

SWAT 模型土壤空间离散化对径流和输沙模拟结果的影响

高怡婷^{1,2}, 钟科元², 钟小敏³, 汪 姚², 罗栋梁¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,冻土工程国家重点实验室,兰州 730000;

2.赣南师范大学地理与环境工程学院,江西 赣州 341000;3.湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081)

摘要:以东江源为研究区,采用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型,通过设置 11 种子流域划分方案,并保持土地利用和地形 2 个要素不变,以定量分析子流域划分引起的土壤离散化对产流产沙过程的影响。结果表明:(1)随着子流域数量的增加,土壤类型空间离散化趋势越明显,其中面积最大的泥红壤面积显著减少($P<0.05$),面积第 2 和第 3 的渗育质水稻土和黄壤显著增加($P<0.05$),面积最小的石质土在子流域数量少(11~267 个)时该地类被概化完全消失,子流域数量增加到 524 个后,该地类面积呈增加趋势($P<0.05$)。(2)土壤空间离散化导致年均径流量(1.32%)和输沙量减少($P<0.05$),且对输沙量影响更显著(18.07%, $P<0.01$)。(3)随着土壤离散程度增加,年平均最大 1 天、连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量均显著减少(16.64%,17.54%,17.34%, $P<0.01$),而径流量变化不显著(0.59%,0.89%,0.83%, $P>0.05$)。(4)土壤空间离散化导致洪水过程输沙量峰值显著减少,而对洪峰径流量影响并不显著。子流域划分引起的土壤离散化主要通过土壤侵蚀因子 K 值变化而引起输沙量变化。研究结果将为分布式水文模型不确定性研究和提高模拟精度提供参考。

关键词: SWAT; 空间离散化; 径流; 输沙; 水文效应

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0101-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.015

Effect of Soil Parameter Spatial Discretization on Runoff and Sediment Transport Simulation Results in SWAT Model

GAO Yiting^{1,2}, ZHONG Keyuan², ZHONG Xiaomin³, WANG Yao², LUO Dongliang¹

(1.State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2.College of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000; 3.College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract: Dongjiang River Basin was selected as the study area, which is located in the south of Jiangxi Province, China. The SWAT model was used to evaluate the influence of different watershed delineation on runoff and sediment yield. Eleven scenarios including the sub-watershed thresholds were 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1 100, 1 500, 2 000, 3 200, 4 000 hm^2 , were used to analyze the impact of soil spatial discretization on runoff and sediment yield. Terrain and land use data were input a single terrain and soil data to fix the effect of terrain and soil data spatial discretization. The results were as follow: (1) The discretization effects of soil parameter significantly increased with the increasing of sub-watershed, the largest area of latosol reduced significantly ($P<0.05$), the second largest area of osmotic paddy soil and the third largest area of yellow soils increased significantly ($P<0.05$). Lithosol soil, the smallest area soil type, was totally disappeared by soil discretization when the number of sub-watershed was under 267, while it increased when the number of sub-watershed was more than 524 ($P<0.05$). (2) The spatial discretization of soil parameters reduced the annual runoff (1.32%, $P<0.05$) and annual sediment yield (18.07%, $P<0.05$), and the sediment yield decreased greater than annual runoff. (3) The annual maximum one-day, annual maximum five-day, and annual maximum seven-day sediment yield decreased significantly with the increase of delineation degree

收稿日期: 2021-06-01

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405700); 江西省教育厅课题项目(GJJ180784)

第一作者: 高怡婷(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事寒区环境与工程研究。E-mail: gaoyiting@nieer.ac.cn

通信作者: 钟科元(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事流域水沙过程模拟研究。E-mail: zkygeo@163.com

(16.64%, 17.54%, 17.34%, $P < 0.01$), while the sub-watershed delineation had less influence on the annual maximum one-day, annual maximum five-day and annual maximum seven-day runoff yield (0.59%, 0.89%, 0.83% $P > 0.05$); (4) The peak sediment yield decreased significantly with the increase of delineation degree, while the effect for peak runoff was not significant. The soil parameters spatial discretization of watershed subdivision mainly affected the change of sediment yield through the change of K -factor. The research results will provide reference information for the selection of optimal computing units, improving the simulation accuracy and reducing the uncertainty of model simulation.

Keywords: SWAT; spatial discretization; runoff; sediment; hydrological effect

分布式水文模型考虑了水文气象要素的空间异质性,能够反映下垫面和气象要素的空间变化,已成为研究变化环境下水文过程的重要工具^[1-2]。分布式水文模型根据流域土壤、土地利用类型和地形等将流域划分为一定数量的计算单元(如子流域、网格和分室)^[3],并保持计算单元内的下垫面要素和参数的一致性,通过求解计算单元模型方程,从而模拟流域水文过程^[4],计算单元的大小会影响流域下垫面概化程度的变化^[5],进而影响水文模型模拟效率和模拟结果^[6]。这种将流域划分为模型运行的较小地域单元的方法称为离散化^[7]。分析下垫面要素的空间离散化对模拟结果的影响和提高模拟精度具有重要意义。

SWAT 模型由于具有较为完善的模型结构,可进行长期连续模拟,已被国内外学者广泛使用^[8-9]。SWAT 模型模拟结果受到子流域划分的影响^[10]。一些学者的研究表明,子流域划分对流域产流模拟影响较小,而对产沙模拟影响较大;张雪松等^[11]研究发现,流域产流量随子流域数量的增加而增大,且变化幅度较小,产沙量随子流域数量的增加而减少,且变化幅度大,当超过一定水平时亚流域数量的变化对产流量和产沙量几乎没有影响;卢文喜等^[12]、郝芳华等^[13]、史晓亮等^[14]、Jha 等^[6]的研究也发现,径流量对子流域数量敏感性低,产沙量相对较高,且指出当子流域数量达到一定水平时,增加子流域数量对模型输出结果影响较小。张召喜等^[15]的研究表明,随着子流域数量的增加,年均径流深度变化不大,年均输沙量减少,且输沙量随子流域划分水平改变主要是由河网密度和河道坡度的变化引起的。这些研究主要分析了子流域划分引起各要素(土地利用、土壤、地形等)变化对模拟结果的综合影响,并没有区分具体的各个要素。定量区分子流域划分引起的各个要素概化对模拟结果的影响可为降低模拟不确定性提供参考。

本文聚焦子流域划分引起的土壤要素的变化,通过构建东江源水背水文站以上流域 SWAT 模型;在此基础上,通过情景设置保持土地利用和地形数据不变,分析不同集水面积阈值下土壤的空间离散效应,并分析土壤空间离散化在年、日和洪水过程的时间尺度下对产流

产沙模拟结果的影响,旨在为该水文模型最优计算单元的选择,降低模拟结果的不确定性提供参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

本文以中国南方珠江流域一级支流东江源头(东江源)作为研究区(图 1),东江源流域位于江西省赣州市境内,地处寻乌县、定南县、安远县交界处,东江源涉及珠三角地区以及香港特别行政区共 3 000 多万人民的主要饮用水源。流域为典型的低纬度亚热带湿润季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,热量充足,雨量充沛,多年平均降水量为 1 601.2 mm,降水量集中,年际变化大,年内分配不均,流域内多年平均径流量 45.13 亿 m^3 ^[16]。本文以水背水文站(24°47′56″N,115°40′40″E)作为流域控制出口,流域控制面积为 904.4 km^2 。研究区海拔范围为 179~1 488 m,地形多为山地和丘陵。土地利用类型主要有耕地、林地、草地、建设用地、水域等,其中以林地为主,占总面积的 82.52%。土壤类型主要有泥红壤、黄壤、水稻土等,其中以泥红壤为主,占总面积的 80.41%。研究区内红壤铁元素含量较高,土壤呈现红色,由于缺乏碱金属和碱土金属而呈酸性,铝化作用显著,风化程度深,质地较黏重。研究区内黄壤是亚热带湿润地区发育的富含水合氧化铁的黄色土壤,腐殖质含量较高,土壤呈酸性。

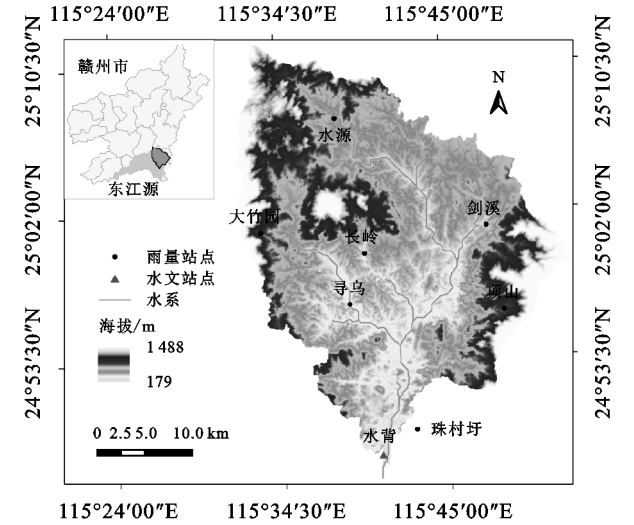


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

SWAT 模型运行需要完整详细的数据资料,包括 DEM 数据、气象数据(逐日降雨量、气温数据)、水文数据(流域内水背水文站的径流输沙数据)、土地利用数据、土壤数据(表 1)。

本文采用的数字高程模型数据(DEM)分辨率为

30 m,土地利用和土壤空间矢量数据来源于江西省水土保持研究院。1980—2016 年逐日最高气温、最低气温等数据来源于国家基本气象站点(图 1)。水背水文站上游 12 个雨量站点逐日降雨数据,以及水背水文站 1980—2016 年实测逐日径流量、输沙量数据来源于赣州市水文局。

表 1 SWAT 模型数据来源

数据类型	时间尺度和分辨率	数据来源
径流数据	水背水文站 1980—2016 年逐日径流量	赣州市水文局
输沙量数据	水背水文站 1980—2016 年逐日输沙量	赣州市水文局
降雨量数据	水背水文站上游 12 个雨量站点逐日降雨数据	赣州市水文局
平均气温、最高气温和最低气温	国家基本气象站点 1980—2016 年逐日气温数据	国家气象局
地形数据	30 m 数字高程模型数据	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
土壤和土地利用数据	土壤和土地利用空间矢量数据	江西省水土保持研究院

2 研究方法

2.1 SWAT 模型简介

SWAT 模型由美国农业部农业研究中心开发,从 90 年代至今,是发展迅速、影响较大的分布式水文模型。SWAT 模型可以充分考虑下垫面和气候等多种影响因子在空间上分布不均匀的特点,模拟流域降水以及径流形成过程,通过设置集水面积阈值,继而将流域划分为若干子流域,再依据不同地形、土地利用和土壤类型划分成多个水文响应单元(HRUs),进行汇总求得流域水量平衡要素。SWAT 模型提供了 2 种计算地表径流的方法:SCS 径流曲线数法和 Green & Ampt 入渗方法^[17]。本文模拟采用 SCS 径流曲线数法,它考虑了流域下垫面的特点,如土壤、坡度、植被、土地利用等,并可应用于无资料流域,能针对未来土地利用情况的变化,预测降雨径流关系的可能变化^[18]。计算公式为:

$$Q_{surf} = \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)}$$

(1)

式中: Q_{surf} 为当日地表径流(mm); R 为当日降水量(mm); S 为当日最大滞留量(mm)。

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10$$

(2)

式中: CN 为径流曲线数。

SWAT 模型采用修正的通用土壤流失方程(MUSLE)来计算每个子流域的土壤侵蚀和泥沙量^[19]。修正后的 MUSLE 方程使用径流因子代替降雨动能,不再需要泥沙输移系数,改善了泥沙产量的预测,并且可以将方程应用于单次暴雨事件中^[17]。计算公式为:

$$A = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K \times LS \times C \times P \times CFRG$$

(3)

式中: A 为日产沙量(t); Q_{surf} 为地表径流(mm/hm²); q_{peak} 为峰值流量(m³/s); $area_{hru}$ 为水文响应单

元面积(hm²); K 为土壤侵蚀因子; LS 为地形因子; C 为植被覆盖和作物管理因子; P 为保持措施因子; $CFRG$ 为土壤粗糙度因子。

2.2 模拟方案

子流域划分过程中,SWAT 模型基于 D8 方法,结合最陡坡度原则和最小集水面积阈值的概念,自动生成流域的河网图以及子流域之间的拓扑关系^[20]。通过设置不同的集水面积阈值模拟生成水系,将整个流域划分为若干个子流域,集水面积阈值越小,生成的子流域数量越多。对于东江源流域,SWAT 模型给出的集水面积阈值范围为 812~162 469 hm²,本文结合前人研究以及研究区特点,设置集水面积阈值依次为 4 000, 3 200,2 000,1 500,1 100,800,400,200,100,50,25 hm²,最终得到 11 种划分方案,子流域数量分别为 11,17,29, 39,47,69,137,267,524,1 007,1 955。为了定量分析土壤参数空间离散的水文效应,本文将输入的土地利用类型改为单一类型(全部为林地),地形(坡度)数据设置成单一坡度,消除土地利用和地形对径流泥沙模拟的影响。不同子流域划分方案见图 2 和表 2。

2.3 参数离散对 SWAT 模拟评价

本文采用年均径流深度和年均输沙量作为年指标,以及年最大 1 天和年连续最大 5 天、年连续最大 7 天和洪水过程的径流量和输沙量作为洪水过程指标。在不同子流域划分方案中,采用 Manner-Kendall 趋势分析方法判断径流量、输沙量变化趋势。采用变化率来表示不同流域划分数量所引起的模拟结果的变化,其计算公式为:

$$RE = \frac{(V_i - V_{min})}{V_{min}} \times 100\%$$

(4)

式中: V_i 为不同子流域划分所得到的模拟值; V_{min} 为集水区阈值最小时得到的模拟值,即子流域数量为 1 955 个时的模拟值。

3 结果与分析

3.1 土壤类型的离散效应

不同子流域划分方案下,输入模型后的各类土壤面积变化明显(图 3)。子流域数量由 11 增加到1 955 时,面积最大的泥红壤呈极显著下降趋势($P < 0.001$),降幅为 6.38%;黄壤、渗育质水稻土的面积呈

极显著增加趋势($P < 0.001$),增幅分别为 51.51%, 39.33%;潯育质水稻土的面积呈增加趋势,增幅为 11.32%。子流域数量为 11~267 时,石质土被概化完全消失,随着子流域数量的增加,达到 524 个后,石质土面积呈增加趋势,由 177.05 hm² 增加到 177.83 hm²。各类土壤类型离散化越来越明显。



图 2 11 种子流域划分方案

3.2 土壤参数空间离散化对径流量的影响

基于 SWAT 模型模拟不同土壤离散化程度下的年径流变化(表 3)发现,随着子流域数量增加,径流模拟值呈波动下降趋势,之后趋于相对平稳的状态,最大变化率为 1.32%。子流域数量由 17 增加到 29 以及由 69 增加到 137 时,年均径流深度减幅较大(最大变化率为 1.06%),子流域数量超过 267 以后,年均径流深度趋于稳定(最大变化率为 0.39%)。随着子流域数量的增加,年平均径流呈显著减少趋势,不同

子流域划分方案对年平均径流的变化影响不大($RE < 1.32\%$)。由此表明,土壤的参数离散化会导致年径流量下降,且随着离散程度的增加,下降趋势越显著($P < 0.05$),子流域到达一定数量(267 个)后,径流量变化趋于平稳。

为进一步分析土壤参数空间离散对极端洪水事件径流量的影响,本文分析了不同情景下土壤离散化对年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天径流量的影响。从图 4 可以看出,随着子流域数量的增加,

年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天径流量均呈先减少后增加的波动变化,总体变化幅度不大。与子流域数量为 11 相比,子流域数量为 17,29,39,47,69,137,267,524,1 007 的年最大 1 天径流量分别减少 2.03%,5.35%,3.81%,5.45%,2.39%,1.76%,0.60%,0.72%,0.59%;连续最大 5 天的径流量分别减少 0.75%,1.66%,1.35%,1.73%,0.78%,1.00%,0.78%,0.87%,0.89%;连续最大 7 天的径流量分别减少 0.47%,1.29%,0.97%,1.35%,0.52%,0.89%,0.76%,0.81%,0.83%。由此可见,从极端洪水事件来看,土壤参数离散化对径流的影响并不显著($P>0.05$)。

表 2 不同子流域划分方案及特征参数

方案	集水面积 阈值/hm ²	子流域		水文响应单元	
		数量/个	平均	数量/个	平均
			面积/hm ²		面积/hm ²
1	4000	11	8218.18	142	636.62
2	3200	17	5317.65	218	414.68
3	2000	29	3117.24	371	243.67
4	1500	39	2317.95	471	191.93
5	1100	47	1923.40	546	165.57
6	800	69	1310.14	782	115.60
7	400	137	659.85	1319	68.54
8	200	267	338.58	2393	37.78
9	100	524	172.52	4114	21.97
10	50	1007	89.77	7116	12.70
11	25	1955	46.24	12344	7.32

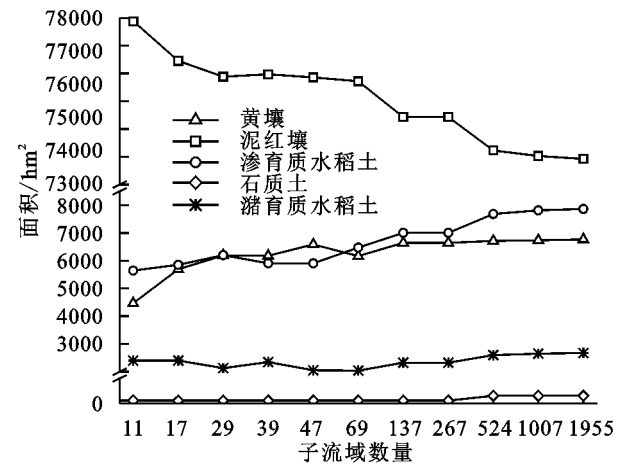


图 3 各类土壤面积随子流域数量的变化情况

为更直观反映土壤参数空间离散对径流过程的影响,选取 2009—2016 年间 2016 年 3 月 21 日暴雨洪水事件,分析土壤参数空间离散对日径流过程的影响。从图 5 可以看出,不同子流域划分方案的径流过程线之间差异并不大,土壤的空间离散化对径流过程影响并不显著。

从年径流量、极端洪水事件和洪水过程分析可以看出,子流域划分方案对径流量的影响并不大(最大

变化量 11.01%)。本文采用径流曲线数法模拟径流过程,而 CN 值是径流曲线数法决定地表径流量的最敏感和唯一变量参数。由表 3 可知,CN 值的变化范围为 72.179~72.517,其随子流域数量变化趋势与年径流量基本相同。子流域数量改变了土壤离散程度,导致土壤数据的空间格局发生变化,从而使流域 CN 值的面积加权平均值发生改变,而在东江源流域子流域划分对流域面积加权 CN 值影响较小($<0.46\%$),对径流量变化的影响也较小。

表 3 径流输沙模拟值与 CN 值、K 值

方案	子流域 数量	年均径流 深度/mm	CN 值	年均 输沙量/t	K 值
1	11	1116.654	72.517	81025.00	0.0920
2	17	1121.058	72.341	77043.75	0.0918
3	29	1109.198	72.251	74092.50	0.0917
4	39	1109.765	72.268	77176.25	0.0918
5	47	1106.494	72.190	75526.25	0.0921
6	69	1112.250	72.248	78475.00	0.0915
7	137	1101.916	72.199	75097.50	0.0907
8	267	1106.189	72.195	75982.50	0.0901
9	524	1105.622	72.182	73403.75	0.0898
10	1007	1105.535	72.182	71782.50	0.0896
11	1955	1104.183	72.179	68625.00	0.0895

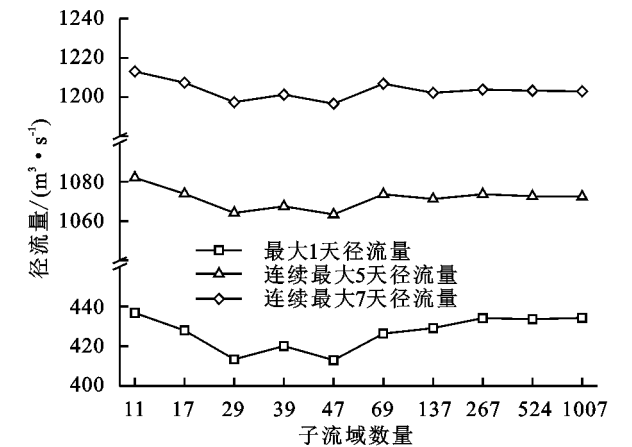


图 4 最大 1 天、连续最大 5 天、连续最大 7 天径流量

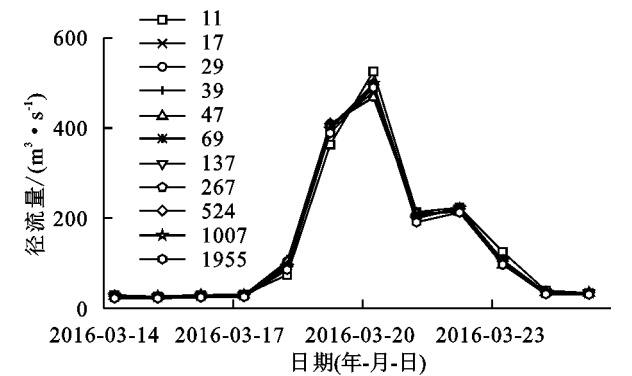


图 5 洪水事件径流量

3.3 土壤参数空间离散化对输沙量的影响

从表 3 可以看出,输沙量随子流域数量的增加呈

显著减少趋势($P<0.05$)。当子流域数量由 11 个增加到 29 个时,年均输沙量急剧下降,由 81 025 t 下降到 74 092.5 t;子流域数量由 29 增加到 267 时,年均输沙量呈波动上升趋势,由 74 092.5 t 增加到 75 982.5 t;当超过 267 个以后,年均输沙量再次下降,由 75 982.5 t 下降到 68 625 t。子流域数量为 11 与子流域数量为 1 955 的划分方案之间的输沙量变化变化率为 18.07%,子流域划分对输沙量模拟结果影响显著。

从年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量(图 6)来看,在子流域数量为 11~47 以及 69~1 007 内,年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量均呈减少趋势($P<0.01$),子流域数量在 47~69 时,年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量呈增加趋势。与子流域数量为 11 相比,子流域数量为 17,29,39,47,69,137,267,524,1 007 的年最大 1 天输沙量分别减少 4.65%,10.10%,10.39%,13.55%,8.92%,12.01%,11.83%,15.25%,16.64%;连续最大 5 天的输沙量分别减少 3.50%,7.09%,8.17%,10.66%,7.65%,11.96%,11.89%,15.58%,17.54%;连续最大 7 天的输沙量分别减少 3.40%,6.98%,7.76%,10.25%,7.36%,11.74%,11.76%,15.39%,17.34%。随着土壤离散程度增加,年平均最大 1 天、连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量显著减少(16.64%,17.84%,17.34%),且连续最大 5 天输沙量减少趋势更显著($P<0.001$)。

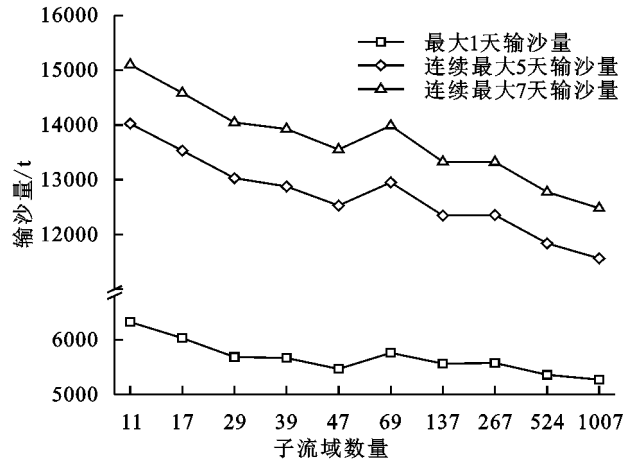


图 6 最大 1 天、连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量

从 2016 年 3 月 21 日暴雨洪水事件(图 7)来看,输沙量随着子流域数量的增加而减少,即随着土壤空间离散程度的增加,输沙量峰值显著减少,子流域数量 1 955 的方案与子流域数量 11 的方案输沙量峰值之间减少的幅度为 31.93%。

由于固定了土地利用和地形,土壤参数离散化主要通过 MUSLE 方程中的土壤侵蚀因子(K)取值和

空间分布发生变化,进而改变输沙量。土壤侵蚀因子受土壤物理性质的影响,如土壤结构、土壤渗透性、机械组成等,反映不同类型土壤抵抗侵蚀力的高低。本研究区面积加权 K 值随着子流域数量的增加先增加后减少(表 3),这与输沙量变化趋势相类似。

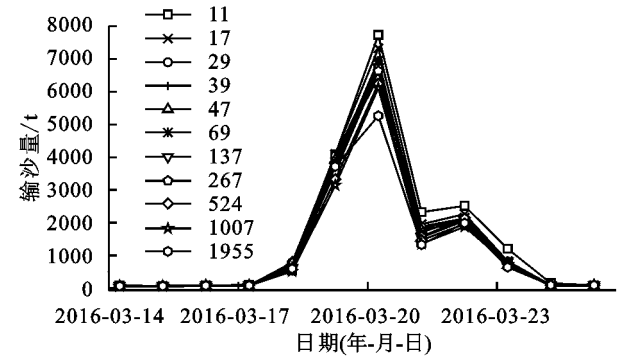


图 7 洪水事件输沙量

4 讨论

4.1 子流域划分对模拟结果的影响

SWAT 模型集水面积阈值的设置决定子流域数量,对模型土壤参数的空间离散产生影响,并在一定程度上影响模型模拟结果的准确性。由于不同研究区具有不同的气候、地形、土地利用和土壤类型,不同研究区对于子流域划分对径流输沙模拟的影响结果也不尽相同。王艳君等^[21]对秦淮河流域研究表明,子流域划分对径流量的模拟影响不大($RE<4.23\%$);Lin 等^[22]对晋江西溪流域的研究表明,随着子流域数量的增加,年均径流量变化不大($RE<0.79\%$),年输沙量呈显著减少趋势($RE<29.3\%$);胡连伍等^[23]对丰乐河流域的研究表明,子流域划分对径流模拟结果影响非常小,而随着子流域数量增加,输沙量呈先增加后减少趋势;李曼曼等^[17]针对气候复杂的云南洱海流域的研究发现,子流域数量对径流影响的相对偏差为 0.89%,而年均输沙量随着子流域数量增加而减少,相对偏差达 21.21%;钟科元等^[24]采用 AnnAGNPS 模型在桃溪流域研究发现,土壤空间聚合导致年平均径流量和输沙量减少,且对输沙量影响更显著($P<0.001$);王晓燕等^[25]和田耀武等^[26]在华北潮河流域大阁子流域和三峡库区黑河小流域也得到了类似的结论。本文设计了 11 种不同子流域划分方案,定量分析了土壤参数离散化对模型模拟结果的影响,结果表明,随着子流域数量的增加,土壤参数的空间离散导致了径流和输沙的减少,且对输沙的影响更加地显著,其中径流量的变化 $<1.32\%$,输沙量的变化 $<18.07\%$ 。本文分离了土壤离散程度对模拟结果的影响,揭示了土壤离散化这单一要素变

化对模拟结果的影响,可以为模拟不确定性研究和最优计算单元提供参考。

本文采用径流曲线数法模拟径流过程,其中 CN 值是径流曲线数法决定径流量的最敏感和唯一变量参数, CN 值与流域前期的土壤湿润程度、坡度、植被、土壤类型和土地利用方式等因素有关,主要是由水文土壤类型和土地利用类型共同决定。本文土地利用方式以及坡度固定, CN 值主要由土壤类型决定。土壤渗透性是描述土壤入渗快慢的极为重要的土壤物理特征参数之一。随着土壤离散程度的增加,面积最大的泥红壤转化为其他类型土壤,渗透性较强的黄壤和石质土以及透水性中等的渗育质水稻土呈增加趋势,流域内土壤渗透性总体呈增加趋势,因此流域内 CN 值总体呈减少趋势。由表 3 可知, CN 值的变化范围为 72.179~72.517,随子流域数量的变化趋势与年径流量基本相同。子流域划分数量改变 CN 值的空间集总程度,使其统计特征值发生一定的变化,从而影响模型模拟径流量^[11],当子流域数量达到一定水平时, CN 值和径流量的变化趋于平稳,几乎不随子流域数量变化而变化。对于输沙量而言,子流域数量对流域产沙影响的主要原因是 MUSLE 中 K 值变化(土地利用和地形要素不变)。MUSLE 方程通过土壤侵蚀因子(K)取值和空间分布发生变化,进而改变输沙量,随着土壤空间离散化程度的增加, K 值呈显著下降趋势($P<0.01$),导致年输沙量和洪水事件输沙量峰值显著下降。本研究区面积加权 K 值与输沙量曲线变化趋势相类似,子流域划分引起土壤空间离散化,通过改变 K 值,进而影响输沙量的变化。

4.2 最佳子流域划分

SWAT 模型径流、输沙模拟结果对子流域数量的敏感性不同,对于如何确定最佳子流域划分单元的大小,不同的学者有不同的评判标准。部分学者认为,存在一定的子流域划分水平,即“拐点”,超过此水平时模型模拟结果对子流域划分变化的敏感性较低。Arabi 等^[27]在美国印第安纳州莫米河流域的研究发现,子流域划分的最佳面积为流域总面积的 4%;史晓亮等^[14]研究认为,最小集水面积阈值为流域总面积的 2%时最佳,增加子流域划分对径流模拟结果的影响较小,减少子流域划分则会导致模拟结果不稳定;李曼曼等^[17]研究认为,洱海流域最合理的子流域划分方案为 137 个,大于该值时,模拟的输沙量趋于稳定,对进一步提高模拟精度无明显效果。还有学者认为最佳子流域划分水平在一个范围之内,在该范围内模拟结果相对稳

定,陈肖敏等^[20]认为,大宁河流域的子流域划分数量在 37~121 个,卢文喜等^[12]认为,石头口门水库汇水流域子流域划分数量合理范围为 25~59 个。

本研究结果发现,当子流域数量>267 时,径流模拟量趋于稳定,而输沙量变化幅度较大,未达到稳定水平。由于东江源流域地形多为山地和丘陵,且土壤的空间分布差异大,子流域数量过少时,不能对流域下垫面特征进行详细描述导致输沙模拟结果不稳定。当子流域数量在 267~1 007 时,年均输沙量呈下降趋势,但下降速率减慢,而子流域数量在 1 007~1 955 时,年均输沙量的下降趋势加快,而子流域数量在 267~1 955 时, K 值的下降趋势减缓。子流域数量自 11 增加到 1 955 时,输沙量变化并没有发现明显的“拐点”的存在,因此无法判断针对土壤离散化的最优子流域划分。最佳子流域划分受到流域面积、下垫面复杂程度等因素综合影响,研究区输沙量可能与各类土壤类型的变化特征有关。

5 结论

(1)随着子流域数量的增加,土壤类型空间离散化越来越明显,各类型土壤面积接近实际值。面积最大的泥红壤面积显著减少($P<0.05$),渗育质水稻土和黄壤面积显著增加($P<0.05$)。

(2)土壤空间离散化导致年均径流量(1.32%)和输沙量减少($P<0.05$),且对输沙量更显著(18.07%, $P<0.01$)。土壤空间离散化导致输沙量峰值以及年最大 1 天、连续最大 5 天、连续最大 7 天输沙量显著减少,年最大 1 天和连续最大 5 天、连续最大 7 天径流量先增后减,径流过程总体变化不显著。

(3)子流域划分引起的土壤离散化主要通过土壤侵蚀因子 K 值变化而引起输沙量变化。子流域划分对流域面积加权 CN 值影响较小,对径流量的影响也较小。

参考文献:

[1] 刘欢,甘永德,贾仰文,等.考虑空气阻力影响的流域水文过程模拟研究[J].自然资源学报,2018,33(8):1463-1474.

[2] 芮孝芳.论流域水文模型[J].水利水电科技进展,2017,37(4):1-7,58.

[3] FitzHugh T W, Mackay D. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model[J].Journal of Hydrology,2000,236(1/2):35-53.

[4] 李爱民.分布式水文模型研究进展[J].中国水运(下半月),2016,16(7):171-172.

[5] Bingner R, Garbrecht J, Arnold J, et al. Effect of wa-

- tershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(5): 1329-1335.
- [6] Jha M, Gassman P W, Secchi S, et al. Effect of watershed subdivision on swat flow, sediment, and nutrient predictions[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(3): 811-825.
- [7] 李硕, 孙波, 曾志远, 等. 遥感、GIS 辅助下流域空间离散化方法研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 183-189, 329.
- [8] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [9] 赖格英, 吴敦银, 钟业喜, 等. SWAT 模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 243-251.
- [10] Kim J G, Park Y, Yoo D, et al. Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds 1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(4): 963-972.
- [11] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 119-123, 128.
- [12] 卢文喜, 伊燕平, 张蕾, 等. 不同亚流域划分数量对 SWAT 模型模拟结果的影响[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 23-25.
- [13] 郝芳华, 张雪松, 程红光, 等. 分布式水文模型亚流域合理划分水平刍议[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 75-78.
- [14] 史晓亮, 李颖, 赵凯, 等. 流域离散化对分布式水文模型径流模拟的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 30-36.
- [15] 张召喜, 罗春燕, 张敬锁, 等. 子流域划分对农业面源污染模拟结果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1986-1993.
- [16] 游小燕, 刘英标, 华芳. 东江源区水环境保护策略探析[J]. 人民珠江, 2007, 158(1): 72-74.
- [17] 李曼曼, 韩会玲, 刘晓英, 等. SWAT 模型最佳子流域划分方案研究: 以云南洱海流域为例[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 185-189.
- [18] 叶许春, 张奇, 刘健, 等. 土壤数据空间分辨率对水文过程模拟的影响[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 575-583.
- [19] Williams J, Berndt H. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(6): 1100-1104.
- [20] 陈肖敏, 郭平, 彭虹, 等. 子流域划分对 SWAT 模型模拟结果的影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(23): 44-49.
- [21] 王艳君, 吕宏军, 姜彤. 子流域划分和 DEM 分辨率对 SWAT 径流模拟的影响研究[J]. 水文, 2008, 28(3): 22-25, 53.
- [22] Lin B Q, Chen X W, Yao H X. Threshold of sub-watersheds for SWAT to simulate hillslope sediment generation and its spatial variations[J]. Ecological Indicators, 2020, 111(1): e106040.
- [23] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 等. 不同子流域划分对流域径流、泥沙、营养物模拟的影响: 丰乐河流域个例研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 235-240.
- [24] 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.
- [25] 王晓燕, 林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 AnnAGNPS 模型模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(增刊 1): 46-52.
- [26] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 等. DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 846-853.
- [27] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M, et al. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of management practices with SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(2): 513-528.