

SWAT 模型子流域划分引起的土地利用变化对径流和输沙模拟结果的影响

钟小敏^{1,2,3}, 钟科元³, 高怡婷⁴, 李煜连¹, 涂浙³, 黄莉³, 帅红^{1,2}

(1.湖南师范大学 地理科学学院, 长沙 410081;

2.湖南师范大学 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081;

3.赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 4.中国科学院大学 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘 要:为揭示水文模型计算单元划分引起的土地利用变化对模拟结果的影响,采用 SWAT 模型,通过设置 11 种子流域阈值情景(4 000, 3 200, 2 000, 1 500, 1 100, 800, 400, 200, 100, 50, 25 hm²),并保持地形和土壤数据不变,定量分析了子流域划分引起的土地利用空间离散化对径流输沙模拟结果的影响。结果表明:(1)随着子流域数量的增加,流域内土地利用中面积最大的林地呈先增加后减少趋势,所有情景下林地面积均高于实际林地面积;而随着土地利用离散程度的增加耕地面积呈减少趋势,水域、草地和建设用地面积则呈增加趋势并逐渐接近实际面积;(2)土地利用空间离散化导致年均径流量(1.85%)和输沙量(65.84%)减少,且对输沙量影响更显著;(3)土地利用空间离散化造成洪水过程和输沙峰值显著降低,并导致年最大 1 d、连续最大 5 d 和连续最大 7 d 输沙量显著下降($p < 0.01$)。综上所述,SWAT 模型不同子流域划分显著改变了流域土地利用分布,进而引起径流输沙有关参数变化,最终导致径流和输沙模拟结果的变化。

关键词:SWAT; 土地利用; 流域离散化; 径流; 输沙

中图分类号:P333; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0052-07

Effect of Land Use Change Caused by Sub-watershed Division in SWAT Model on Runoff and Sediment Simulation

ZHONG Xiaomin^{1,2,3}, ZHONG Keyuan³, GAO Yiting⁴, LI Yulian¹,

TU Zhe³, HUANG Li³, SHUAI Hong^{1,2}

(1.School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2.Hunan Key

Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

3.School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

4.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, University of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to reveal the effect of land use change caused by the calculation of unit division in hydrological models on simulation result, eleven scenarios including 4 000, 3 200, 2 000, 1 500, 1 100, 800, 400, 200, 100, 50, 25 hm² of the sub-watershed thresholds, were used to analyse the effect of land use spatial discretization on runoff and sediment simulation with the SWAT model. Terrain and soil data were input with a single terrain and soil data-set to fix the effect of terrain and soil data spatial discretization. The results showed that: (1) With the increasing number of sub-watersheds, the forestland area increased at first and then decreased, and the area of the forestland was higher than that of the actual forestland area in all scenarios; however, the area of cultivated land decreased with the increasing of the land use discretization degree, moreover, the area of water, grassland and construction land increased and gradually approached the actual area; (2) The spatial discretization of land use led to the decrease of annual average runoff yield (1.85%) and

收稿日期:2022-02-09

修回日期:2022-03-02

资助项目:江西省教育厅科技项目(GJJ211441);国家自然科学基金(41601600);赣州市科技计划项目(202101094931,[2020]60);赣南师范大学大学生创新创业项目(CX200001);江西省自然科学基金(20202BABL203031);江西省城市固废低碳循环技术重点实验室(赣南师范大学)开放基金(20212BCD42015)

第一作者:钟小敏(1996—),女,江西新余人,硕士研究生,研究方向为气候变化与流域水文过程模拟。E-mail:2531563008@qq.com

通信作者:钟科元(1987—),男,江西赣州人,博士,讲师,主要从事环境地理学研究。E-mail:zhongkeyuan@gnnu.edu.cn

sediment yield (65.84%), which had a more significant effect on sediment yield than runoff; (3) The land use spatial discretization resulted in a significant decrease in the peak value of sediment in flood processes, and resulted in a significant decrease in the sediment yield of maximum one-day, continuous maximum five-day and continuous maximum seven-day ($p < 0.01$) with the increasing of the discretization degree. In conclusion, sub-watershed division significantly changed the distribution of land use in the basin, and then induced the change of runoff and sediment yield parameters, finally, it led to the change of runoff and sediment simulation.

Keywords: SWAT; land use; watershed discretization; runoff; sediment

在人类活动与气候变化的共同影响下,土地利用/覆被变化及其水文效应成为研究热点^[1-2]。合理评价土地利用变化对水文过程的影响对流域水土资源合理利用具有重要意义^[3]。分布式水文模型因其较强的物理机理,通过计算单元划分反映流域下垫面及水文要素的空间异质性^[4],能模拟流域不同下垫面特征下的水沙过程,近年来已被广泛应用于土地利用变化的水文效应研究^[5-6]。分布式水文模型根据流域内地形、土壤和土地利用等空间分布将流域划分为一定数量的计算单元,计算单元内地形、土壤和土地利用具有一致性,通过这些单元求解模型方程,以此来预测流域响应。然而地形、土壤和土地利用等输入数据的分辨率往往小于这些计算单元的空间分辨率^[7],以致每个计算单元的数值计算会存在某种程度的集总,模型通过对输入数据进行空间集总来实现流域离散化,而输入数据集总程度对模拟结果具有一定的影响^[8]。因此,分析水文模型计算单元划分导致的流域离散化对模拟结果的影响,对减少模拟不确定性、构建高精度的水文模型具有重要意义。

在分布式水文模型发展初期,一些研究已经注意到了计算单元划分引起的流域离散化对模拟结果的影响^[9-10]。部分学者对分布式水文模型计算单元划分引起的下垫面空间聚合对流域产流产沙过程的影响开展研究^[11-12],普遍认为子流域划分对径流的影响比较小^[13-14],对泥沙的影响比较大^[15-16]。张雪松等^[17]发现子流域划分通过改变 CN 值的空间集总程度,从而影响流域产流量,同时通过改变水文响应单元数量和面积以及通用土壤流失方程中各因子参数值的统计值,对流域产沙量造成影响。Chen 等^[18]从模型机理角度分析了 SWAT 模型子流域划分对模拟结果的影响,认为径流量和输沙量受输入参数空间集总与模型结构两个因素的共同影响。钟科元等^[19]在桃溪流域进行 AnnAGNPS 模拟分析发现土壤/土地利用参数空间聚合主要通过改变土壤侵蚀因子和地表覆被与作物栽培管理因子等参数的取值与空间分布,从而导致年平均输沙量减少。

综上所述,子流域划分引起的空间离散化主要分

为地形、土壤和土地利用要素的空间离散化,子流域划分方案通过影响这 3 种下垫面要素,进而影响模拟结果。模型对下垫面属性刻画的准确性是影响模型不确定性的的重要因素,已有研究主要关注子流域划分引起的下垫面空间离散化对模拟结果的综合影响,缺乏探讨土地利用、土壤和地形空间离散化分别对水文过程的影响。同时,研究表明东江源是广州和香港地区 3 000 多万居民的主要饮用水源,然而大规模的矿山开采导致植被受到大面积破坏^[20],鉴于此,本文以东江源流域水背水文站以上流域为研究区,构建流域日尺度产流产沙 SWAT 模型,通过设置 11 种情景,输入单一地形和土壤数据,以揭示 SWAT 模型子流域划分引起的土地利用空间离散化对流域产流产沙过程的影响,研究结果为减少模型的不确定性、确定最优计算单元提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文以江西省境内东江源头水背水文站(24°47′56″N,115°40′40″E)以上流域(以下称东江源流域)为研究区(图 1),流域发源于江西省寻乌县桎髻钵山^[21],流域控制面积为 904.4 km²。东江源是深圳、广州以及香港等地 3 000 多万人的主要饮用水来源,该水源的安全与东江流域、珠三角流域经济的繁荣稳定密切相关^[20]。研究区地形以山地和丘陵为主,地势北高南低,海拔在 179~1 488 m。土地利用类型主要有林地、草地、耕地、建设用地和水域等,其中以林地最为典型,占总面积的 82.52%,土壤类型主要有泥红壤、黄壤、石质土、渗育质水稻土等,其中以泥红壤为主,占总面积的 80.41%。研究区属亚热带季风气候,降水年内分配不均,主要集中在 5—6 月份,水资源较为丰富,1979—2017 年多年平均气温为 20℃,年平均降雨量为 1 526.3 mm。该地区人类活动广泛,土地利用变化显著,对其径流和泥沙产生不同程度的影响。

1.2 数据来源

空间数据主要包括 DEM、土壤、土地利用和气象

水文数据。流域 DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>),其空间分辨率为 30 m;土壤和土地利用数据来源于江西省水土保持研究院。本文所用的水文气象数据为水背水文站上游 12 个雨量站点 2008—2016 年逐日降雨数据(源于赣州市水文局)、水背水文站 1980—2016 年日径流量和输沙量数据(源于赣州市水文局)、寻乌国家气象站 1980—2016 年逐日最高气温、最低气温、太阳辐射和风速等数据(源于国家气象局)。



图 1 研究区站点分布

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

1994 年美国农业部农业研究中心开发出建立在地理信息系统基础之上的 SWAT 模型^[22]。模型根据流域地形、河流等进行子流域划分,再通过子流域关键自然要素的输入建立自然条件下的水文模型,并以不同的时间尺度模拟各子流域的径流、输沙等。模型主要采用 Green&Ampt 入渗方法和径流曲线数(curve number)法计算地表径流量,其中径流曲线数法应用最为广泛^[14,23];采用 MUSLE 计算地表输沙量^[24]。

2.2 模拟方案

SWAT 模型基于以下两个方面实现流域离散化:一是基于设定的阈值划分子流域,阈值越小,子流域划分数量越多;二是在每个子流域内进一步划分水文响应单元(HRUs),HRUs 具有相同的地形、土壤和土地利用属性和参数^[8]。为进一步分析 SWAT 模型子流域划分引起的土地利用空间离散化对模拟结

果的影响,本文在前人的研究基础上^[15,25],将土壤固定为泥红壤,坡度设置为单一坡度,设置 11 种情景(表 1)以分析土地利用空间离散化对模拟结果的影响。11 种方案的子流域集水面积阈值分别为 4 000, 3 200,2 000,1 500,1 100,800,400,200,100,50,25 hm²,对应的子流域数量分别为 11,17,29,39,47,69, 137,267,524,1 007,1 955 个,同时设定土地利用面积阈值为 5%来确定子流域中 HRUs 的数量。

表 1 各土地利用空间离散化方案的特征参数

方案	子流域		水文响应单元	
	个数/个	平均面积/hm ²	个数/个	平均面积/hm ²
1	11	8218.55	25	3616.16
2	17	5317.88	37	2443.35
3	29	3117.38	63	1434.98
4	39	2318.05	83	1089.20
5	47	1923.49	98	922.49
6	69	1310.20	145	623.48
7	137	659.88	277	326.37
8	267	338.59	540	167.41
9	524	172.53	994	90.95
10	1007	89.78	1812	49.89
11	1955	46.24	3331	27.14

2.3 土地利用空间离散化对 SWAT 模型模拟的影响评价

SWAT 模型参数变化对径流量和输沙量的模拟结果会产生影响^[12],为避免参数变化对模型输出结果的影响,本文使用模型默认的参数,以实现不同方案下参数的一致性。本文采用 11 种子流域划分方案,模拟 2008—2016 年各方案下的产流产沙过程。同时,以年均径流深度和年均输沙量为年指标,年最大 1 d、连续最大 5 d、连续最大 7 d 和洪水过程的径流与输沙量为洪水过程指标,采用 Manner-Kendall 趋势检验法分析径流量和输沙量的变化趋势。采用相对误差(RE)来分析 SWAT 模型子流域划分引起的土地利用空间离散化对径流和输沙模拟的影响。相对误差 RE 的计算公式如下:

$$RE=\frac{V_i-V_{\min}}{V_{\min}}\times 100\% \tag{1}$$

式中: V_{\min} 为模拟的最小汇水面积阈值的模拟值; V_i 为不同子流域划分方案下的模拟值。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型的离散效应

在各划分方案下,流域内各土地利用面积表现出不同变化趋势(图 2)。当子流域数量由 11 个增加至 1 955 个时,林地面积呈先增加后减少趋势,11 种方案下模拟的林地面积均高于实际面积;随着子流域数

量的增加,耕地面积呈显著减少趋势($p < 0.01$),其面积由 128.49 km^2 减少至 123.08 km^2 ,减幅为 4.21% ;而面积较小的地类(草地、建设用地和水域),随着子流域数量的增加面积快速增加($p < 0.01$),草地、建设用地和水域的增幅分别为 16.29% , 145.86% , 110.55% ,并逐渐接近实际地类面积。其中,草地面积模拟值在子流域数量为 1 955 个时与实际草地面积接近,建设用地和水域在子流域数量分别为 29, 137 个时开始出现,在各方案下的面积均低于实际地类面积。

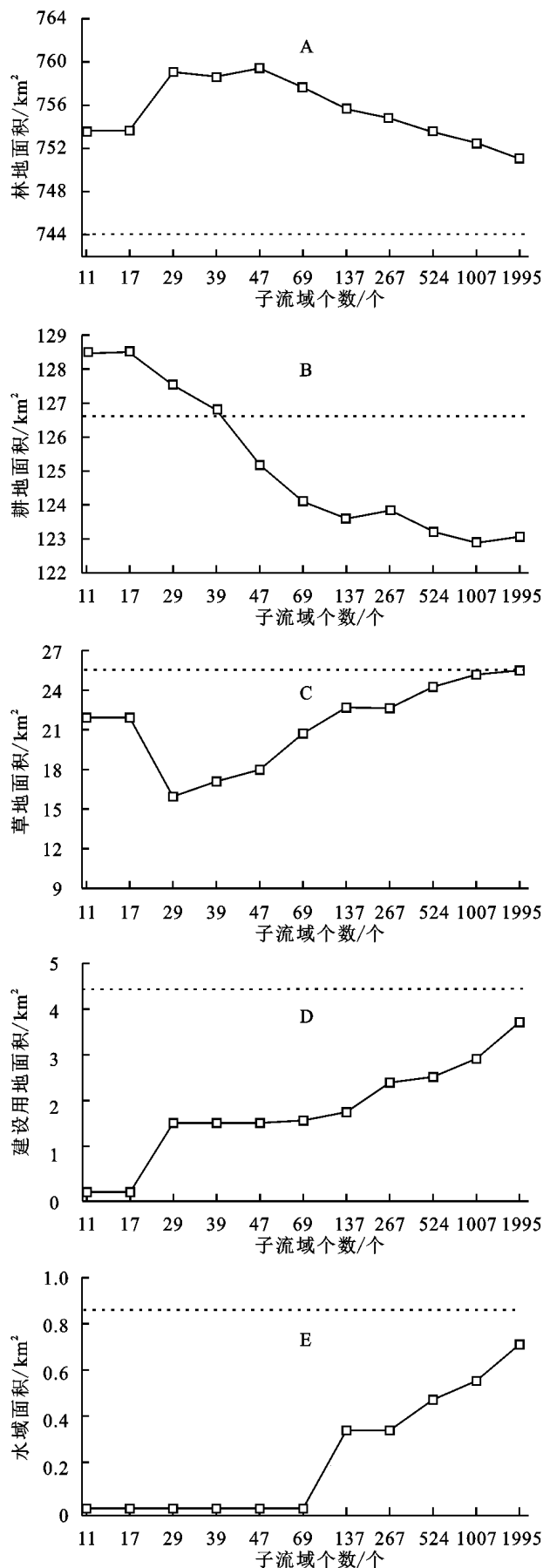
由于东江源流域地处山区,林地面积大且分布集中,概化程度小;耕地面积较破碎,随着离散程度增加,概化为林地或其他地类的几率逐渐增大,因此耕地面积呈显著减少趋势($p < 0.01$);面积较小的地类(草地、建设用地和水域)面积随着离散程度的增加,呈显著增加趋势($p < 0.01$),并与实际地类面积越来越接近。

3.2 土地利用空间离散化对径流量的影响

东江源流域不同子流域划分方案下,年均径流深度呈波动下降趋势(图 3),由 $1\,023.61 \text{ mm}$ 降至 $1\,011.62 \text{ mm}$,在子流域数量为 267 个后趋于稳定,研究方案中最大 RE 为 1.85% ,土地利用空间离散化导致年径流量减少,且随着离散程度的增加,其影响越大。

本文选取 2016 年间的一次暴雨洪水事件(2016 年 3 月 21 日),以进一步分析土地利用空间离散化对洪水过程的影响(图 4)。从图中可以看出,随着土地利用空间离散化水平的提高,径流过程基本重合,土地利用空间离散化对径流过程的影响不显著。

SWAT 模型采用径流曲线数法模拟地表径流,其中径流曲线数(CN)是影响径流量的主要敏感性参数,降水截留能力越大,CN 值越小,不同土地利用类型对降水截留能力存在较大差异,从大到小依次为林地、草地、耕地和建设用地^[26]。土地利用空间离散化导致土地利用类型分布在空间和数量上存在差异,改变了 CN 值的空间集总程度,使其统计特征值发生变化,进而影响流域产流量^[17]。通过图 5 可知,随着土地利用空间离散程度的增加,CN 值呈不显著减少趋势,总体变化趋势与年均径流深变化基本一致(图 3),子流域数量在 11, 17, 29 个时年均径流深度和 CN 值呈相似的波动变化。由 3.1 节分析可知,研究区林地类型占比最大,为总面积的 82.52% ,草地、建设用地和水域面积小且分布分散,该区域土地利用类型的分布使得各方案下 CN 值在 $62.50 \sim 63.00$ 变动,总体变化不大($< 0.13\%$),呈不显著减少趋势,该变化导致其对径流和洪峰影响不大($< 1.85\%$)。这与 Lin 等^[27]研究结果相似。



注:虚线为实际地类面积。

图2 子流域划分对土地利用类型的面积变化影响

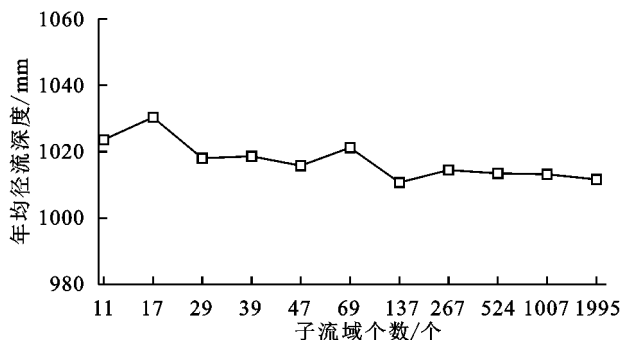


图3 不同土地利用离散化水平下的年均径流深度

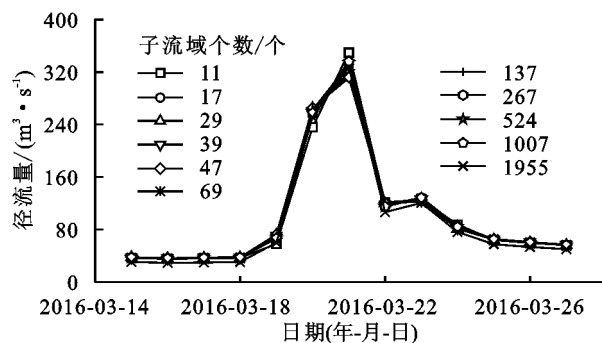


图4 洪水事件日径流量

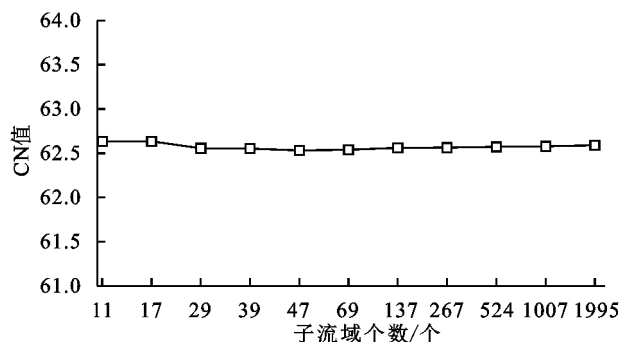


图5 土地利用空间离散化对CN值的影响

3.3 土地利用空间离散化对输沙量的影响

随着土地利用离散程度的增加,年均输沙量呈显著下降趋势($p < 0.01$) (图6),输沙总量由 1.5×10^6 t 减少至 9.04×10^5 t;子流域数量为11,17,29,39,47,69,137,267,524,1 007个的年均输沙量RE分别为65.84%,54.40%,45.05%,37.17%,33.52%,29.17%,19.10%,15.08%,8.99%,5.46%,其中最大RE为65.84%。土地利用空间离散化导致年均输沙量减少,并且随着离散程度的增加该影响越显著。

年最大1 d、连续最大5 d和连续最大7 d输沙量随着土地利用空间离散化水平的提高呈显著下降趋势($p < 0.01$,图7),与子流域数量为11时相比,子流域数量为17,29,39,47,69,137,267,524,1 007,1 955个的年最大1 d输沙量分别减少了11.01%,16.59%,23.31%,24.52%,23.49%,28.49%,36.49%,39.13%,41.12%,41.45%(图7);连续最大5 d的输沙量分别减少了9.04%,15.90%,21.87%,23.85%,

24.84%,31.52%,36.40%,40.19%,42.41%,45.30%(图7);连续最大7 d的输沙量分别减少了7.28%,11.04%,17.47%,19.22%,21.19%,28.38%,33.83%,30.89%,33.30%,40.58%(图7)。随着土地利用空间离散化水平的提高,年最大1 d、连续最大5 d和连续最大7 d输沙量显著下降(41.45%,45.30%,40.58%),且年最大1 d输沙量下降趋势最显著($p < 0.01$)。

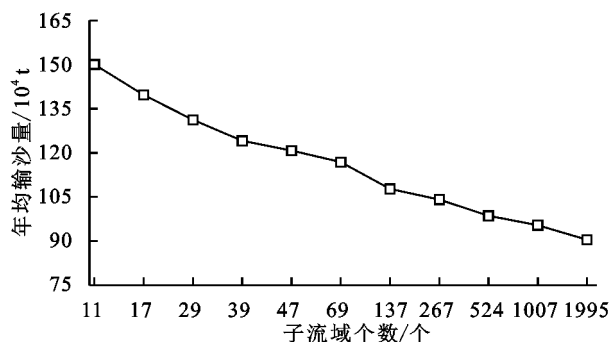


图6 不同组合方案下的年均输沙量

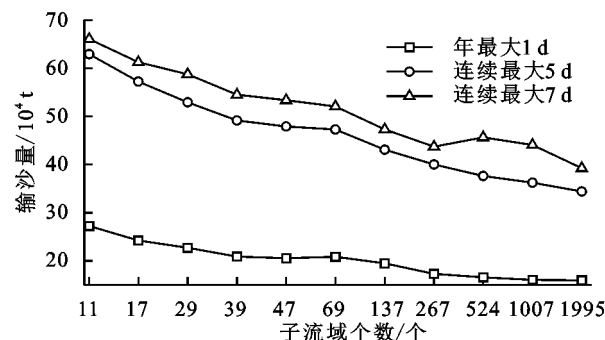


图7 年最大1 d、连续最大5 d和连续最大7 d输沙量

在2016年3月21日洪水事件中,当子流域数量由11增加到1 955个时,输沙量显著减少(图8),且洪水事件达到峰值时(2016年3月21日)最显著(图9),随着土地利用空间离散化水平的提高,输沙量由 3.13×10^5 t 减少到 1.66×10^5 t,减幅达47.16%($p < 0.01$),土地利用空间离散化使输沙峰值显著下降($p < 0.01$)。

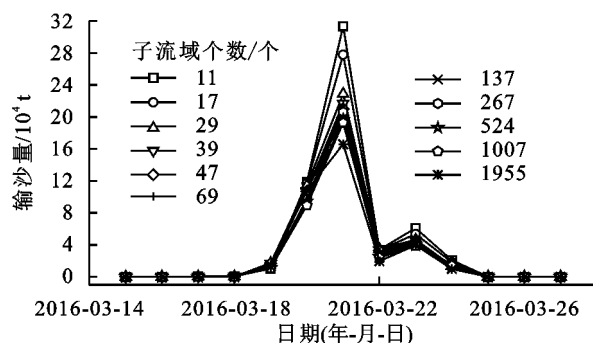


图8 2016年3月21日洪水事件日输沙模拟量

SWAT 模型通过土壤流失方程对每一个HRUs中由降水和径流产生的土壤侵蚀量和输沙量进行估算,并通过河道汇流到流域出口^[22]。USLE_C,USLE_K,USLE_Ls和USLE_P是影响输沙量的主要参数。本

文通过输入单一的土壤数据和地形数据从而固定了 USLE_K, USLE_Ls 和 USLE_P 参数,因此土地利用空间离散化主要通过 USLE_C 影响流域输沙过程。由图 10 可以看出,随着土地利用空间离散化水平的提高,USLE_C 呈显著下降趋势($p < 0.01$),土地利用空间离散化通过影响 USLE_C 而引起输沙量的变化。这一结论与其他学者的研究^[10,12]相似。子流域划分引起的土地利用空间离散化,通过改变 USLE_C,进而影响输沙量模拟结果。

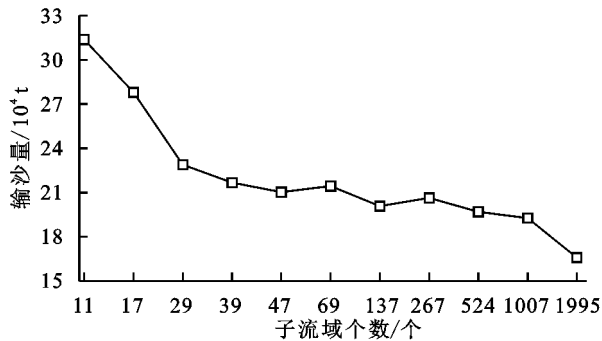


图9 土地利用空间离散化对洪水事件日输沙洪峰的影响

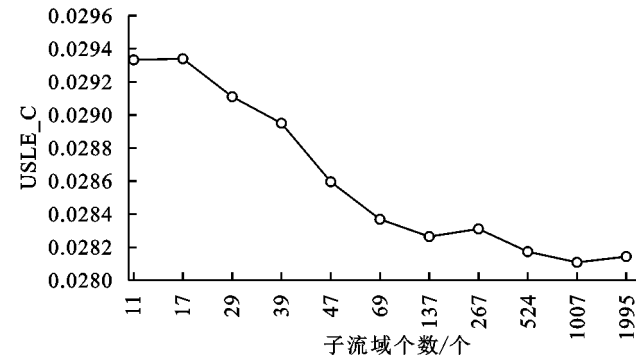


图10 USLE_C 随子流域变化情况

模型将流域划分为一定数量的子流域,径流、输沙模拟结果受到不同子流域划分方案的直接影响,准确确定子流域划分方案的标准尚未统一。部分学者根据流域总面积中集水面积阈值所占比重确定最优子流域划分方案^[13,28],还有部分学者认为可通过模拟结果随子流域数量变化的“拐点”,来确定最优子流域划分方案^[19],如郝芳华^[9]、胡连伍^[11]、李曼曼^[14]等发现可根据“拐点”位置确定最优子流域的划分水平,即当子流域数量不断增加时,输沙模拟值的变化存在一个“拐点”,随着子流域数量的继续增加,模拟结果变化不显著。本文结果发现,在东江源流域,径流量在子流域数量不低于 267 个时,随着土地利用空间离散化水平的提高,年均径流深度逐渐趋于稳定,而输沙量变化幅度较大,主要是由于东江源流域地处山区,土地利用复杂且破碎,空间差异大,需要更详细的子流域划分方案,以此充分体现该研究区的空间差

异,但子流域划分过细容易产生虚假水系,难以准确模拟流域产流产沙过程,子流域数量划分过少则对流域描述不够充分,导致模拟结果不稳定,难以达到理想的预测精度^[29]。子流域数量为 1 955 个时,草地、建设用地和水域面积模拟值已逐渐接近实际面积值,但是并未发现输沙量“拐点”的存在。由于受计算机运行能力的限制,子流域继续增加则模型无法运行,因此无法确定研究区最优集水面积阈值。最优计算单元划分受流域面积、下垫面复杂程度等因素的综合影响,因此,为减少分布式水文模拟的不确定性,确定最优子流域划分方案,不同研究区需要具体分析。

4 结论

(1) 土地利用离散化使得流域内各类土地利用的面积表现出不同变化趋势。随着土地利用离散程度的增加,林地面积呈先增加后减少趋势,耕地面积呈显著下降趋势($p < 0.01$),草地、建设用地和水域面积均呈显著增加趋势($p < 0.01$),并随离散程度增加越接近实际面积。

(2) 年均径流量和输沙量模拟值对土地利用空间离散化的敏感性较强($p < 0.01$),且输沙量对土地利用空间离散化的敏感程度大于径流量,径流量模拟值最大 RE 为 1.85%,输沙量模拟值最大 RE 为 65.84%。

(3) 土地利用空间离散化对年最大 1 d、连续最大 5 d 和连续最大 7 d 输沙量的影响随着离散程度的增加呈显著下降趋势($p < 0.01$),其中对年最大 1 d 的影响最为显著。土地利用空间离散化导致泥沙峰值显著下降,而对洪峰流量影响不显著。

(4) 本研究结果表明,东江源流域子流域数目为 1 955 个时,未发现“拐点”的存在,受计算机运行能力的影响,无法确定研究区最优集水面积阈值,因此不同研究区需要具体分析,以减少分布式水文模拟的不确定性,确定最优子流域划分方案。

参考文献:

- [1] 徐宗学,赵捷.生态水文模型开发和应用:回顾与展望[J].水利学报,2016,47(3):346-354.
- [2] 万荣荣,杨桂山.流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J].地理科学进展,2005,24(3):25-33.
- [3] 陆志翔,杨永刚,邹松兵,等.汾河上游土地利用变化及其水文响应研究[J].冰川冻土,2014,36(1):192-199.
- [4] 李爱民.分布式水文模型研究进展[J].中国水运,2016,16(7):171-172.
- [5] Liu C M, Li D F, Tian Y, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale

- watershed[J]. Progress in Geography, 2003, 22(5): 437-445.
- [6] Chen X H, Tu X J, Xie P. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(8): 800-811.
- [7] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6681-6690.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Fitzhugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1/2): 35-53.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Pradhanang S M, Briggs R D. Effects of critical source area on sediment yield and streamflow[J]. Water and Environment Journal, 2014, 28(2): 222-232.
- [14] 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.
- [15] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的亚流域划分方法研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 53-57.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution: based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1): 211-224.
- [19] 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.
- [20] 吴倩雯, 况润元, 张刚华, 等. 东江源稀土矿区土地利用变化遥感监测研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(3): 51-56.
- [21] 吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于 SWAT 模型的东江流域径流模拟[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1746-1757.
- [22] 韩冬冬, 朱仲元, 宋小园, 等. 土地覆被和气候变化对锡林河流域径流量的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 153-160.
- [23] 焦剑, 宋伯岩, 王世雷, 等. 基于改进径流曲线数模型的北京密云坡地径流估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 194-199.
- [24] 俱战省, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区小流域修正通用土壤流失方程适用性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 121-131.
- [25] 喻晓, 马孝义, 蔡朵朵. 基于 SWAT 模型的合理亚流域划分和径流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 20-25.
- [26] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [27] 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.
- [28] 邱临静, 郑粉莉, Yin R S. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3754-3763.
- [29] 武海霞, 李清雪, 孙玉壮, 等. 子流域划分在时间尺度上对年径流、泥沙及营养物的影响: 以漳河上游流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 131-135, 144.