

辽河流域径流过程模拟的空间尺度效应分析

毛玉娜,叶爱中,徐 静

(北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875)

摘要:针对分布式水文模型的尺度问题,在辽河流域,采用 SWAT 模型,研究不同 DEM 分辨率及不同子流域大小导致模拟结果的不确定性。研究结果表明:①DEM 分辨率对流域平均高程、流域面积和子流域数量影响较小,而对流域平均坡度有显著的影响,因此径流模拟时需要进行坡度订正。对于河网提取,DEM 分辨率为 500m 时提取的河网与基准河网吻合程度较高。②子流域面积过大,数量过少时,模拟结果与基准结果偏差较大,而在划分一定阈值波动范围内径流对子流域数量敏感性较低。

关键词:SWAT 模型;尺度分析;辽河流域

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)02-0019-06

分布式水文模型经过近 30 年的发展,理论研究已经趋于瓶颈阶段,逐步转向应用研究。由于分布式水文模型强调明确的物理机制,模型的输入和参数变得复杂,从而导致模型输出的结果存在很多的不确定性,这些不确定性来自于模型的输入、初始与边界条件的赋值、以及模型结构和参数的选择等因素。其中模型输入数据的尺度问题尤其突出^[1-2]。数字高程模型(DEM)作为描述地形特征的基础数据,其分辨率的大小影响了诸如坡度、坡向、流向、河网等流域特征参数的提取,进而对模拟结果精度产生很大的影响^[3-4]。DEM 精度越高,流域离散的空间单元越小,模型模拟结果才更精确。子流域的数量对流域水文模拟过程也有较大影响,合理的子流域划分数量可以大大减小模拟结果的不确定性。

针对 DEM 分辨率和子流域面积大小对水文模拟结果的影响,国内外学者已经做了很多研究^[5-9]。首先 DEM 分辨率作为基础输入数据,对模拟结果有直接影响。Zhang 和 Montgomery 基于对 TOPMODEL 的模拟结果分析,指出描述水文过程的 DEM 合理分辨率为 10m^[10];Kalin 等以美国艾奥瓦的一个流域为例,应用 KINEROS 模型进行流量模拟,结果表明在不影响发生时间的情况下,DEM 分辨率越大,洪峰流量越大^[11]。Dixon 和 Earls 选取美国的一个流域,通过比较初始的 90m DEM 分辨率和重采样的 30m 到 90m 分辨率对径流模拟结果的影响,得出 DEM 分辨率对径流模拟产

生一定的影响^[12]。Shengpan Lin 等以中国浙江省的一个流域为例,应用 SWAT 模型分析 DEM 分辨率对模型模拟结果的影响,研究表明,DEM 分辨率对径流模拟结果影响不是太大^[13]。任希岩等以黄河下游支流洛河卢氏水文站以上流域为研究区,分析四种 DEM 分辨率下的模拟结果,研究表明 DEM 分辨率对子流域的面积或个数的提取影响不大,但对坡度值的提取影响较大^[14]。其次在子流域面积大小方面,FitzHugh 和 Mackay 以美国威斯康星州的一个流域为例,应用 SWAT 模型模拟产流量,结果表明不同子流域大小,径流基本保持不变^[15]。Jha 等基于 SWAT 模型研究合理的子流域面积,研究表明子流域面积对径流几乎不产生影响^[16]。王艳君等应用 SWAT 分布式水文模型,以秦淮河流域为研究区,研究子流域面积对径流模拟的影响,研究结果表明产流量随着子流域面积减小几乎没有变化,最大相对偏差不超过 5%^[17]。张召喜等以云南省凤羽河流域为研究区域,采用 SWAT 模型研究不同子流域大小对径流模拟结果影响,结果表明不同的子流域面积对产流的影响较小^[18]。卢文喜以石头口门水库汇水流域为例,应用 SWAT 模型模拟流域内径流,结果表明子流域面积过小或过大时模拟结果与实际情况有偏差,而在一定阈值波动范围内径流对大小敏感性低^[19]。目前,国内学者对子流域面积大小对径流模拟的影响进行了很多研究,但基于现有的研究,需要将

收稿日期:2013-05-17

基金项目:国家科技支撑计划课题(2013BAB05B04);长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2012324/KY)

作者简介:毛玉娜(1989-),女,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为遥感水文学。E-mail: shanxian.08@163.com

通讯作者:叶爱中(1978-),男,安徽安庆人,讲师,研究方向为气候变化对水文水资源影响。E-mail: azye@bnu.edu.cn

DEM 分辨率、子流域面积大小两方面结合起来进行研究,进一步明确尺度对分布式水文模型模拟的影响。

本文选取辽河流域铁岭水文站以上作为研究区域,应用 SWAT 模型进行径流模拟,验证模型在研究区域的有效性,再通过研究不同 DEM 分辨率和不同子流域面积大小两种尺度对径流的影响,选择合理尺度的 DEM 分辨率和子流域面积,可以有效减少流域径流模拟结果的不确定性,对分布式水文模型的发展与应用具有指导意义。

1 研究区概况

本文选择辽河流域铁岭水文站以上为研究区域,其地理位置和水系情况如图 1 所示。辽河流域位于我国东北地区的西南部,地处北纬 $40^{\circ}31' \sim 45^{\circ}17'$,东经 $116^{\circ}54' \sim 128^{\circ}32'$,由辽河和大辽河两大干流及其支流组成,横跨河北、内蒙古、吉林和辽宁四省。全流域面积 $21.96 \times 10^4 \text{ km}^2$,全长 1 345 km。大部分地区属温带半湿润半干旱季风气候。降水量自西北向东南递增,多年平均降水量在 350~1 200 mm 之间,降水主要集中在 6~9 月,为全年降水量的 80%,且年际变化较大,丰水年为枯水年降水量的 2.1~3.5 倍。

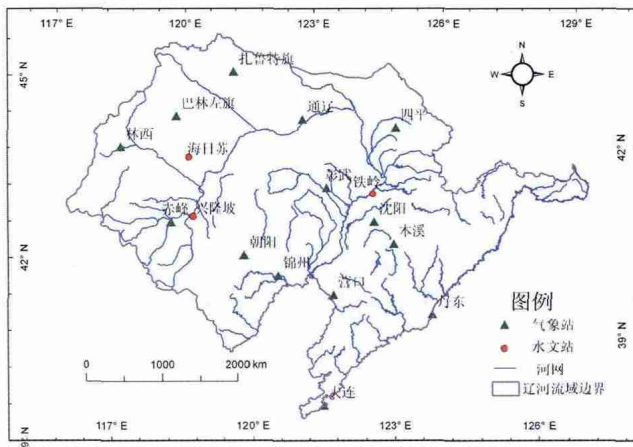


图 1 研究区地理位置
Fig.1 The research area

2 数据和方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型是由美国农业部农业研究中心(US-DA, Agricultural Research Service)于 20 世纪 90 年代中后期研制开发的基于一定的物理机制与经验公式的半分布式流域水文模型。主要用于模拟地表水和地下水水量与水质,预测土地管理措施对具有多种土壤、土

地利用和管理条件的流域产流、产沙和化学物质产量的影响^[20-21]。大量研究表明该模型在径流模拟方面有较好的效果^[22-29]。SWAT 模型首先将流域划分成多个子流域,然后计算每个子流域的地形特征(如坡度、坡长、河道长度等)。根据土壤、土地利用和管理条件划分水文响应单元(HRU),HRU 为水文模拟最小单位。在气象资料的驱动下,SWAT 在 HRU 上模拟水文循环过程。SWAT 模型采用 SCS 曲线法模拟地表径流,地表径流(Q_{surf})的计算公式为:

$$Q_{surf} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (1)$$

式中: P 为降水量; I_a 为径流发生前降水损失量(包括:植被截留、地表洼地积水、蒸散发、入渗); S 为径流发生后非饱和带的最大持水量,可以由下式(2)计算得到:

$$S = 25.4(1000/CN) - 10 \quad (2)$$

式中: CN 为径流曲线数。

SWAT 模型汇流采用马斯京根汇流方案。

2.2 数据说明

模型运行所需的数据主要有六类:地形数据、土壤数据、土地利用数据、实测水系、气象数据和水文数据。地形数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>) 的 90m DEM 数据;土壤数据采用中国科学院南京土壤研究所提供的全国 1:100 万土壤类型图,土壤的各种属性如分层层数、机械组成以及有机质含量等从 HWSD (Harmonized World Soil Database)数据库获得。土地利用数据的比例尺为 1:10 万,在模型中进行重分类得到 SWAT 模型模拟所需的土地利用图。实测水系来源于国家基础地理信息中心 1:400 万水系图,由实测水系可以有效矫正 SWAT 模型提取的水系,提高模拟精度。气象数据来源于中国气象局国家气象科学数据共享中心,本文中 SWAT 模型所需的气象数据包括 12 个气象台站 1956~2009 年的逐日平均气温、逐日最高气温、逐日最低气温、日降水、风速等,对于太阳辐射和相对湿度采用 SWAT 自带的天气发生器模拟生成。水文数据采用铁岭水文站 2003~2005 年逐月流量数据。

3 尺度分析

3.1 SWAT 模型在研究区域的有效性验证

在尺度分析之前,先验证 SWAT 模型在研究区域的有效性,从而得到的研究也更加准确,极大减小了分

析的不确定性。本文采用确定性系数 r^2 (r 是相关系数) 来评价模型的适用性。如果确定性系数 r^2 数值接近于 1.0, 说明模型的适用性越强。确定性系数 r^2 越接近 1, 模拟径流量与实测径流量越相近, 通常取 $r^2 > 0.6$ 作为评价标准。对研究区进行 2003~2005 年逐月径流过程模拟并验证模型, 如图 2 为 2003~2005 年铁岭站逐月降雨产流过程线。

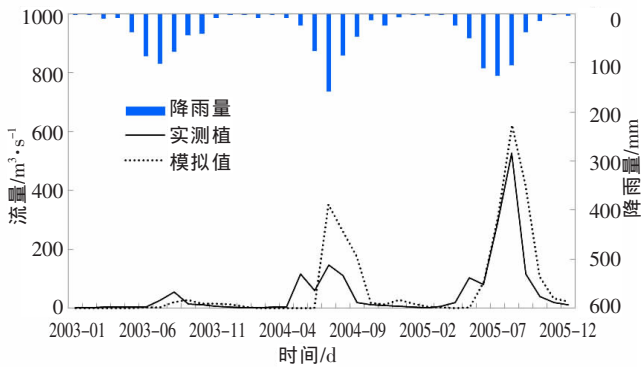


图 2 2003~2005 年铁岭站逐月降雨产流过程线

Fig.2 Hydrograph of the monthly rainfall-runoff from 2003 to 2005

2003~2005 年铁岭水文站实测逐月流量与模拟逐月流量的相关系数 r^2 为 0.89, 达到了模型的适用性要求。从图 2 可以看出, 7 月份到 9 月份之间, 模拟流量与实测流量偏差较大, 洪峰流量也有偏差, 这个现象主要是由本文模型没有考虑水库与降水观测站点太少导致降水数据误差造成的。

辽河流域现有 17 座大型水库, 总库容 $193 \times 10^8 \text{m}^3$, 本文研究区域主要描述红山水库、清河水库和柴河水库三大水库。红山水库位于老哈河干流上, 是以防洪为主, 兼顾灌溉、季节性发电和养鱼的综合利用大型水利工程, 总库容 $16.19 \times 10^8 \text{m}^3$ 。清河水库位于辽河中游左侧支流清河干流上, 是以防洪、灌溉、工业用水为主, 兼顾渔业、林业等综合利用的水利枢纽工程, 总库容 $9.71 \times 10^8 \text{m}^3$ 。柴河水库位于辽宁省铁岭市东的辽河支流柴河下游, 是以防洪、灌溉为主, 结合发电和养鱼等综合利用的大型水利枢纽工程, 总库容 $6.36 \times 10^8 \text{m}^3$ 。这些水库是年调节或者季调节水库, 削弱了洪峰并增加了汛前与汛后的流量, 而本文缺乏水库实测库容与出库流量, 由此导致模拟结果存在误差。另外, 在 $21.96 \times 10^4 \text{km}^2$ 的流域上只有 17 个气象观测降水站, 站与站之间超过 100km, 显然会导致流域降水误差, 从而导致了模型模拟结果不是非常好。

但总体来看, 模拟值与实测值拟合较好, 也达到了

模型的精度要求, 说明 SWAT 模型可以应用于研究区的径流模拟。

3.2 DEM 分辨率尺度对流域信息提取的影响

DEM 分辨率对模型输入所需的流域特征参数有较大影响, 进而对径流模拟结果产生影响。DEM 分辨率越高, 理论上越能真实反映流域地形特征, 也越能提取更加准确的流域特征参数, 但实际中, 由于模型计算的误差存在, 过高的分辨率不仅会带来更大计算量, 还会带来更大的误差, 有可能造成某些特征参数提取的失真, 因此确定合适尺度的 DEM 分辨率对于径流模拟是非常重要的。在本文中, 对原始 90m DEM 进行双线性内插重采样得到 10 种不同分辨率的 DEM, 分别为 100m, 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 700m, 800m, 900m, 1 000m。在此基础上研究不同 DEM 分辨率提取的流域特征参数如流域平均高程、流域面积、流域平均坡度、子流域数量、河网等的差异, 最后确定合适的分辨率。在实际提取过程中, 保证其它模拟条件一致, 主要包括: (1) 输入数据, 如土地利用数据、土壤数据、气象输入等。(2) 提取河网的集水面积阈值确定为 $1 000 \text{km}^2$ 。(3) HRU 划分中土地利用阈值为 20%, 土壤为 10%, 坡度 20%, 这个设置也是 Winchell 等确定的一个合适的阈值^[30], 可以消除 HRU 中较小的土地利用、土壤和坡度单元。

DEM 分辨率越高, 理论上越能真实反应地形特征, 本文中将采用 100m 分辨率下提取的流域特征参数作为基准值, 并通过相对偏差 (RD) 来定量不同 DEM 分辨率对流域输入参数或模型输出的不确定性。

$$RD(\%) = 100(P_x - P_{100}) / P_{100} \quad (3)$$

式中: P_x 为基于不同分辨率 DEM 得到的流域输入参数, P_{100} 为基于 100m 分辨率得到的基准值, 本文中假设这是最合理分辨率。由此计算得到的结果如图 3 所示。从图 3 可以看出: (1) 对于流域平均高程, DEM 分辨率几乎不产生任何影响; (2) 对于流域面积, 在分辨率为 700m 的时候产生一定影响, 可以说明 700m DEM 分辨率不太适宜用来模拟; (3) 对于子流域数量, DEM 分辨率产生一定的影响, 从图 3 可以看出, 随着 DEM 分辨率的减小, 子流域数量总体呈现一个小波动趋势; (4) 对于平均坡度, DEM 产生较大影响, 可以清晰看出, 随着 DEM 分辨率的减小, 平均坡度相对偏差呈现持续增大的趋势, 最大相对偏差达到基准 DEM 提取坡度的 70%。由于坡度作为重要的流域输入特征参数之一, 对于产流、汇流有很大影响, 因此在进行径

流模拟的时候,需要进行坡度订正,从而减小输入参数对模拟结果的不确定性。

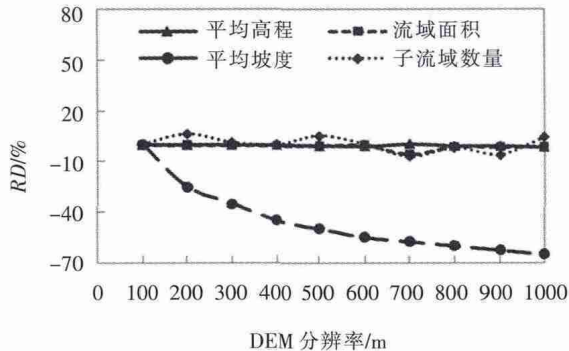


图3 不同DEM分辨率提取的流域特征参数相对偏差
Fig.3 RD of the watershed parameters extracted from different DEM resolution

由10种DEM分辨率获得的河网如图4所示,从图中可以看出,10种分辨率提取的河网总体差别不大,区别主要表现在一些局部细节。当100m DEM分辨率提取的河网作为基准河网时,对比其它分辨率DEM提取的河网,其中最明显的区别体现在流域正上方的河网分支,100m提取的河网是连续的,除了500m提取的河网是连续的,其它DEM分辨率提取的河网或者不连续或者直接没有提取出上方的河网。在辽河流域,由于流域面积大,河网又相对简单,从提取的河网这方面来说,500m分辨率的DEM不仅可以准确提取河网,而且大大提高了计算机速度,因此500m分辨率可以作为合适的分辨率。Horritt和Bates在2001年也得到了类似结果^[31],Horritt和Bates通过研究分析不同DEM分辨率对洪水模型的影响,认为500m的DEM分辨率更适宜预测洪水水位。

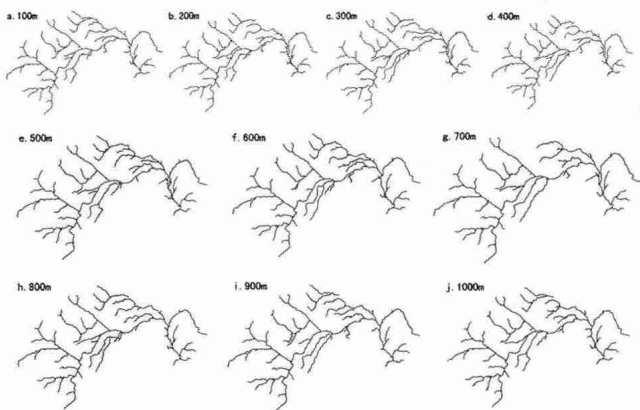


图4 不同DEM分辨率提取的河网
Fig.4 The river network extracted from different DEM resolution

3.3 子流域划分尺度对径流模拟的影响

在SWAT模型中,HRU是产流模拟的最小单元,并且通过定义土地利用、土壤和坡度的阈值对子流域进行划分得到,因此子流域数量对于HRU划分有很大影响。子流域面积阈值过小导致数量过多,不仅会导致虚假子流域(很小或十分狭长流域)增多,对计算速度和计算量带来很大压力,而且对于模拟结果也将产生很大不确定性。本文基于500m分辨率DEM,通过给定10种最小河道集水面积阈值,对研究区域进行子流域划分,如图5所示,并计算4种子流域划分的特征参数,如表1所示。在不同子流域面积阈值下,模拟流域1998~2009年均径流量,仍采用相对偏差(RD)来定量表示不同子流域数量引起的年均径流量相对偏差。

$$RD(\%) = 100(P_x - P_{\min}) / P_{\min} \quad (4)$$

式中: P_x 为不同子流域数量模拟得到的年均径流量(m^3/s), P_{\min} 为基于最小集水面积阈值得到的年均径流量(m^3/s),本文中即为子流域数量为159的模拟年均径流量。本文模拟的年均径流相对偏差如图6所示。从图6中可以看出,随着子流域划分数量减小,相对偏差越来越大,最大可达到12%,并且在子流域数量为55、71、81时突然变大,而到89时逐渐减小,这个现象主要是由于随着子流域划分数量的增大,研究区产生了较多狭小的子流域,也造成了与实际河道的情况不符合,这也说明子流域划分数量对于年均径流的模拟有较大影响,合理划分子流域数量对于减少模拟结果的不确定性有重要意义。针对辽河流域,仅仅采用12个气象观测站数据,从提高模拟结果的精度和减小计算压力两方面考虑,研究区域的合理划分子流域的数量范围为103~159,子流域面积阈值在1000km²以下,期间相对偏差不到2%。

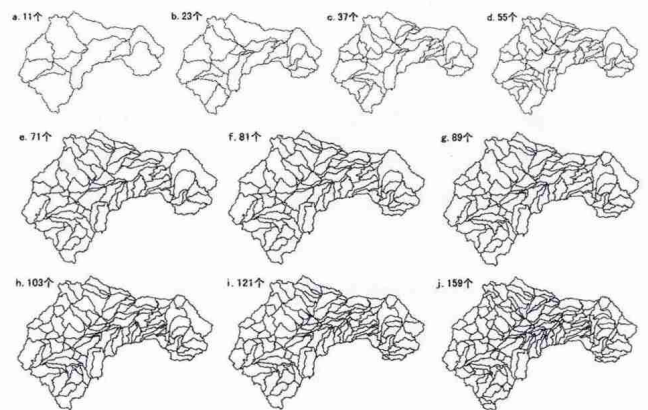


图5 研究区域10种子流域的划分
Fig.5 Watershed delineation of the research area

表1 不同子流域划分数量下的流域特征参数

Table1 Thecharacteristicparametersbasedondifferentwatershed delineations

子流域数量/个	最小集水面积阈值/km ²	HRU 数量/个	子流域平均面积/km ²
11	10000	76	14650
23	3000	152	7007
37	2400	244	4356
55	2000	371	2930
71	1600	457	2270
81	1400	503	1990
89	1200	550	1811
103	1000	616	1565
121	800	710	1332
159	600	936	1014

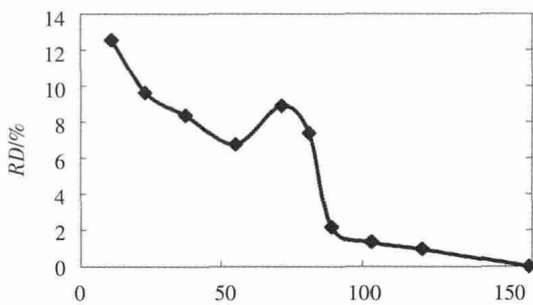


图6 1998~2009年模拟时间段的年均径流相对偏差

Fig.6 RD of the annual runoff during the duration from 1998 to 2009

4 结论

针对分布式水文模型的尺度问题, 本文在辽河流域, 采用 SWAT 模型, 研究不同 DEM 分辨率及不同子流域面积大小导致模拟结果的不确定性。

研究结果表明: ①DEM 分辨率对流域平均高程、流域面积和子流域数量影响较小, 而对流域平均坡度有显著的影响, 因此径流模拟时需要进行坡度订正。对于河网提取, DEM 分辨率为 500m 时提取的河网与基准河网吻合程度较高。②子流域面积过大, 数量过少时, 模拟结果与基准结果偏差较大, 而在划分一定阈值波动范围内径流对子流域数量敏感性较低。本研究将对分布式水文模型的发展与应用具有指导意义。

参考文献:

[1] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions [J]. Journal of Hydrology, 2005, 312: 207-222.

[2] Chaplot V., Saleh A., Jaynes D B. Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and NO₃-N loads at the watershed level [J]. Journal of Hydrology, 2005, 312: 223-234.

[3] 王龙昌, 谢小玉, 王立祥. 宁南旱区生态农业建设与农业产业化研究[J].

干旱地区农业研究, 2002,(2):99-103. (WANG Longchang, XIE Xiaoyu, WANG Lixiang. Establishment of eco-agriculture and agricultural industrialization in the dry land regions of south Ningxia [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, (2): 99-103. (in Chinese))

[4] 贾文雄, 田玉军. 定西地区农业生态建设与可持续发展研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002,(1):111-115. (JIA Wenxiong, TIAN Yujun. Research on construction and sustainable development of agricultural ecological environment Dingxi area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, (1): 111-115. (in Chinese))

[5] Quinn P., Beven K., Chevallier P., et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models [J]. Hydrological Processes, 1991,5: 59 - 80.

[6] Farajall N.S., Vieux B.E.. Capturing the essential spatial variability in distributed hydrological modeling infiltration parameters [J]. Hydrological Processes, 1995, 9: 55 - 68.

[7] Brasington J., Richards K.. Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for topmodel [J]. Computer Geoscience, 1998, 24: 299 - 314.

[8] Chaplot V., Walter C., Curmi P.. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data [J]. Geoderma, 2000, 97: 405 - 422.

[9] Thompson J., Bell J., Butler C.. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling [J]. Geoderma, 2001, 100: 67 - 89.

[10] Zhang W.H., Montgomery D.R.. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations [J]. Water Resour. Res., 1994, 30(4): 1019-1102.

[11] Kalin L., Govindarajua R.S., Hantush M.M.. Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2003, 276: 89-111.

[12] Dixon B., Earls J.. Resample or not?! Effects of resolution of DEMs in watershed modeling [J]. Hydrology Process, 2009, 23 (12): 1714 - 1724.

[13] Lin S.P., Jing C.W., Coles N.A., et al. Evaluating DEM source and resolution uncertainties in the soil and water assessment tool [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(1): 209-221.

[14] 任希岩, 张雪松, 郝芳华, 等. DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究, 2004,(1):1-4,26. (REN Xiyang, ZHANG Xuesong, HAO Fanghua. Effects of DEM resolutions on simulated runoff and sediment yields [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004,(1): 1-4,26. (in Chinese))

[15] FitzHugh T.W., Mackay D.S.. Impacts of subwatershed partitioning on modeled source-and transport-limited sediment yields in an agricultural nonpoint source pollution model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56(2): 137-147.

[16] Jha M., Gassman P.W., Secchi S., et al. Effect of subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions [J]. Journal of American Water Resources Association, 2004, 40(3): 811-825.

[17] 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, 2008,165(3): 22-25,53. (WANG Yanjun, LV Hongjun, JIANG Tong. Influence of watershed subdivision and DEM resolution on SWAT runoff simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 165(03): 22-25,53. (in Chinese))
- [18] 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, 2012,126 (10): 1986-1993. (ZHANG Zhaoxi, LUO Chunyan, ZHANG Jingsuo, et al. Influence of subdivision of watershed on simulation results of agricultural non-point-source pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 126(10): 1986-1993. (in Chinese))
- [19] 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, 122(10): 23-25. (LU Wenxi, YI Yanping, ZHANG Lei, et al. Influence of different watershed subdivision numbers on simulation results of SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2010, 122(10): 23-25. (in Chinese))
- [20] Arnold J.G., Srinivasan R., Mutiah R.S., et al. Large area hydrologic modeling and assessment. part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34 (1): 73-89.
- [21] Arnold J.G., Srinivasan R., Mutiah R.S., et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037-1051.
- [22] 郝振纯, 梁之豪, 梁丽乔, 等. DHSVM 模型在宝库河流域的径流模拟适用性分析[J]. 水电能源科学, 2012,30 (11):9-12,94. (HAO Zhenchun, LIANG Zhihao, LIANG Liqiao, et al. Adaptability analysis of DHSVM model in runoff simulation of Baoku River Basin[J]. Water Resources and Power, 2012, 30 (11): 9-12, 94. (in Chinese))
- [23] 王兆礼, 沈艳, 宋立荣. 基于 SWAT 模型的北江流域气候变化的水文响应 [J]. 安徽农业科学, 2012,40 (34):16761-16764. (WANG Zhaoli, SHEN Yan, SONG Lirong. Hydrologic response of the climatic change based on SWAT model in Beijiang River basin [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012,40(34):16761-16764. (in Chinese))
- [24] 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. (SONG Linxu, LIU Defu, XIAO Shangbin, et al. Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(1): 267-275. (in Chinese))
- [25] 王学, 张祖陆, 宁吉才. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J]. 生态学杂志, 2013,32(1):186-194. (WANG Xue, ZHANG Zulu, NING Jicai. Runoff response to land use change in Baimahe basin of China based on SWAT model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(1):186-194. (in Chinese))
- [26] 姚苏红, 朱仲元, 张圣微, 等. 基于 SWAT 模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013,27(1):175-180. (YAO Suhong, ZHU Zhongyuan, ZHANG Shengwei, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the river Shandianhe in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(1):175-180. (in Chinese))
- [27] 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 Zhanyu, Si Han, Kong Lili. 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. (in Chinese))
- [28] Zhang Y.Y., Xia J., Shao Q.X., et al. Water quantity and quality simulation by improved SWAT in highly regulated Huai River basin of China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(1):11-27.
- [29] Dessu S.B., Melesse A.M.. Modelling the rainfall-runoff process of the Mara River basin using the soil and water assessment tool [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(26): 4038-4049.
- [30] Winchell M., Srinivasan R., Di Luzio M., et al. ArcSWAT 2.3 interface for SWAT2005 user's guide [M]. USA: Texas Agricultural Experiment Station, 2005.
- [31] Horritt M.S., Bates P.D.. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow [J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1-4): 239-249.

Spatial Scale Analysis of Runoff Simulation for Liaohe River Basin

MAO Yuna, YE Aizhong, XU Jing

(College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Distributed models emphasize specific physical mechanism, then the input and parameters become more complex, many problems such as different parameters have same effect and which scale is proper, lead to uncertainty of simulated results. As for the choice of scale, based on SWAT model and choosing Liaohe watershed as study area, this paper analysed two influencing factors on estimated runoff, which include different DEM resolutions and different subbasin divisions. The results show that, 1) DEM resolution has little effect on watershed mean altitude, watershed area and subbasin number, but has much effect on mean slope, which means that when estimate runoff, we should make slope correction. As for river network, results showed when DEM resolution is 500m, the watershed delineation is much more similar with actual river network. 2) When the quantity of subbasin divisions is little, the estimated runoff varied considerably with the based runoff and had a sensitivity interval. This research will have much significance in the development and application of distributed models.

Key words: SWAT model; scale analysis; Liaohe River Basin