

AnnAGNPS模型在西南岩溶地区奇峰河流域的参数敏感性及其适用性分析

梁丽营, 高振刚, 刘德财, 闫小雨, 曾鸿鹄, 刘峥, 覃礼堂, 梁延鹏

引用本文:

梁丽营, 高振刚, 刘德财, 等. AnnAGNPS模型在西南岩溶地区奇峰河流域的参数敏感性及其适用性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 590–600.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岔口小流域非点源污染模型AnnAGNPS不确定性分析

姜永才, 郭青霞

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 956–964 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1272>

基于AnnAGNPS模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究

涂宏志, 侯鹰, 陈卫平

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1345–1352 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1562>

基于流域属性和参数敏感性的相似流域识别方法

陈磊, 李爽, 王国波, 沈珍瑶

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1337–1344 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0802>

流域尺度重金属行为模拟及其对不同气象因子的响应特征研究

周凌峰, 孟耀斌, 逯超, 伍甘霖, 张东妮, 蒋飞红

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1112–1120 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1037>

基于大型底栖动物群落生物指数的清河水环境模糊综合评价

陈佳勃, 赵瑞辰, 王艳杰, 李法云

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2837–2845 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

梁丽营, 高振刚, 刘德财, 等. AnnAGNPS模型在西南岩溶地区奇峰河流域的参数敏感性及适用性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 590–600.

LIANG Li-ying, GAO Zhen-gang, LIU De-cai, et al. Parameter sensitivity and applicability analysis of AnnAGNPS model in Qifeng River watershed in the southwest Karst area of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 590–600.

AnnAGNPS模型在西南岩溶地区奇峰河流域的参数敏感性及适用性分析

梁丽营¹, 高振刚¹, 刘德财¹, 闫小雨¹, 曾鸿鹄^{1,3*}, 刘 峥^{2*}, 覃礼堂¹, 梁延鹏¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 桂林理工大学化学与生物工程, 广西 桂林 541006; 3. 桂林理工大学, 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006)

摘要:为了探究农业非点源模型(AnnAGNPS)在西南岩溶地区奇峰河小流域地表径流量模拟的适用性,使用差分灵敏度分析(Differential sensitivity analysis, DSA)方法对参数进行敏感性分析,采用敏感指数法评价参数的敏感性等级;利用试错法人工调整模型参数,采用三个评价指标:决定系数(R^2)、纳什系数(ENs)和相对偏差(Re)评估模型的性能,检验其在岩溶地区奇峰河小流域的径流模拟的适用性。结果表明:不同临界源区面积(Critical source area, CSA)与最小源区沟道长度(Minimum source channel length, MSCL)取值下,CSA=20 hm², MSCL=200 m时,能够较为全面地描述奇峰河流域的下垫面的情况。参数敏感性分析结果表明,对径流模拟最敏感的参数是径流曲线数(CN),与非岩溶地区相比,影响地表径流的最敏感的参数相同,取值较非岩溶地区流域的大;对泥沙、总氮、总磷模拟最敏感的参数是土壤可侵蚀性因子与径流曲线数。模拟结果表明:AnnAGNPS模型能很好地模拟流域的地表径流,月尺度下模拟的 R^2 为0.962, ENs为0.831, Re为-14.94%。日尺度下模拟的 R^2 为0.716, ENs为0.946, Re为-13.69%。由于岩溶系统的高渗漏性以及地下水与地表水交换的瞬时性,日尺度下的模拟精度较低。研究表明经过校准与验证的AnnAGNPS模型适用于西南岩溶地区桂林市奇峰河流域的非点源污染负荷模拟。

关键词:西南岩溶地区; AnnAGNPS模型; 参数敏感性; 适用性评价; 径流模拟

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)03-0590-11 doi:10.11654/jaes.2019-1111

Parameter sensitivity and applicability analysis of AnnAGNPS model in Qifeng River watershed in the southwest Karst area of China

LIANG Li-ying¹, GAO Zhen-gang¹, LIU De-cai¹, YAN Xiao-yu¹, ZENG Hong-hu^{1,3*}, LIU Zheng^{2*}, QIN Li-tang¹, LIANG Yan-peng¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 3. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin 541006, China)

Abstract: To explore the applicability of the agricultural non-point source AnnAGNPS model in the Qifeng River small watershed in the southwest Karst area, a differential sensitivity analysis (DSA) method was used to analyze the sensitivity of the parameters. The sensitivity index method was used to evaluate the sensitivity level of the parameters. The parameters of the model were adjusted manually by a trial-and-error method. The evaluation index, the coefficient (R^2), the Nash coefficient (ENs), and the relative deviation (Re) were used to evaluate the performance of the model. The applicability of the model to the Qifeng River small watershed in the Karst area was tested. When the critical source area (CSA) and minimum source channel length (MSCL) values were varied, a CSA of 20 hm² and MSCL of 200 m were found to comprehensively describe the situation in the Qifeng River Basin. The results of the parameter sensitivity analysis showed that the most sensitive parameter for runoff simulation was the number of runoff curves (CN). Compared with non-Karst areas, the most sensitive pa-

收稿日期: 2019-10-10 录用日期: 2019-12-31

作者简介: 梁丽营(1991—), 广西贵港人, 博士研究生, 从事农业面源污染的数值模拟研究。E-mail: liying@glut.edu.cn

*通信作者: 曾鸿鹄 E-mail: zenghonghu@glut.edu.cn; 刘 峥 E-mail: 1986034@glut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578171)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51578171)

parameters affecting surface runoff were the same, although the values were larger than those in non-Karst areas. The most sensitive parameter for sediment, total nitrogen, and total phosphorus simulation was soil erosion factor. The simulation results showed that the AnnAGNPS model could simulate the surface runoff of the Qifeng watershed. The R^2 , ENs, and Re of the simulation of runoff on the monthly scale were 0.962, 0.831, and -14.94%, respectively, but 0.716, 0.946, and -13.69%, respectively, on the daily scale. Owing to the high leakage of the Karst system and the instantaneous exchange of groundwater and surface water, the simulation accuracy at the daily scale was low. The study indicates that the AnnAGNPS model is suitable for non-point source pollution load simulation in the Qifeng River Basin of Guilin City in the southwest Karst area.

Keywords: Southwest Karst area; AnnAGNPS model; parameter sensitivity; applicability evaluation; runoff simulation

非点源污染是继点源污染得到治理后对流域水体威胁最大的又一污染类型,其也成为了流域水体污染治理的主要目标^[1]。农业非点源污染常见的污染物来源主要有耕作施肥、杀虫剂、农药等,而农业活动对于非点源污染贡献的评价又是最复杂的^[2],因此对农业非点源污染负荷产生迁移的物理过程的模拟,能够对治理农业非点源污染起到重要作用。国外运用计算机模型模拟非点源污染起步早,技术较为成熟,已经广泛应用于各流域的非点源污染的模拟^[3-5]。我国对于非点源污染的研究起步较晚^[6],前期我国研究者直接使用模型自带的参数用于我国其他地区的研究。随着SWAT、HSPF、AnnAGNPS等模型在我国的推广使用,运用模型对非点源污染的研究也越来越成熟。许多学者使用AnnAGNP模型对我国非岩溶地区各流域进行了适用性研究,九江小流域^[7],珠江三角洲小流域^[8]、三峡库区流域^[9-10]、黄土丘陵小流域^[11]等非岩溶地区流域的地表径流适用性研究表明,AnnAGNP模型自带的参数不能直接应用于我国的小流域,需要对模型参数进行调整,优化取值范围,才能应用于本土流域的非点源污染模拟。

在全球范围内,喀斯特地貌面积为2200万 km^2 ,约占全球陆地总面积的12%^[12],中国的岩溶地貌面积占我国国土面积的1/3以上^[13]。喀斯特地区主要位于欧洲沿线地中海沿岸、美国东部和中国西南地区^[14]。喀斯特地貌形成于可溶性碳酸盐岩(如石灰岩)区域,这些区域受到地质和化学溶解作用,形成由裂隙、沟渠和洞穴组成的地下岩溶排水系统(岩溶含水层)^[15-16]。岩溶系统的表面和地下形成了一个空间开放的双层水文系统,这个特别“双重结构”容易导致地表水流失^[12-13]。喀斯特含水层通常能快速响应降雨水文事件以及城市人为补给过程^[17]。目前,岩溶地区地表径流的研究通常采用地表径流小区域观测法,以及近年来学者们尝试使用水文分布式模型对岩溶地区流域的非点源污染进行模拟。Malagò等^[18]与Ama-

tya等^[19]研究发现SWAT模型对岩溶地区流域径流的模拟以及非点源污染的水质模拟存在较大的误差,应当根据岩溶特征做适当的调整,才能更好地模拟非点源污染。SWAT模型主要应用于大中型流域的模拟,而AnnAGNPS则广泛应用于小流域的模拟,精度比SWAT高。

桂林市奇峰河流域地处西南岩溶地区,AnnAGNPS模型在其他非岩溶流域有着广泛的应用,但是在岩溶地区小流域的非点源污染研究颇少。而AnnAGNPS模型应用于西南典型岩溶地区小流域模拟的适用性有待于进一步验证。如何优化模型的参数以及取值范围,是验证其在奇峰河流域的适用性的关键,参数敏感性分析为优化参数提供参考依据。因此本研究选取西南岩溶地区桂林奇峰河流域为研究对象,进行AnnAGNP模型的适用性以及参数敏感性分析研究,具有理论可行性与现实意义。AnnAGNP模型对于地表径流的模拟,将会填补地处西南岩溶区的桂林市小流域数值模拟的空白,同时优化完善后的模型可进一步应用于非点源污染的模拟,为治理岩溶地区非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况

奇峰河发源于广西壮族自治区桂林市临桂县南边山的香草岩,属漓江的一级支流,流经南边山乡、六塘镇及桂林市郊雁山区,在蒋家坝与桂柳运河交汇后称为良丰河,流经柘木镇,在柘木的胡子岩处注入漓江。位于北纬 $24^{\circ}55'36''\sim 25^{\circ}06'47''$,东经 $110^{\circ}13'11.29''\sim 110^{\circ}22'23.59''$ 。奇峰河流域所在地区气候温暖湿润,属中亚热带季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,多年平均降雨量为1835.8 mm,年最大降雨量为2452.7 mm,年最小降雨量1313.3 mm。雨季为3—8月,降雨量占全年的80%,其中,4—8月是暴雨多发时期,降雨约占全年的50%。奇峰河流域上游是由中泥盆统

信都组碎屑岩组成的架桥岭背斜核部,中流段主要是由灰岩与白云岩组成的六塘-莫家向斜盆地。桂林岩溶区的特点主要是规模小,多零星散布于岩溶峰丛洼(谷)地、峰林平原(盆地)中,气候条件温暖,降雨量丰富,具有“土在楼上,水在楼下”的双层水文地质结构,大气降水在地表快速地向下流失,容易导致大面积的地表水缺乏,水土流失严重。

1.2 研究区数据来源

AnnAGNPS需要的基础数据主要包括地理空间数据、水文气象数据、土壤属性数据、作物管理数据和水质监测数据等。空间数据包括数字高程模型(DEM)、土壤类型图、土地利用类型图。DEM在地理空间数据云平台下载(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m×30 m;土壤类型数据是第二次全国土壤调查1:400万的土壤类型图;土地利用类型图是由谷歌地球上的遥感影像解译而来。土壤属性数据主要包括土壤水文组分、土壤侵蚀因子、不透水层深度、土层数量、土层深度、土壤容重、有机质含量、土壤水分含量、田间持水量、土壤饱和导水率、凋萎点系数、黏土比例、淤泥比例、沙子比例、岩石比例。土壤水文特性属性值田间持水量、土壤饱和导水率、土壤水分含量等通过Soil Water Characteristics软件计算;其他数据来源于全国第二次土壤普查,我国土壤粒径与模型使用的美国制的粒径不相同,因此需要进行粒径转换。降雨侵蚀因子、土壤可侵蚀性因子K的计算参考文献[20];地表残留物覆盖率、扰动面积为百分比的无量纲参数,参考模型推荐的范围值以及实地走访调查。径流曲线数(Runoff curve number,也称为曲线数或简称CN)是水文用于预测降雨过量直接径流或入渗的经验参数。曲线数法是由美国农业部自然资源保护局开发的一种方法,径流曲线数根据美国农业部监测的小型集水区和坡地径流的经验分析得出。气象数据来源于国家气象数据共享网(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html>),AnnAGNPS模型需要的气象数据有七类:日降雨量、风速、风向、每日最高气温、每日最低气温、露点温度、辐射值。水文数据来源于桂林市良丰河水文站。其他基础的原始数据不经过任何的数据处理,直接输入模型。

1.3 模型简介

20世纪80年代,美国农业部农业研究局(USDA-ARS)与自然资源保护局(NRCS)共同研发了AnnAGNPS模型,它是一种连续模拟的分布式,以每日时间为步长的污染物负荷加载模型,是AGNPS的延续版

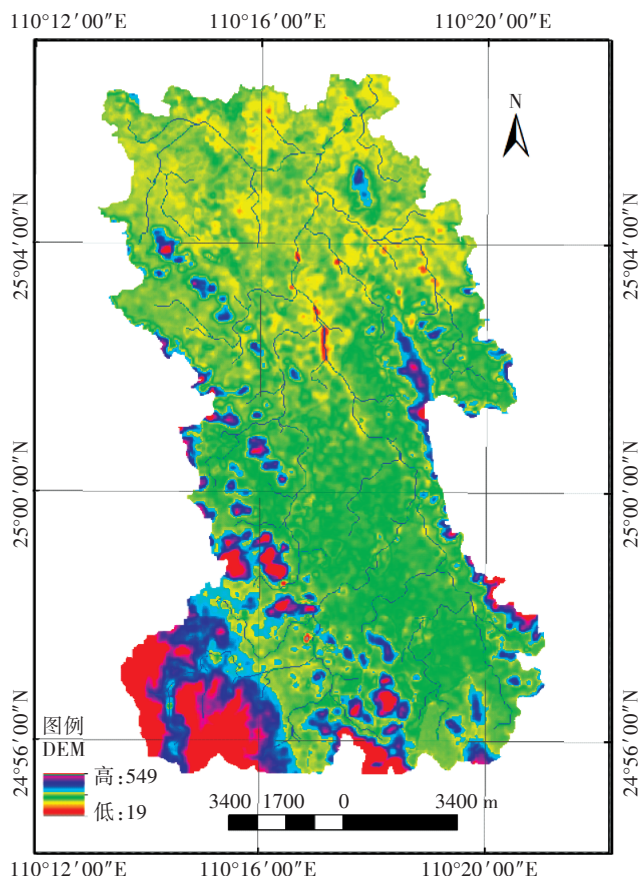


图1 桂林市奇峰河流域DEM与水系图

Figure 1 DEM and water system map of Qifeng River Basin in Guilin

本^[3]。AnnAGNPS以流域DEM为基础,按照微地形一致性原则,将流域划分为若干个任意形状的集水单元,然后由河网把这些子单元连接起来,以日尺度连续监测各集水单元的径流量、泥沙、营养物和农药负荷量,通过河道演算得到流域出口处各种成分的含量^[21]。模型采用SCS-CN径流曲线方程计算地表径流量,采用修正的通用土壤流失方程计算地表泥沙侵蚀量。氮、磷、有机碳的颗粒和可溶性形式的化学传输和农药使用源自CREAMS模型^[22]。有关模型的参数敏感性分析率定、验证过程的具体操作见文献[23-25]。

1.4 最佳子流域集水单元划分

在AnnAGNPS的模块TopAGNPS中可以通过设定不同的临界源区面积(CSA)和最小源区沟道长度(MSCL)取值,将流域划分为空间上分散的集水单元,可以产生不同的子流域分割形状以及数量,这两个参数的取值决定了流域的离散程度。河流集水区是自然界的空间单位,其中复杂的相互作用过程发生,影

响河流中的水在出口处的汇合^[2],同时影响营养物的动力学^[26]。根据模型的用户手册,选取研究区的CSA的取值范围10~300 hm²,MSCL取值范围30~300 m,研究不同集水单元划分下的模拟结果。

1.5 参数敏感性分析方法

本研究参考非岩溶地区小流域的参数敏感性^[20,27],选取了可能对岩溶地区产生敏感性的十个参数:径流曲线数(CN)、河段曼宁系数、凋萎点系数、土壤饱和含水率、耕作深度、田间持水量、降雨侵蚀因子、土壤可侵蚀性因子、地表残留物覆盖率、扰动面积。本研究采用DSA进行参数敏感性分析,设定一个参数的初始值,然后在初始值附近增减10%,其他参数保持不变,通过计算参数敏感性指数 I 获取各参数的敏感性程度。DSA将敏感性指数 I 分为四个等级, $|I|>1$ 表示极其敏感, $0.2<|I|<1$ 表示非常敏感, $0.05<|I|<0.2$ 表示中等敏感, $|I|<0.05$ 表示不敏感,敏感性指数 I 的计算公式为:

$$I = \frac{(y_2 - y_1) / y_0}{2\Delta x / x_0}$$

式中: x_0 为参数的初始值, y_0 是参数 x_0 对应的模型输出值, y_1 、 y_2 分别表示 $x_1=x_0-\Delta x$ 、 $x_2=x_0+\Delta x$ 对应的模型输出值, $\Delta x=10\% x_0$ 。

1.6 模型率定及评价方法

模型的稳健性及可靠性能需要一定的评价指标,单一的评价指标往往不能全面评价一个模型的模拟性能或者模型的模拟精度,因此本研究选取了三个评价指标,即相关系数(R^2)、纳什效率系数(ENs)、相对误差(Re)对模拟结果进行模型性能的评价。 R^2 越大,表示实测值与模拟值的相关性越好。ENs值越接近于1,表示模型模拟精度越高^[28]。Re为0,则表明模拟值与实测值完全吻合。对于水文模型在以月为时间步长进行径流与水质的模拟评价等级,已经形成了统一的适用性标准^[29]。模型的率定根据径流的参数敏感性分析结果,选取了对径流敏感的参数,采用试错法人工调参校准模型。首先要将模型的初始参数输入,然后运行模型,根据结果计算 R^2 、ENs和Re值,如果模型在可接受范围内,则停止运行模型,如果模型不在可接受范围内,则返回修改模型参数,再重复运行模型,直至模型在可接受范围。

2 结果与讨论

2.1 最佳子流域划分

集水单元和河道数量如表1所示。从表中可以

表1 不同的CSA取值下的集水区划分结果

Table 1 Results of watershed division under different CSA values

序号 No.	临界源区面积 Critical sources area/hm ²	最小源区沟道长度 Minimum source channel length/m	单元数量 Cells number	河段数量 Reach number
1	300	200	93	38
2	250	200	98	40
3	200	200	143	58
4	150	200	202	82
5	100	200	290	118
6	90	200	315	128
7	80	200	344	140
8	70	200	385	156
9	60	200	448	182
10	50	200	501	204
11	40	200	633	258
12	30	200	800	328
13	20	200	1225	504
14	10	200	2053	854

看出,MSCL为200 m时,随着CSA取值从10 hm²增大到50 hm²,集水单元和河段的数量急剧减少,两者均减少了76%;CSA从50 hm²增加到100 hm²时,数量减少了42%;当CSA大于100 hm²时,集水单元和河道的数量减少的幅度不大,对河网密集度影响不显著。这与Pradhanang等^[30]的研究结果相似,MSCL取值在100~200 m时,对河网的密集程度影响不显著。

2.1.1 子流域集水单元划分下的土壤和土地利用变化

根据不同CSA和MSCL取值下的试验结果,当CSA取值为10 hm²时,河道数量过多,部分河道产生重叠,当CSA取值大于50 hm²时,划分的集水单元的面积过大,当流域内一些土壤和土地利用的面积过小时,面积大的土壤或者土地利用类型将占主导地位,而面积小的土壤或者土地利用类型会被忽略,即在空间上产生一定的概化。从图2的不同CSA取值下土壤面积的变化结果来看,红泥黏土的面积出现了先迅速下降后缓慢上升,在CSA等于40 hm²时再次下降,而后在CSA为20 hm²时开始趋于稳定。水稻土的面积变化趋势则和红泥黏土的变化趋势相反,最终都在CSA等于20 hm²时趋于稳定。而红石灰泥土在流域中所占的面积不大,先迅速下降后逐渐平稳,再缓慢下降,而后在CSA为30 hm²时趋于稳定。

从土地利用类型面积变化图(图2)可以看出,林地先下降后上升,后缓慢下降,当CSA等于40 hm²时趋于稳定;旱地面积先上升后迅速下降,后缓慢下降,最后在20 hm²时趋于稳定;水田的面积变化情况较为

复杂,波动性较大,先下降后迅速上升再迅速下降,后上升再缓慢下降,再上升后再下降,原因是水田的方块面积均较小,因此在集水单元划分的时候常处于非主要地位;果园的面积先迅速上升,后缓慢上升,再慢慢趋于稳定;居民地的面积变化则比较单一,先保持变化不大,后缓慢下降,再缓慢上升,最后在 20 hm^2 处稳定。因此综合考虑土壤和土地利用类型面积变化情况,确定将奇峰河流域的 CSA 取值为 20 hm^2 ,能较全面地描述流域的地形信息。前人的研究表明^[30],不同的 MSCL 取值($100 \sim 200 \text{ m}$ 的取值)对模拟结果没有显著影响,因此本文直接选取 MSCL 为 200 m 。

2.1.2 子流域集水单元划分下径流变化

不同子流域集水单元划分下的最大洪峰流量与径流量的变化如图3和图4所示。由图可看出,随着子流域集水单元数量的增加,模拟的最大洪峰流量变化为先急速下降,缓慢上升后再缓慢下降,最后缓慢上升至相对稳定范围,在 CSA 为 30 hm^2 (集水单元数量为 800) 时开始趋于相对稳定。径流量在集水单元数量为 38 和 40 时变化不大,后迅速下降,再上升后下

降,然后再上升,最后同样在 800 个集水单元时开始趋于相对稳定。子流域集水单元数量从 98 到 143 个时,径流量随着集水单元数量增加而下降,降幅为 6.41%。

由此可知,集水单元数量为 800~2053 对径流模拟的影响较小。

2.1.3 子流域集水单元划分下的泥沙变化

不同子流域集水单元划分下,模型模拟的泥沙产量如图5所示。由图可知,随着子流域集水单元数量的增加,奇峰河流域的产沙量变化呈现出先上升后下降、再上升后下降、最后趋于相对稳定的趋势。当子流域集水单元数量从 143 上升到 202 个时,年产沙量的增幅较大,增幅为 6.57%,当子流域集水单元数量从 448 个上升到 633 个时,年产沙量随着划分数量增加而下降,降幅为 9.33%。产沙量在子流域数量为 1225 时开始趋于稳定。由此可见,对于泥沙的模拟,子流域集水单元的划分数量为 1225 是合理的。

2.1.4 子流域集水单元划分下的各形态氮变化

不同子流域集水单元划分下,模型模拟的吸附态

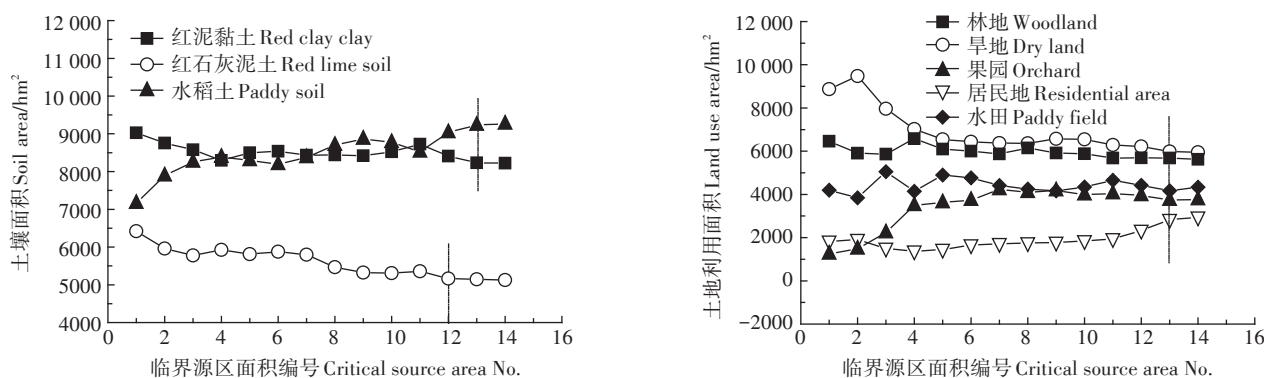


图2 不同 CSA 取值下土壤和土地利用类型面积变化

Figure 2 Changes in soil and land use type under different CSA values

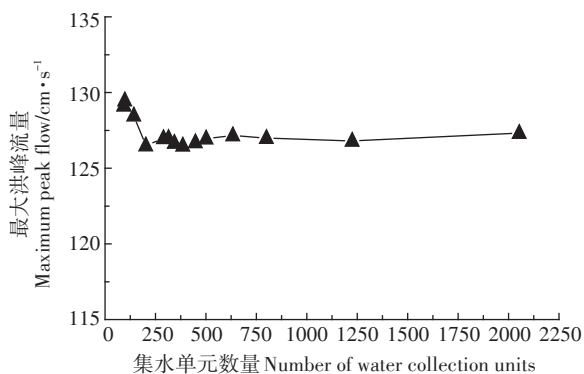


图3 最大洪峰流量变化趋势

Figure 3 Maximum flood peak flow trend

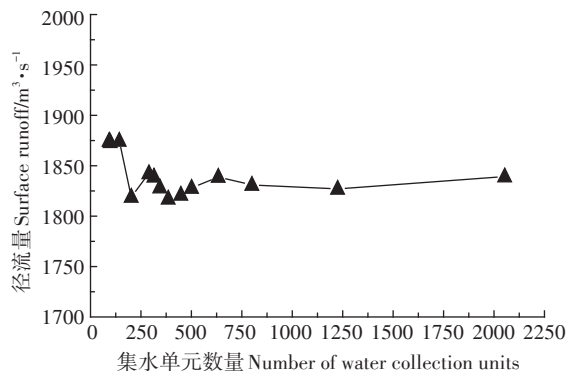


图4 径流量变化趋势

Figure 4 Trends in surface runoff

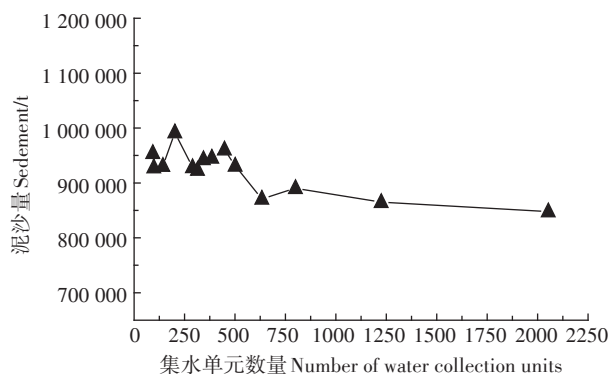


图5 不同集水单元个数下泥沙的变化

Figure 5 Variation of sediment under different number of water collection units

氮、溶解态氮和总氮的变化趋势如图6所示。吸附态氮占总氮比例高达97.72%,因此与总氮的变化趋势相同。变化的波动也较大,均是先剧烈波动后上升再下降,再迅速上升后趋于相对稳定水平。在子流域集水单元数量从315上升到385个和633上升到800时,吸附态氮含量随着数量的增加而增加,增幅分别为5.77%和5.97%。总氮含量的增幅为5.65%和5.87%。溶解态氮变化趋势表现为先下降后上升,再下降而后上升,最后趋于稳定。子流域集水单元数量从633上升到1225个时,溶解态氮的增幅最大,为5.44%。吸附态氮和总氮在子流域数量为800时开始趋于相对稳定,而溶解态氮在1225时开始趋于相对稳定,因此对于氮的模拟,子流域划分的数量为1225时是合理的。

2.1.5 子流域集水单元划分下的各形态磷变化

不同子流域集水单元划分下,模型模拟出来的磷包括吸附态的有机和无机磷、溶剂态的无机磷和总磷,它们的变化趋势均相同(见图7)。在子流域集水单元数量从315上升到385和633上升到800时,各形态磷含量随着数量的增加而增加。在子流域集水单元数为800后,各形态磷的含量趋于稳定。因此对于磷的模拟,子流域划分的数量为800~1225时是合理的。

综合上述的土壤面积变化、土地利用变化面积以及模型模拟出来的分析结果,桂林市奇峰河流域的CSA和MSCL的取值分别为20 hm²和200 m时,能够合理地反映流域的下垫面情况,能够使模型较好地模拟各污染负荷。其他非岩溶地区流域面积相似的小流域,CSA的取值范围在10~50 hm²,MSCL的取值范围在100~250 m^[31-32],因而本研究选取的CSA与MSCL

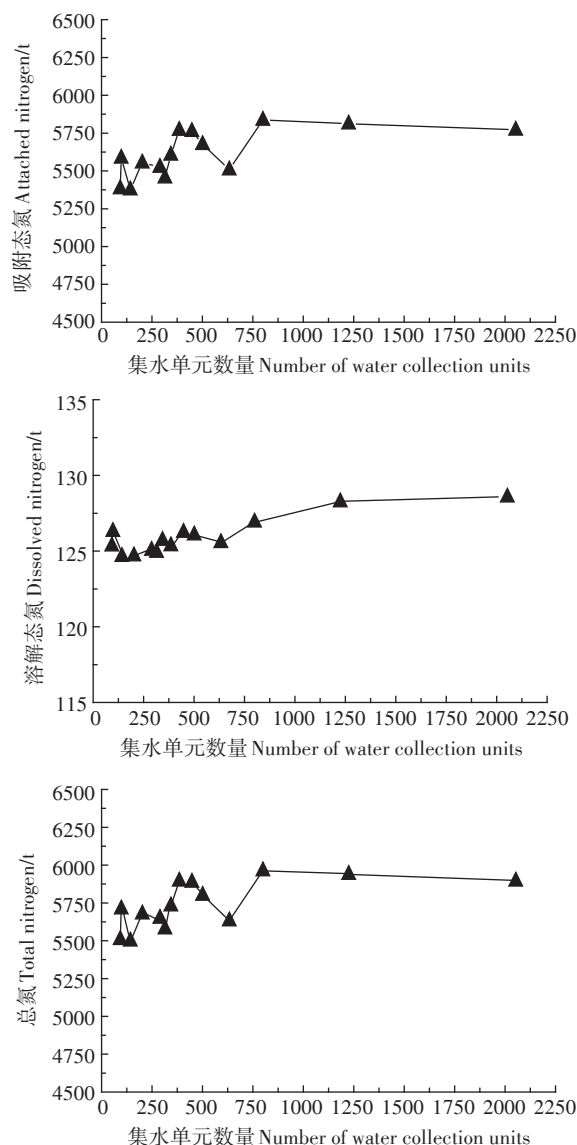


图6 各形态氮的变化趋势

Figure 6 Trends in different forms of nitrogen

值是合理的。这也同时表明MSCL的取值在岩溶地区与非岩溶地区没有明显的差别,不是影响模拟结果的主要参数。在岩溶地区与非岩溶地区,CSA的取值均会影响模拟结果,其方式是通过影响土壤类型与土地利用类型的面积,出现空间概化后,直接影响特定土地利用与土壤类型下的CN值,进而影响模拟结果。赖格英等^[33]利用遥感反演研究典型岩溶地貌下的土地利用、覆盖类型、坡度、土壤特性来估算整个岩溶区域研究区的CN值,CN的取值影响了SWAT模型的模拟结果。这个研究证明了不同的土地利用与土壤类型会影响CN取值。而不同子流域划分下,径流的变化趋势直接影响泥沙、总氮、总磷的变化趋势,因为径

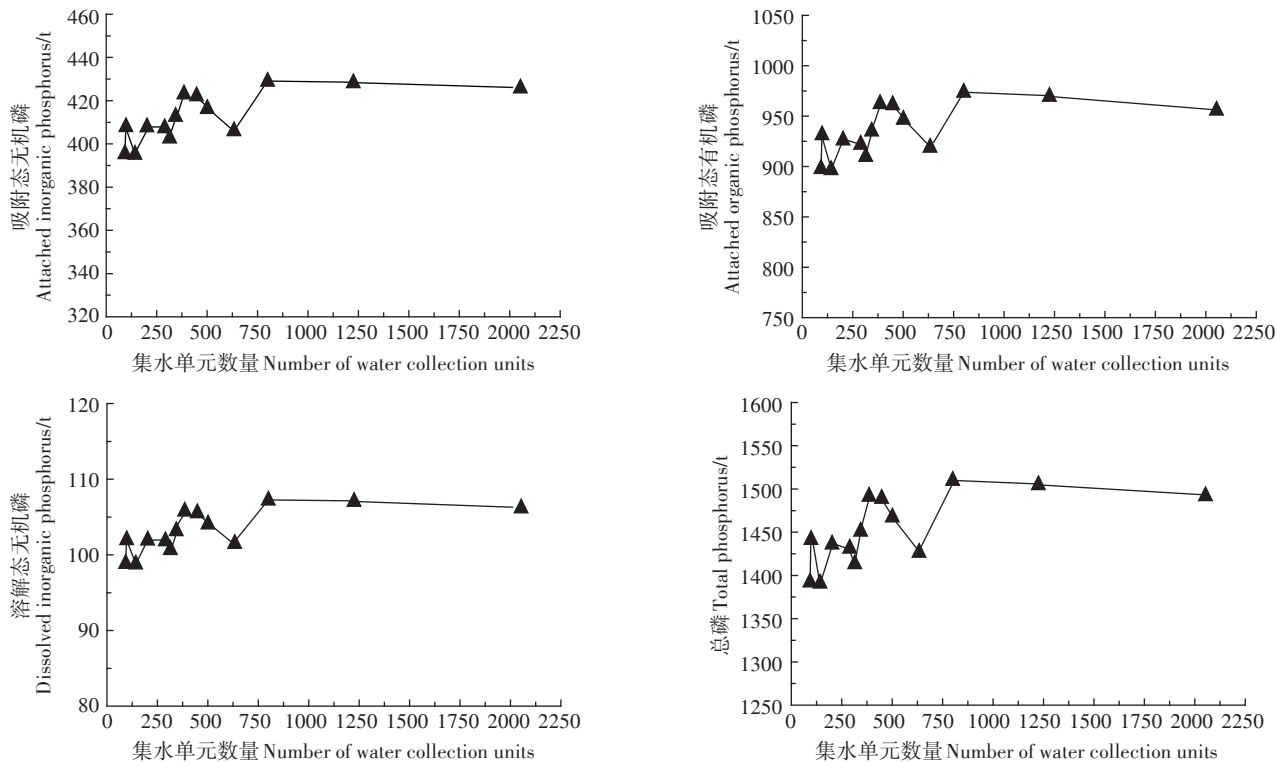


图7 各形态磷的变化趋势

Figure 7 Trends in different forms of phosphorus

流是泥沙、总氮、总磷主要的运移介质和驱动因子。

2.2 参数敏感性分析

2.2.1 径流的参数敏感性分析

使用DSA方法对奇峰河流域进行径流模拟的参数敏感性分析,结果见表2和图8。根据10个参数的径流敏感性分析结果,CN是对径流量最敏感的参数,敏感性指数为4.18,敏感性等级为极其敏感。田间持水量对径流的敏感等级为中等敏感,指数为0.194。凋萎点系数和土壤饱和含水率对径流有影响,但是影响效果不显著,敏感指数仅为0.037和0.002,评判为不敏感等级。而其他的参数耕作深度、地表残留覆盖率、降雨侵蚀因子、曼宁系数、土壤可侵蚀性因子和扰动面积等对径流没有影响。有研究表明^[34],河道曼宁系数对径流量影响不显著,但会对洪峰流量和汇流时间产生影响,因此也是校准径流的重要参数。这与国内外使用AnnAGNPS模型在非岩溶流域的参数敏感性研究结果相同,Mohammed等^[35]的参数敏感性分析得出,CN和通用土壤流失方程(USLE)的C因子是最敏感的参数。Sarangi等^[36]的研究表明,CN值是勒比圣卢西亚岛森林流域和农业流域径流模拟中最敏感的参数。钟科元等^[37]对福建桃溪流域的参数敏感性同样表明,CN值是对径流模拟最敏感的参数。

2.2.2 泥沙的参数敏感性分析

泥沙的敏感性分析结果见表2和图9,其中土壤可侵蚀性因子、降雨侵蚀因子、CN和对泥沙的敏感性等级最高,为非常敏感,敏感指数分别为1.09、-0.932和0.214。地表残留覆盖、曼宁系数和扰动面积表现为中等敏感,敏感指数为-0.136和-0.115。其他四个参数对泥沙有轻微的影响,但不显著,属于不敏感等级。不同的研究区域因降雨、蒸发等气象因素的差异,以

表2 径流、泥沙、总氮和总磷参数敏感性指数值计算结果

Table 2 Results of sensitivity index of runoff, sediment, total nitrogen and total phosphorus parameters

参数 Parameters	径流 Runoff	泥沙 Sediment	总氮 TN	总磷 TP
耕作深度	0.000	0.002	0.002	0.002
地表残留覆盖率	0.000	-0.136	-0.128	-0.125
凋萎点系数	0.037	-0.004	-0.024	-0.009
降雨侵蚀因子	0.000	-0.932	-0.631	-0.615
径流曲线数(CN)	4.180	0.214	0.413	0.234
曼宁系数	0.000	-0.115	-0.131	-0.128
田间持水量	-0.194	-0.008	-0.022	-0.016
土壤饱和含水率	0.002	0.001	0.002	0.001
扰动面积	0.000	0.059	0.049	0.047
土壤可侵蚀性因子	0.000	1.090	0.636	0.383

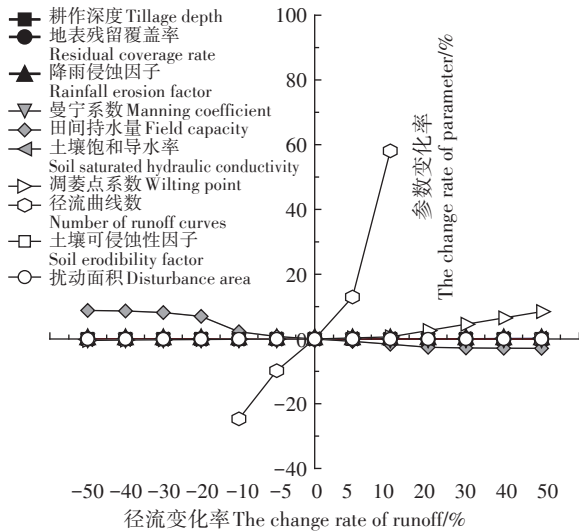


图8 径流参数敏感性分析结果

Figure 8 Sensitivity analysis results of runoff

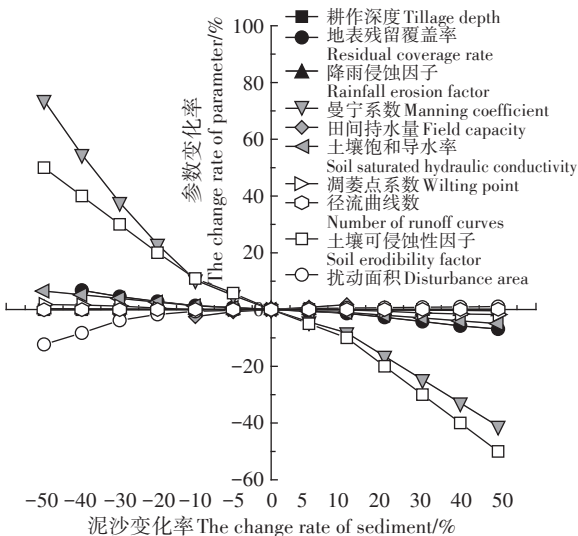


图9 泥沙参数敏感性分析结果

Figure 9 Sensitivity analysis results of sediment

及土壤、地形、土地利用等下垫面因素的空间差异性,会表现出不同的参数敏感性。对比于其他相关研究^[37],福建的桃溪子流域的扰动面积对泥沙为中等敏感,研究区域的土地利用类型为园地和耕地,人为对地表的扰动成为水土流失的影响因素。奇峰河流域主要受土壤可侵蚀性因子以及降雨侵蚀因子的影响。人为因素对其有影响,但不是主要因素。Wu等^[38]采用累积量变化率比较法(SCRCQ)定量评价了气候变化和人类活动对径流变化的贡献,他们的研究表明,在气候因子上,处于喀斯特的银江流域降水和蒸发量的贡献大于非喀斯特流域,人类活动是影响非喀斯特流域径流量的主要因素,是影响喀斯特流域的次要因素。

2.2.3 总氮的参数敏感性分析

对于总氮,土壤侵蚀因子、降雨侵蚀因子和CN是最敏感的参数,敏感等级为非常敏感,敏感指数分别为0.636、-0.631和0.413(表2和图10)。总氮含量随着降雨侵蚀因子的增大而减小,呈负相关性,而随着土壤可侵蚀性因子的增大而增大,呈正相关性。地表残留覆盖率和曼宁系数则是中等敏感的参数,敏感指数为-0.128和-0.131。扰动面积对总氮有轻微影响,但不显著,敏感等级为不敏感,敏感指数为0.049。耕作深度、凋萎点系数、田间持水量和土壤饱和含水率对总氮影响不显著。对于总氮而言,土壤是吸附态氮的传输媒介,而吸附态氮是总氮的主要组成部分,因此土壤可侵蚀性因子越大,对于土壤流失携带的吸附态氮就越多。对于确定的土壤以及降雨数据,土壤可侵蚀性因子和降雨侵蚀因子是确定的,因此在特定的流域下,总氮的最敏感参数是CN,在校准模型时,主要调整CN的取值。

2.2.4 总磷的参数敏感性分析

总磷和总氮的敏感参数等级相似,但是指数大小不相同(表2和图11)。降雨侵蚀因子、径流曲线数和土壤可侵蚀性因子是最敏感的参数,敏感等级为非常敏感,敏感指数分别为-0.615、0.234和0.383。地表残留覆盖率和曼宁系数则是中等敏感的参数,敏感指数为-0.125和-0.128。扰动面积对总磷有轻微影响,但不显著,敏感等级为不敏感,敏感指数为0.047。耕作深度、凋萎点系数、田间持水量和土壤饱和含水率对总氮影响不显著,为不敏感等级。

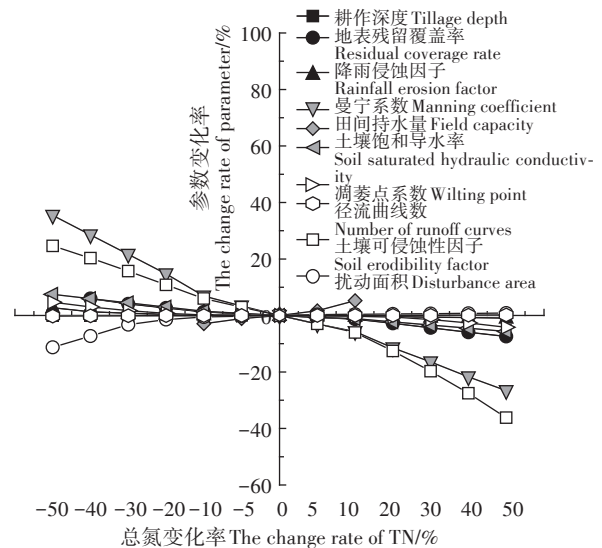


图10 总氮参数敏感性分析结果

Figure 10 Sensitivity analysis results of TN

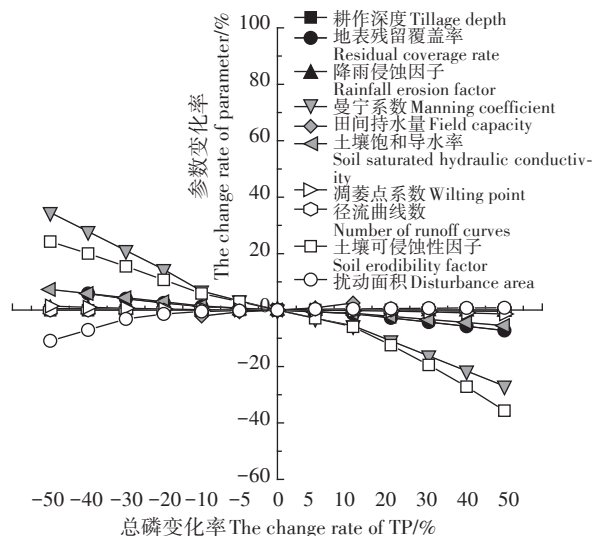


图 11 总磷参数敏感性分析结果

Figure 11 Sensitivity analysis results of TP

参数敏感性的结果表明:在岩溶地区与非岩溶地区,径流模拟的最敏感参数均为CN,在参数上是一致的^[27],显示差异性的是参数的取值范围。泥沙、总氮、总磷的最敏感参数为土壤可侵蚀性因子、降雨侵蚀因子,同时CN也表现出了非常敏感的等级。由于特定流域下,土壤可侵蚀性因子与降雨侵蚀因子是固定的,因此对泥沙与营养物的输出有影响的为CN,在校准时应重点关注CN的取值。这与部分非岩溶地区流域的敏感性参数相同^[27,32,39],可为后续模型校准泥沙、总氮、总磷的模拟提供参考依据。

2.3 径流校准与验证

径流量的校准是通过调整最敏感的参数CN值,采用试错法人工调参校准模型。本研究模型校准后,土地利用为森林的CN取值范围是70~85,农作物的CN取值范围是72~94,灌木丛的CN取值范围是60~90。通过对比发现,非岩溶地区的CN取值小于本研究岩溶地区的CN值。Polyakov等^[40]的研究中土地利用为灌木丛的CN取值为60~79,森林的取值为55~77。而Karki等^[41]在密西西比河流域的研究中,作物的CN取值为60.5~80.4。AnnAGNPS模型采用SCS-CN径流曲线方程计算地表径流量, $S=1000/CN-10$,S表示径流过后地表的最大滞留量,因此CN取值增大,滞留量减小,才能符合岩溶地区降雨发生后地表径流迅速下渗到地下含水层的特点。赖格英等^[33]通过实测的径流量数据,利用SCS-CN的方程式反推算出岩溶地区横港河流域的CN取值,其范围为79.5~95.2,这进一步表明了岩溶地区CN的取值大于非岩

溶地区。西南地区的喀斯特地表径流是一种强动能的雨源性水流^[42],在降雨发生后,喀斯特岩溶地区的水力传导性强以及渗透性高^[16],地表径流可直接从岩面裂隙渗漏至地下含水层与深层裂隙土壤层,形成壤中流补给地下径流,地表的截留量会明显减少。在岩溶地区,由于多基岩、土层薄,土层蓄水能力下降,降雨再分配能力较弱,导致地表汇流明显减少。因此通过优化CN值后,才能让模型模拟的径流量值更接近实测值。因此在非岩溶地区与岩溶地区的区别是参数CN的取值范围不同、地表的渗透速率不相同、地下的空间格局的差异。

奇峰河流域良丰水文站径流的校准与验证结果(表3)为:年尺度上,校准期模拟值与实测值的Re小于10%,验证期Re小于5%,年内径流量基本平衡。在月尺度下, R^2 大于0.9,ENs均大于0.75,Re的范围在15%。从日尺度径流来看,校准期和验证期的 R^2 与ENs均大于0.6,Re可以控制在20%以内。

由于模型仅模拟地表径流,对于地下水径流的模拟是缺乏的,而岩溶地区的地下水补给地表水的比例较大,岩溶流域的降水及其形成的地表径流可以通过岩溶区域的垂直管道迅速灌入地下河系。一方面,岩溶含水层中具有发育良好的地表和地下岩石孔隙、裂隙、裂缝和溶蚀孔道网络,使得岩溶地区的地下水含水层和地表水的沟通间距小,给地表水下渗到地下提供充足的空间,成为地下水与地表水之间迅速交换的场所;另一方面,通过地下裂隙层下渗到地下含水层的溢流泉、壤中流,也可以通过裂隙渗出,与地表的坡面流汇合成为地表径流的一部分^[42]。而由于模型的局限性,并不能全面地模拟地下水补给地表水的过程,因此造成日尺度的模拟精度较小。在非岩溶地区小流域的径流模拟中,不存在地下水迅速补给地表水,以及地表水迅速下渗到地下含水层的过程,因而在日尺度上能很好地模拟地表径流量。本研究在总体上模型的各项指标均满足模拟要求,因此具备地表

表3 奇峰河流域良丰水文站径流的校准和验证结果

Table 3 Calibration and verification results of runoff in Liangfeng hydrological station in Qifeng River Basin

模拟尺度 Simulation scale	时期 Periods	决定系数 R^2	纳什系数 ENs	相对偏差 Re/%
月	校准期	0.906	0.831	-14.94
	验证期	0.980	0.946	-10.86
日	校准期	0.710	0.890	-19.25
	验证期	0.716	0.964	-13.69

径流的模拟能力。

3 结论

本文以中国西南岩溶地区奇峰河流域为研究对象,模型确定了CSA为20 hm²、MSCL为200 m时为最佳子流域的划分,径流曲线数是径流模拟的最敏感参数,土壤可侵蚀性因子、降雨侵蚀因子以及径流曲线数是泥沙、总氮和总磷模拟的最敏感参数。优化CN取值校准后的模型能满足岩溶地区奇峰河小流域径流量的模拟,影响模拟结果的CN值大于非岩溶地区的CN值。泥沙、总氮和总磷的参数敏感性分析为后续模型应用于岩溶地区奇峰河小流域非点源污染的定量分析提供依据。同时,人工调参的方法能满足AnnAGNPS模型在岩溶地区小流域的径流模拟。为了进一步提高模拟精度,可以对AnnAGNPS模型进行修正,开发具有描绘岩溶含水层特点的有效参数,如孔隙度、渗透速率、落水洞、漏斗以及水力参数等的模型,未来可用于岩溶地区的非点源污染模拟。

参考文献:

- [1] 齐琳,林剑,马继力,等. AnnAGNPS模型应用于辽河源头小流域的主要参数确定方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 865-870.
QI Lin, LIN Jian, MA Ji-li, et al. Methods for determining the main parameters of AnnAGNPS model applied to the watershed of the source areas of the Liaohe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 865-870.
- [2] Haas M B, Guse B R, Fohrer N. Assessing the impacts of best management practices on nitrate pollution in an agricultural dominated lowland catchment considering environmental protection versus economic development[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017 (196): 347-364.
- [3] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A non-point-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989: 167-173.
- [4] Yuan Y, Bingner R L, Boydston J. Development of TMDL watershed implementation plan using Annualized AGNPS[C]. Reno, Nevada: Proceedings of the 8th Federal Interagency Sedimentation Conference, 2006.
- [5] Zema D A, Bombino G, Denisi P, et al. Prediction of surface runoff and soil erosion at watershed scale: Analysis of the AnnAGNPS model in different environmental conditions[M]. Intech Open Press Publisher, 2012: 8-28.
- [6] 樊娟,刘春光,石静,等. 非点源污染研究进展及趋势分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1306-1311.
FAN Juan, LIU Chun-guang, SHI Jing, et al. Advances and tendencies of the study on non-point source pollution[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(4): 1306-1311.
- [7] 黄金良,洪华生,杜鹏飞,等. AnnAGNPS模型在九龙江典型小流域的适用性检验[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142.
HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, DU Peng-fei, et al. Testing AnnAGNPS for water quality modelling in typical sub-watershed in Jilulong River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8): 1135-1142.
- [8] 程炯,吴志峰,刘平,等. 珠江三角洲典型流域AnnAGNPS模型模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 842-846.
CHENG Jiong, WU Zhi-feng, LIU Ping, et al. AnnAGNPS modeling of agricultural non-point source pollution in the typical watershed of the Pearl River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 842-846.
- [9] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等. 三峡库区大宁河流域径流泥沙的AnnAGNPS定量评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 148-152.
HUA Li-zhong, HE Xiu-bin, YAN Chang-zhou, et al. Evaluation of runoff and sediment from Daning River watershed in Three Gorges Reservoir region based on AnnAGNPS model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 148-152.
- [10] 高银超,鲍玉海,唐强,等. 基于AnnAGNPS模型的三峡库区小江流域非点源污染负荷评价[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊1): 119-126.
GAO Yin-chao, BAO Yu-hai, TANG Qiang, et al. Applying AnnAGNPS to estimate non-point pollution loading from Xiaojiang Basin in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(Suppl 1): 119-126.
- [11] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等. AnnAGNPS模型在黄土丘陵沟壑区小流域的适用性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 13-19.
YAN Sheng-jun, GUO Qing-xia, YAN Rui, et al. The construction of AnnAGNPS model databases of Chakou watershed in loess hilly-gully region[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(1): 13-19.
- [12] Ford D, Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. England: Unwin Hyman Ltd., 2007: 17-33.
- [13] Song X, Gao Y, Green S M, et al. Nitrogen loss from Karst area in China in recent 50 years: An in-situ simulated rainfall experiment's assessment[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(23): 10131-10142.
- [14] 蒙海花,王腊春. 岩溶流域水文模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1311-1318.
MENG Hai-hua, WANG La-chun. Advance in karst hydrological model[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1311-1318.
- [15] Worthington S R H. Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(7): 1665.
- [16] Kovačič G, Ravbar N. Analysis of human induced changes in a karst landscape: The filling of dolines in the Kras Plateau, Slovenia[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 447: 143-151.
- [17] Daher W, Pistre S, Kneppers A, et al. Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problems: A preliminary approach to artificial recharge assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 408(3/4): 189-202.
- [18] Malagò A, Efstathiou D, Bouraoui F, et al. Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the

- Island of Crete[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 64–81.
- [19] Amatya D M, Jha M, Edwards A E, et al. Application of SWAT model on Chapel Branch Creek Watershed with a Karst Topography, SC[C]. US: Annual International Meeting Sponsored, ASABE, 2010.
- [20] 钟科元. AnnAGNPS模型参数空间聚合水文效应研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015: 81–92.
- ZHONG Ke-yuan. Hydrological response to parameter spatial aggregation in AnnAGNPS[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015: 81–92.
- [21] 黄志霖, 田耀武, 肖文发. AGNPS模型机理与预测偏差影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1806–1813.
- HUANG Zhi-lin, TIAN Yao-wu, XIAO Wen-fa. AGNPS model and factors affecting its prediction deviation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1806–1813.
- [22] Silburna D M, Loch R J. Evaluation of the CREAMS model. I. Sensitivity analysis of the soil erosion sedimentation component for aggregated clay soils[J]. *Journal of Soil Resource*, 1989, 27: 545–561.
- [23] Fred D T, Ronald L, Lyle D F, et al. Cheney lake ceap project: Validation/calibration, streamflow[C]. US: 2nd Joint Federal Interagency Conference, USDA–NRCS, 2010.
- [24] Fred D T, Lyle D F, Lisa F. Cheney lake ceap project: Validation/ calibration, sediment[C]. US: 2nd Joint Federal Interagency Conference, USDA–NRCS, 2010.
- [25] Fred D T, Ronald L B, Lisa F. Cheney lake ceap project: Validation/ calibration, nutrient[C]. US: 2nd Joint Federal Interagency Conference, USDA–NRCS, 2010.
- [26] Kiesel J, Fohrer N, Schmalz B, et al. Incorporating landscape depressions and tile drainages of a northern German lowland catchment into a semi-distributed model[J]. *Hydrology Processes*, 2010, 24(11): 1472–1486.
- [27] 娄永才, 郭青霞. 岔口小流域非点源污染模型 AnnAGNPS 不确定性分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 956–964.
- LOU Yong-cai, GUO Qing-xia. Uncertainty analysis of an AnnAGNPS model used in the Chakou watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 956–964.
- [28] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, 50(3): 885–900.
- [29] Mwangi J K, Shisanya C A, Gathanya J M, et al. A modeling approach to evaluate the impact of conservation practices on water and sediment yield in Sasumua Watershed, Kenya[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(2): 75–90.
- [30] Pradhanang S M, Briggs R D. Effects of critical source area on sediment yield and streamflow[J]. *Journal of Water and Environment*, 2014, 28(2): 222–232.
- [31] 贾宁凤, 段建南, 李保国, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 23–27.
- JIA Ning-feng, DUAN Jian-nan, LI Bao-guo, et al. Soil erosion quantitative evaluation of small watershed in Loess Plateau based on AnnAGNPS model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12): 23–27.
- [32] 娄永才, 郭青霞. 岔口小流域 AnnAGNPS 模型参数敏感性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 207–215.
- LOU Yong-cai, GUO Qing-xia. Sensitivity analysis of AnnAGNPS model parameters in Chakou watershed[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(3): 207–215.
- [33] 赖格英, 易姝琨, 刘 维, 等. 基于修正 SWAT 模型的岩溶地区非点源污染模拟初探: 以横港河流域为例[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1560–1575.
- LAI Ge-ying, YI Shu-kun, LIU Wei, et al. Non-point source pollution simulation in karst region based on modified SWAT model: A case study in Henggang river basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2018, 30(6): 1560–1575.
- [34] 钟科元, 陈兴伟, 陈 莹, 等. 地形和土壤/土地利用空间聚合对径流和输沙量影响的 AnnAGNPS 模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 127–135.
- ZHONG Ke-yuan, CHEN Xing-wei, CHEN Ying, et al. Simulation of effects of topography and soil/land use spatial aggregation on sediment yield and runoff using AnnAGNPS[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(8): 127–135.
- [35] Mohammed H, Yohannes F, Zeleke G. Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo, Ethiopia[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2005, 6(2): 97–109.
- [36] Sarangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(2): 241–256.
- [37] 钟科元, 陈 莹, 陈兴伟, 等. 基于农业非点源污染模型的桃溪流域日径流泥沙模拟[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 130–134.
- ZHONG Ke-yuan, CHEN Ying, CHEN Xing-wei, et al. Simulation of daily runoff sediment in Taoxi watershed based on AnnAGNPS model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6): 130–134.
- [38] Wu L, Wang S, Bai X, et al. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601(14): 1449–1465.
- [39] 席 庆. 基于 AnnAGNPS 模型的中田河流域土地利用变化对氮磷营养盐输出影响模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 46–51.
- XI Qing. Effects of land use change on nutrient export in the Zhongtian river watershed based on the AnnAGNPS model[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014: 46–51.
- [40] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11): 1617–1627.
- [41] Karki R, Tagert M L M, Paz J O, et al. Application of AnnAGNPS to model an agricultural watershed in East-Central Mississippi for the evaluation of an on-farm water storage (OFWS) system[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 192: 103–114.
- [42] 杨振华, 宋小庆. 西南喀斯特地区坡地产生流过程及其利用技术[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2931–2943.
- YANG Zhen-hua, SONG Xiao-qing. Slope runoff process and its utilization technology in southwest Karst area[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2931–2943.