformations in a freeze-thaw agricultural ecosystem[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 132(8):30-38.
- [12] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, et al. Synergistic impacts of land-use change and soil property variation on non-point source nitrogen pollution in a freeze-thaw area[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 495(12):126-134.
- [13] 任秀文, 姜国强, 钟满妮, 等. SWAT 模型参数敏感性分析及增江流域的应用[C]//中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2011:262-268.
- REN Xiu-wen, JIANG Guo-qiang, ZHONG Man-ni, et al. Parameter sensitivity analysis of SWAT model and its application in Zeng River [C]//Proceedings of China Environmental Science Society Annual Conference. Beijing: China Environmental Science Press, 2011:262-268.
- [14] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(3):789-803.
- [15] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, et al. Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: The phosphorus indicator in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 432:412-421.
- [16] 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.
- LIU Jian-li, XU Shao-hui, LIU Hui. Investigation of different models to describe soil particle-size distribution data[J]. *Advance in Water Science*, 2003, 14(5):588-592.
- [17] Schaap M G. Graphic user interfaces for pedotransfer functions[J]. *Developments in Soil Science*, 2004, 30:349-356.
- [18] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 26(3):186-189.
- LIU Jia, FAN Hao-ming, ZHOU Li-li, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 26(3):186-189.
- [19] Williams R G, Sheridan J M. Effect of rainfall measurement time and depth resolution on EI calculation[R]. American Society of Agricultural Engineers, 1987.
- [20] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1):188-198.
- YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Losses of nitrogen and phosphorus under different land use patterns in small red soil watershed[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2003, 23(1):188-198.
- [21] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):735-739.
- HUANG Yun-feng, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, et al. An experimental research on soil erosion and nitrogen, phosphorus losses under different vegetation covers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):735-739.