

模型驱动数据空间分辨率对模拟生态水文过程的影响

顾 慧,唐国平,江 涛

(中山大学地理科学与规划学院,广州 510275)

摘要: 设定两种独立的调参方案,检验将高/低分辨率下的调参值应用到低/高分辨率中驱动模型模拟的可行性;同时分析驱动数据分辨率的差异对模型模拟生态水文过程的影响;此外,设置9种集水面积阈值,分析驱动数据分辨率与集水面积阈值对模拟结果的影响。结果表明两种调参方案下模拟的水文与生态数据相关性强、差异小,说明调参方案受驱动数据分辨率的影响不明显;分辨率对土地覆被和土壤类型面积影响小,而对高程和坡度影响大;驱动数据分辨率降低,模拟径流的均值减小、峰值增大、生态变量值增大;驱动数据分辨与集水面积阈值之间不存在交互作用;集水面积阈值增大,模拟径流的均值、峰值均减小,生态变量值也减小,但阈值变化对峰现时间无影响。

关键词: 驱动数据;分辨率;集水面积阈值;分布式生态水文模型;流域模拟

DOI: 10.11821/dljy020190470

1 引言

分布式水文模型已逐渐成为研究陆地水文过程的主要工具之一。依托这些模型,研究者可根据降水过程,结合流域下垫面情况来模拟流域的产汇流过程^[1]。早期的水文模型有集总式水文模型,其主要将流域作为一个整体或者划分为几个小单元进行模拟,因此模型不能充分考虑到水文现象以及地形、土地覆被、土壤等环境要素的空间分布情况^[2]。后来,随着测量和计算机技术的不断发展,在进行水文模拟时流域可被细分为多个网格即栅格化,分布式水文模型开始快速进步^[3]。分布式生态水文模型 CHES^[4],不仅考虑生态水文过程之间的耦合也模拟网格单元水分和溶解物迁移的空间联系性。

利用数字高程数据提取所得的流域地形参数,是分布式模型必要的驱动数据。现有研究表明,分辨率的改变会导致提取的地形参数发生变化,如分辨率变低会使得地形趋于平滑、表面坡度变缓^[5-11]。这些变化会影响模型模拟的水文过程,有学者认为径流的模拟对驱动数据分辨率很敏感^[8,12-14]。但是也有研究指出不同分辨率下径流的模拟结果相对误差都较小^[10,15-17]。有学者建议利用高分辨率数据进行调参来减少低分辨率驱动数据对模拟结果的影响^[18]。此外,也有研究认为驱动数据存在临界空间分辨率,在其阈值范围内,模拟的径流误差可接受^[6,11,19-22],但是超出该阈值,模拟结果无显著改进^[21]。分辨率不仅影响流量累积阈值的选择和模拟网格的形态^[23],也影响集水区面积阈值的选取^[24]和由此生成河网的精确性^[25]。

影响流域水文过程的因素多种多样,分布式模型也因此朝着精细化方向发展,驱

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671192)

作者简介: 顾慧 (1995-), 女, 湖南湘西人, 硕士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: guformal@163.com

通讯作者: 唐国平 (1969-), 男, 湖南张家界人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态水文。

E-mail: Tanggp3@mail.sysu.edu.cn

动数据也呈现多样性。现有研究大多集中在数字高程模型分辨率大小对模拟结果的影响,以及在流域尺度上分析驱动数据分辨率变化对模拟流域水文变量的影响,鲜有在网格尺度上探讨驱动数据分辨率对模型模拟的生态水文过程的影响。因此本文将讨论驱动数据分辨率的改变对于流域土地覆被、土壤类型、高程和坡度所造成的影响,以及从流域尺度和网格尺度上对生态和水文模拟结果进行分析。探讨驱动数据分辨率对模型模拟陆地水文和生态过程的影响,包括检验:①把高/低分辨率调参结果应用到低/高分辨率驱动数据模拟的可行性;②在同种调参方案下分析驱动数据分辨率的差异对模拟结果的影响;③模型驱动数据分辨率和集水面积阈值对模拟结果的影响以及这两个因素对模拟结果的影响是否存在着交互作用。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

流溪河水库上游流域位于广东省广州市从化区境内,流域内水系主要由吕田河和玉溪河组成,集水面积约为474 km²。气候类型属亚热带湿润季风气候,年平均气温约为20.3℃^[26];虽然空气湿度大、雨水资源量足,但是也存在年内年际分布不均的问题,根据降水量划分4—9月为雨季^[27]。研究区内,80%以上为林地,耕地面积为40 km²,水域面积为5 km²,建筑用地及草地均不足5 km²。土壤以沙壤土为主,其次是壤土,粉砂壤土最少。

2.2 模型、模型驱动数据和处理

选用分布式耦合水文生态模型CHESS(coupled hydrology and ecology simulation system)来量化驱动数据空间分辨率对模拟生态水文过程的影响。CHESS是基于过程的分布式模型,旨在模拟陆地碳、氮、水循环以及植被的生长^[28-32]。该模型显示地模拟地表的产汇流过程。对任意模拟网格单元,其地下产流的计算公式如下^[30,32]:

$$F_{sub} = \gamma \times \left(e^{-\frac{s}{m}} - e^{-s_{max}} \right) \quad (1)$$

式中: F_{sub} 为地下产流量; γ 为产流系数,其计算公式如公式(2)^[30,32]; s 为土壤水饱和度; m 为土壤水力传导率随深度衰减的速率; s_{max} 为最大土壤深度的含水当量。

$$\gamma = \tan\beta \times \omega \quad (2)$$

式中: β 为模拟单元的坡度; ω 为对应网格的流径系数,主方向取值为0.5,斜方向为0.354。地表产流的计算公式如下^[30]:

$$F_{sur} = \max(R_s + U_{sats} - s, 0.0) \quad (3)$$

式中: F_{sur} 为地表产流量; R_s 是根系层储水量; U_{sats} 为土壤非饱和水层含水量; s 为土壤饱和度(注:CHESS把土壤分为根系层、非饱和含水层、饱和含水层^[30,32])。

土壤饱和差(soil saturation deficit, SSD),反映土壤含水量,计算公式如下^[32]:

$$s_i = \bar{s} + m_s(\bar{\omega} - \omega_i) \quad (4)$$

式中: s_i 为土壤饱和差; \bar{s} 为平均土壤饱和差; m_s 为考虑土壤饱和差的水力传导系数的衰减率; $\bar{\omega}$ 为平均湿润指数; ω_i 为该点的湿润指数。

局部湿润指数(wetness index)用来计算土壤饱和差,计算公式如下^[32]:

$$\omega_i = \ln(arT_e/T_o \tan\beta) \quad (5)$$

式中: ω_i 为局部湿润指数; ar 为上坡集水面积; T_e 为流域平均渗透系数; T_o 为局部渗

透系数(与土壤本身性质相关); β 为坡度。局部湿润指数越大,土壤饱和差越小。

CHES 模拟植物的净初级生产力(net primary productivity, NPP),其计算公式如下^[33]:

$$NPP = GPP - R_m - R_g \quad (6)$$

式中: GPP (gross primary productivity)表示总初级生产力; R_m 表示植物的维持呼吸; R_g 表示植物的生长呼吸。

CHES 模型所需的地形驱动数据包括高程、坡度、坡向和河网。本文采用 SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>)提供的分辨率为 90 m 的 DEM(数字高程模型数据)作为源数据获取不同空间分辨率的驱动数据,确定 8 组分辨率分别为: 90 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、400 m、450 m。同样,借助于 ArcGIS 中的水文模块,获取相关分辨率下对应的河网数据。本文设定 9 种(每种相差 0.405 km²)集水面积阈值,获得不同阈值下的河网。研究中所用土地覆被\利用数据来自广东省 1980 年 30 m 土地覆被数据,分为五大类:耕地、林地、草地、水域和建筑用地。土壤数据采用分辨率为 1 km 的 HWSO(世界土壤数据库)数据,并且结合该流域土壤的性质以及研究需要,将研究区内的土壤划分为三大类:沙壤土、壤土和粉砂壤土。采用 ArcGIS 中最近邻算法对土地覆被和土壤数据进行重采样获得 8 种不同的分辨率来匹配相应地形驱动数据。

CHES 模型模拟所需气象数据包括日最高、最低气温和日降水量。因研究区内气象监测无长时序数据,本文所用日气温数据来自距离研究区最近并且气候环境与研究区相近的新丰站点(114°8'E, 24°N),时间跨度为 1975—2013 年(数据来自于《中国地面气候资料日值数据集》)。日降雨数据来自流溪河水库站和吕田站。径流数据(1976—1988 年)通过《广东省水文年鉴》由库容曲线推导得出^{[26]35-37}。此外,模型驱动数据还包括二氧化碳年平均值,数据来自 NOAA/美国海洋及大气管理局(<https://www.noaa.gov/>)。

2.3 模型模拟方案设计

基于 8 组不同分辨率的模型驱动数据,设计 A 和 B 两种调参方案来分析驱动数据分辨率对模型率定参数的影响。方案 A 是高分辨率调参方案,基于最高分辨率(90 m)的驱动数据对模型进行调参、率定和验证,然后把所获得的参数用于其他低分辨率的模拟中;相对照,方案 B 是低分辨率调参方案,首先基于最低分辨率(450 m)的驱动数据对模型进行调参、率定和验证,然后把所获得的参数用于其他高分辨率的模拟中。利用统计参数判定驱动数据分辨率是否对模型率定参数产生影响,讨论在低分辨率驱动模型下率定所得的参数应用于高分辨率的可行性。

同时通过比较同一调参方案下仅驱动数据分辨率不同的情况下模拟所得的结果,来探讨模型驱动数据分辨率对模拟结果产生的影响。

此外,鉴于集水面积阈值的选取会影响所生成河网的形状,本文设定 9 种集水面积阈值: 0.81 km²、1.215 km²、1.62 km²、2.025 km²、2.43 km²、2.835 km²、3.24 km²、3.645 km²和 4.05 km²,相邻集水面积阈值差为 0.405 km²(50 个最高分辨率单位网格面积)。基于 9 种集水面积阈值所获得的河网作为模型输入数据对模拟结果进行讨论:①分辨率相同的情况下,集水面积阈值的差异对模拟结果的影响;②驱动数据分辨率和集水面积阈值之间是否存在交互作用。

2.4 统计分析方法

纳什效率系数(Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE),可以反应出水文模型的模拟值与实际测量值之间的拟合程度,取值范围为(-∞, 1]。NSE 越接近 1,说明模型模拟的结果与观测值越接近,模型可信度越高^[34],其计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_t - Q'_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_t - \bar{Q}_0)^2} \quad (7)$$

式中： Q_0 为观测值； Q_m 为模拟值； Q'_0 为第 t 时刻的值； $\overline{Q_0}$ 表示总平均观测值； T 为序列总数据量。

平均绝对偏差 (mean absolute deviation, MAE)，是各变量与均值差值的平均数^{[35]97-98}。为了更好地反应径流过程的模拟情况将公式稍作修改，将所有单个观测值与其相对应的实测值的之间的偏差取绝对值求和后取平均，这样能避免因正负偏差而导致抵消的问题，可以准确反映实际模拟误差的大小，取值范围为 $[0,+\infty)$ ，最优值为0，值越小说明误差越小，其计算公式如下：

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^T |Q'_0 - Q'_m|}{T} \tag{8}$$

式中：所涉及参数解释与公式 (7) 一致。

双因素方差分析：研究中使用有交互作用的双因素方差分析，来判断A和B两种因素之间对模拟结果的影响是否存在交互效应。原假设为：因素A对结果无显著影响；因素B对结果无显著性影响；因素A、B之间无交互作用。从F值检验的显著性水平出发，给定的显著性水平为0.05，大于0.05接受原假设，否则拒绝原假设^{[35]288-290}。

3 结果分析

3.1 调参方案对模拟生态水文变量的影响

利用方案A和方案B下的模型参数结合8组分辨率下的驱动数据，模拟得到1976—1988年研究区内水文和生态变量日尺度数据（利用1978年、1979年的径流数据进行模型率定，1980年、1981年的径流数据进行验证）。首先，将1976—1988年的模拟径流数据与实测数据相比较，用NSE值和MAE值来判定模拟径流值与实测值的拟合程度。根据所计算的NSE值，方案A下最小值为0.735，最大值为0.743；方案B下最小值为0.741，最大值为0.755。从NSE值来看方案A与方案B下8组分辨率的径流模拟结果均可信；从MAE值来看，两种方案下MAE值均随分辨率的降低而增大，即变化趋势相同，都具有上升趋势。进一步，对1976—1988年径流数据与实测数据逐年进行分析，得到两种方案下每年模拟结果的NSE值，方案A与方案B下的NSE值存在线性关系（图1a）。

对1976—1988年生态变量的模拟结果进行分析，采用90 m分辨率驱动数据模拟的净初级生产力值为基准，将其他7组数据与其比较得到MAE值（图1b）。结果表明，同

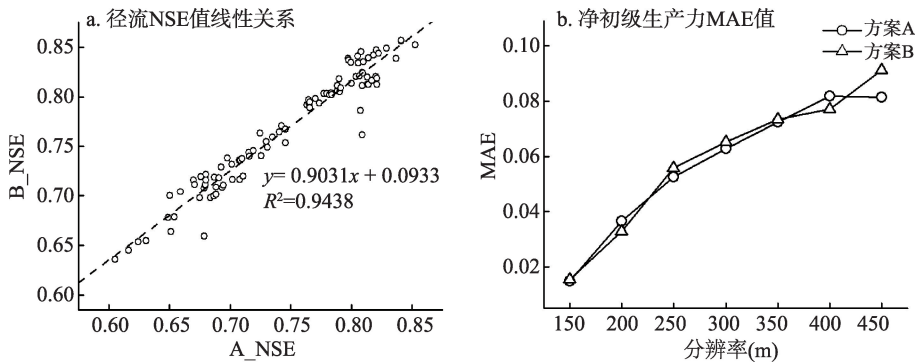


图1 方案A与方案B下模拟的径流NSE值线性关系和净初级生产力MAE值

Fig. 1 (a) The linear relationship of NSE for runoff between schemes A and B; and (b) the calculated MAE values for net primary productivity under schemes A and B, respectively

分辨率下两种调参方案的MAE值接近。从方案A与方案B下的水文与生态变量模拟结果的统计参数来看,调参时使用的驱动数据分辨率精度对模拟结果影响较小。

3.2 驱动数据分辨率对模拟水文生态变量的影响

3.2.1 分辨率对模拟流域尺度水文与生态变量的影响 虽然从NSE值(>0.74)来看,驱动数据分辨率在90~450m之间的径流模拟结果均可信,但是随分辨率降低,MAE值有增大的趋势,流域日径流均值有下降趋势(图2a)。这说明从流域尺度径流量的日均值来看,模拟值与实测值之间的差异会随着驱动数据分辨率的降低而增大。对于生态变量,随分辨率的降低,模拟的净初级生产力均值呈上升趋势(图2b)。此外,MAE值表明(图1b),随分辨率降低,所模拟的NPP值与90 m分辨率下的模拟值间的差异会增大。这说明从流域尺度而言,模型模拟的NPP值会随分辨率降低而增大。也就是说,从流域尺度的模拟结果来看水文变量和生态变量均会受到驱动数据分辨率的影响。

3.2.2 分辨率对模拟网格尺度水文和生态变量的影响 为了进一步分析驱动数据分辨率对模拟结果的影响,也从网格尺度上进行讨论。分析1981年,仅驱动数据分辨率不同而其他参数均相同的情况下,模拟结果之间的差异。水文变量选择土壤饱和差,它可以反映土壤含水层的释水能力,生态变量选择NPP。

根据1981年的模拟SSD来看(图3a)。结果表明,虽然SSD均值随分辨率的改变并无明显变化趋势,但是随分辨率降低,上四分位数和下四分位数之间的差值增大,且下四分位数呈明显下降趋势。进一步分析土壤饱和差的累计频率曲线(图3b)发现土壤饱和差小于500 mm的网格数量随分辨率的降低而增多,而大于1500 mm的网格数量同样有此现象。这表明,随分辨率降低,尽管从全流域看土壤饱和差的均值虽无显著变化趋势,但从累计频率曲线看小于500 mm和大于1500 mm所占的比例均在增大,说明模拟的土壤水分饱和和差在网格水平上离散程度增大。

从SSD值的空间数据看(图4),随分辨率降低,部分网格的SSD值减小反映到图片上即蓝色部分面积增多,而一部分红色区域颜色变深说明该部分SSD增大,这与图3b的结果一致,而整个流域SSD的离散程度增加(与图3a一致)。这表明在网格尺度上,模拟的SSD值随分辨率降低其数值的离散度增加,部分面积SSD值明显减小,小部分面积SSD增大。

根据图3c的净初级生产力累计频率曲线可以发现,分辨率对于NPP的影响主要在大于 $1000 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}$ 的部分。从图5a~图5h的变化趋势来看,随分辨率降低,整个流域颜色明显加深,说明NPP值增大。

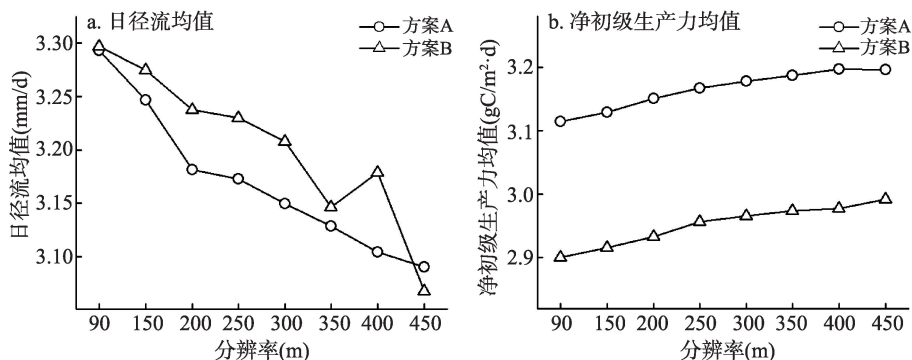


图2 8组分辨率下模拟的日径流均值和净初级生产力均值变化情况

Fig. 2 Variations of simulated daily average (a) runoff and (b) net primary productivity under eight sets of model driving data at different resolutions

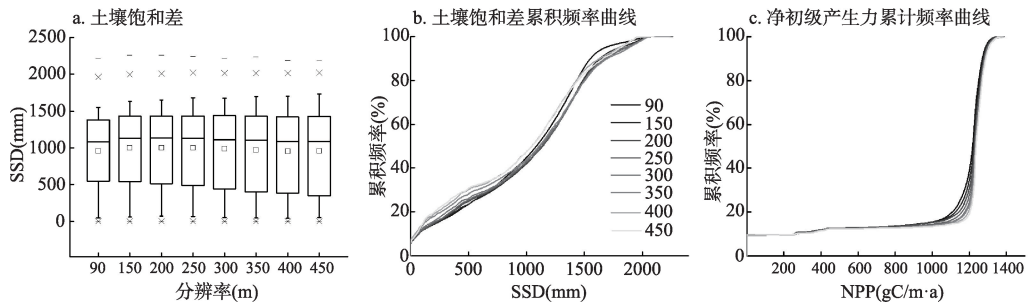


图3 1981年网格尺度SSD箱型图、SSD累计频率曲线、NPP累计频率曲线

Fig. 3 Variations in simulated SSD and NPP at grid cell level under eight sets of model forcing data at different resolutions as demonstrated by the variation of (a) the boxplots of SSD, as well as the accumulated frequency curve of (b) SSD and (c) NPP. Data shown here are based on simulation for the year 1981

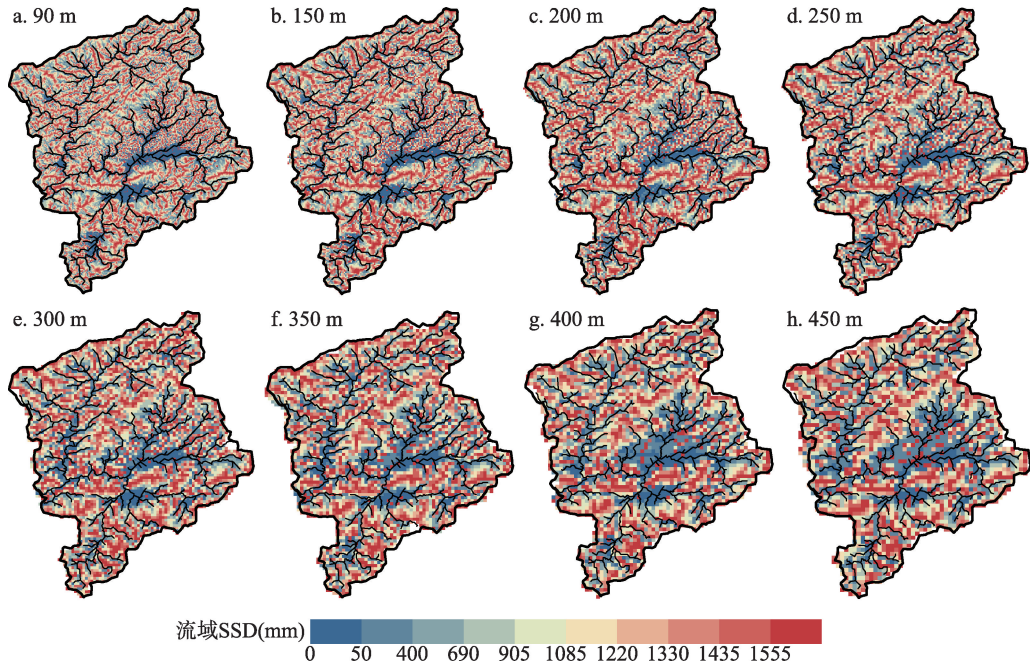


图4 8组分辨率驱动数据所模拟的SSD值

Fig. 4 The spatial pattern of simulated SSD based on eight sets of model forcing data at different resolutions

3.3 集水面积阈值对模拟水文和生态变量的影响

3.3.1 集水面积阈值对模拟流域尺度水文变量的影响 集水面积阈值的大小与驱动数据分辨率的高低均会对模型的输入数据造成影响,从而使得模拟结果具有差异性,依托这些模拟结果讨论集水面积阈值、分辨率的选取对模拟生态水文过程所造成的影响。利用NSE值和MAE值判断径流模拟结果。从图6a、图6b来看,随集水面积阈值增大,模拟的径流值与观测值之间差异增大拟合度减小(NSE减小、MAE增大),并且不同分辨率模拟结果之间的差异也增大。进一步研究发现,对同一集水面积阈值来说,模拟径流的效果随着分辨率的增大而降低,表现在模拟的径流值与实测值之间的差异随分辨率的增加而增大。总体来说,集水面积阈值越小模拟径流的效果相对越好,模拟的径流值与实测值间的差异越小,且不同分辨率之间的模拟结果的差异也越小。

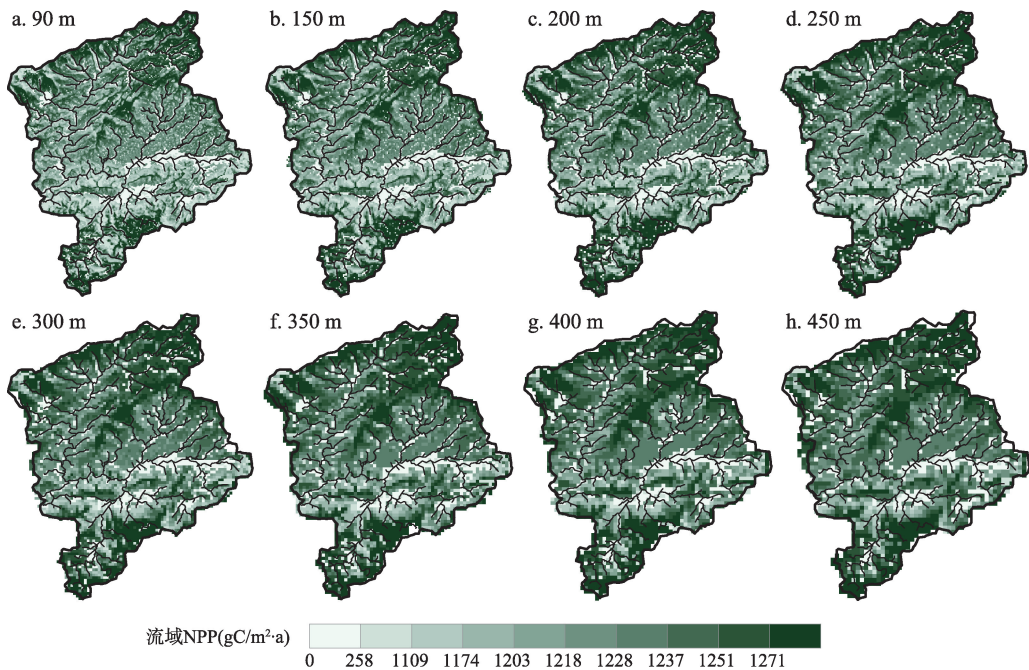


图5 8组分辨率驱动数据所模拟的NPP值

Fig. 5 The spatial pattern of simulated NPP based on eight sets of model forcing data at different resolutions

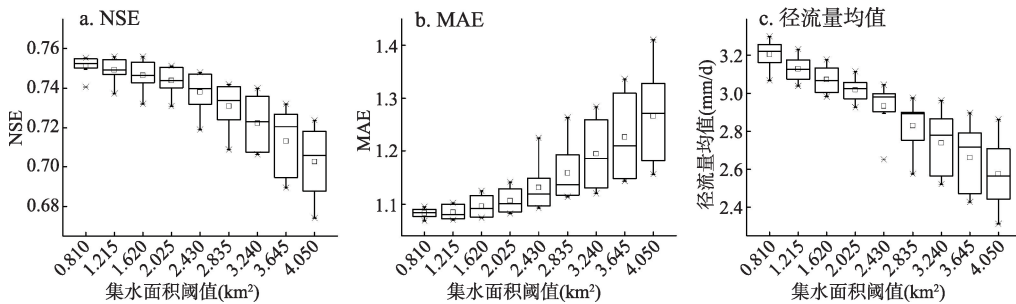


图6 集水面积阈值对模拟径流的影响

Fig. 6 Effect of drainage area thresholds on simulated runoff

为了分析驱动数据分辨率与集水面积阈值对模拟结果的影响,利用1980—1988年的模拟结果以年为单位进行分析。模型的驱动数据受集水面积阈值和分辨率的影响,而可选的集水面积阈值有9种、分辨率有8种,综合来看存在72种模拟结果。使用NSE值表征模拟年径流和实测年径流的拟合程度,因此每年共72个NSE值,以年为分组1980—1988年共9组数据。以径流模拟结果的NSE为因变量,分辨率和集水面积阈值为自变量,进行双因素方差分析。结果表明(表1),分辨率 $P>0.05$,不能拒绝原假设;由于 $P<0.05$,所以拒绝原假设,认为不同集水面积阈值的NSE值有显著性差异;而分辨率和集水面积阈值, $P>0.05$,二者的交互作用对NSE值的影响忽略不计。

表1 双因素方差分析结果(因变量: NSE)

Tab. 1 Results of Two-Way ANOVA (dependent variable: NSE)

源	df	均方	F	P
分辨率	7	1.553	1.577	0.14
集水面积阈值	8	6.903	7.009	0
分辨率×集水面积阈值	56	0.189	0.192	1

将集水面积阈值作为因素变量, NSE值作为因变量, 讨论不同集水面积阈值下所计算的NSE均值是否存在显著性差异。根据计算结果(表2), 与集水面积阈值区间为0.81~3.24 km²相比, 当集水面积阈值区间为3.645~4.05 km², 所计算的NSE均值之间存在显著性差异($P<0.05$)。

表2 不同集水面积阈值下模拟结果NSE值组间比较得到的P值

Tab. 2 Comparisons of p values between NSE values of simulation results at different drainage area thresholds

集水面积阈值(km ²)	0.810	1.215	1.620	2.025	2.430	2.835	3.240	3.645	4.050
0.810		0.720	0.656	0.825	0.476	0.071	0.005	0	0
1.215			0.931	0.890	0.284	0.031	0.001	0	0
1.620				0.822	0.247	0.025	0.001	0	0
2.025					0.351	0.043	0.002	0	0
2.430						0.275	0.034	0.003	0
2.835							0.303	0.057	0.004
3.240								0.381	0.064
3.645									0.328
4.050									

3.3.2 河网对模拟流域尺度生态变量的影响 因为生态变量无实测数据, 所以采用集水面积阈值为0.81 km²时模拟的1980—1988年日NPP数据作为基准, 剩下的8组数据与其相比较。对比分析发现, MAE值随集水面积阈值增大而小幅上升, 表明分辨率降低模拟的NPP值误差会相对增大。进一步以模拟的年NPP均值为因变量, 分辨率和集水面积阈值为自变量, 进行双因素方差分析。结果表明(表3), 分辨率和集水面积阈值对模拟的NPP均值都具有显著影响($P<0.05$)。但同水文变量一样, 分辨率与集水面积阈值之间交互作用不显著($P>0.05$)。

表3 双因素方差分析结果(因变量: NPP均值)

Tab. 3 Results of Two-Way ANOVA (dependent variable:

NPP mean value)

源	df	均方	F	P
分辨率	7	21.117	28.035	0
集水面积阈值	8	7.616	10.111	0
分辨率×集水面积阈值	56	0.025	0.033	1

4 讨论

4.1 驱动数据分辨率对模拟水文和生态过程的影响

水文模型的驱动数据除了高程外, 也常包括土地覆被\利用、土壤、坡度等。很多情况下, 应用分布式模型要求输入的驱动数据的空间分辨率保持一致, 因此常常需要对数据重采样。但是由于重采样会影响数据的精度和网格数据本身的空间分布状况, 所以即使数据同源, 也会因重采样要求不同使得数据之间产生差异。土地覆被分辨率的变化可能导致各个土地覆被类型面积出现偏差。并且土地覆被的变化所导致的影响是多样的, 应与原始和替代植被、土壤等性质结合起来一起考虑^[36]。对整个流域来说, 土地覆被的变化情况可由其面积变化来表征。根据统计分析结果来看, 对于研究区域来说不同分辨率下土地覆被和土壤类型的面积变化很小(表4)。主要原因是研究区内土地覆被以林地为主, 土壤类型主要为沙壤土(>88%), 而重采样技术中网格受相邻网格的影响较大。比如以90 m分辨率下的土地覆被为基准, 其他分辨率与其比较, 面积占比最高的林地最

表4 8组分辨率下土地覆被和土壤类型的变化

Tab. 4 Changes in land cover and soil types at eight different resolutions

(单位:km²)

分辨率(m)	土地覆被					土壤类型		
	林地	耕地	水域	建筑用地	草地	沙壤土	壤土	粉砂土
90	421.65	39.77	5.00	4.42	3.16	419.26	50.73	4.01
150	421.72	39.67	5.29	4.36	3.33	419.11	51.01	4.25
200	420.04	40.68	4.68	4.56	3.48	416.12	53.48	3.84
250	420.94	39.13	4.94	4.06	3.75	416.31	52.50	4.00
300	419.04	40.05	4.59	4.95	3.78	416.34	52.29	3.78
350	421.89	40.06	5.27	4.41	3.80	417.48	53.53	4.41
400	417.28	40.32	5.44	4.64	3.20	417.92	49.44	3.52
450	416.14	39.29	6.08	4.66	3.65	415.50	45.50	2.75

大改变幅度仅1.04%。虽然土地利用和土壤类型的覆被情况会随分辨率的改变发生变化,但由于变化面积小,对整个流域的影响低。所以在本研究中认为驱动数据中土地覆被和土壤类型受分辨率的影响微小,对模拟结果影响的讨论中不再考虑这两种驱动数据。

驱动数据分辨率也会影响地形参数(高程和坡度)在流域上的分布情况。在本研究中,随分辨率减小,整个流域内的高程和坡度的纵向和横向差异均变小,流域的地形趋于平整。比如,最小高程由90 m分辨率下的178.1 m增加到了450 m分辨率下的180.3 m,而最大高程却由1134.8 m下降到1052.9 m。这说明虽然整个流域高程的均值受分辨率变化的影响较小,但其值的范围和分布受到较大影响。同样,坡度的最大值随分辨率的降低从50.5°降低到25.5°,而平均坡度值也从11.7°降低到6.19°,标准差也从7.99降低为5.06,这表明数据的离散程度在减小。从整个研究区的坡度来看(图7),坡度值分布的上四分位数和下四分位数随分辨率降低均在减小,极大值也在递减,说明流域内的地形坡度减小。利用网格尺度的研究区坡度图形进一步研究发现(图8),研究区内坡度随分辨率减小而变缓,区域坡度减小趋于平滑并且微地形消失。

坡度的改变会对单位面积可获得的太阳辐射量产生影响,坡度大被遮蔽的时间越长日照时间越短,单位面积可获得的太阳辐射量越小。CHESS模型中生态变量与太阳辐射量之间关系紧密,太阳辐射量增大植物光合作用增强生态变量增大。结合图5和图8来看,随分辨率降低,坡度在整个研究区有减小的趋势,NPP有增大的趋势。

坡度也会对水文过程造成影响,因为分辨率降低造成坡度减小,会导致上坡集水面积增大^[6]。上坡集水面积和坡度构成的地形指数可用于指示饱和区范围、土壤湿度等,有学者认为地形指数大的部分土壤易达到饱和^[37]。在CHESS模型中(公式5),坡度减小会导致上坡集水面积增大、斜率减小进而导致湿润指数增大,降水滞留在土壤中的水分比例增大,而产流减小。结合土壤饱和差来看(图4),随分辨率降低研究区内SSD值减小,即表明储蓄在

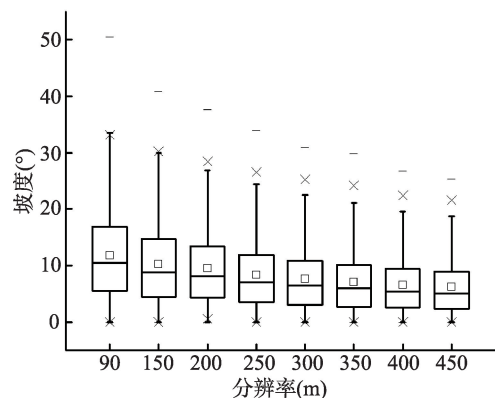


图7 8组分辨率下流域坡度变化箱型图

Fig. 7 The boxplots of changes in watershed slopes at eight different spatial resolutions

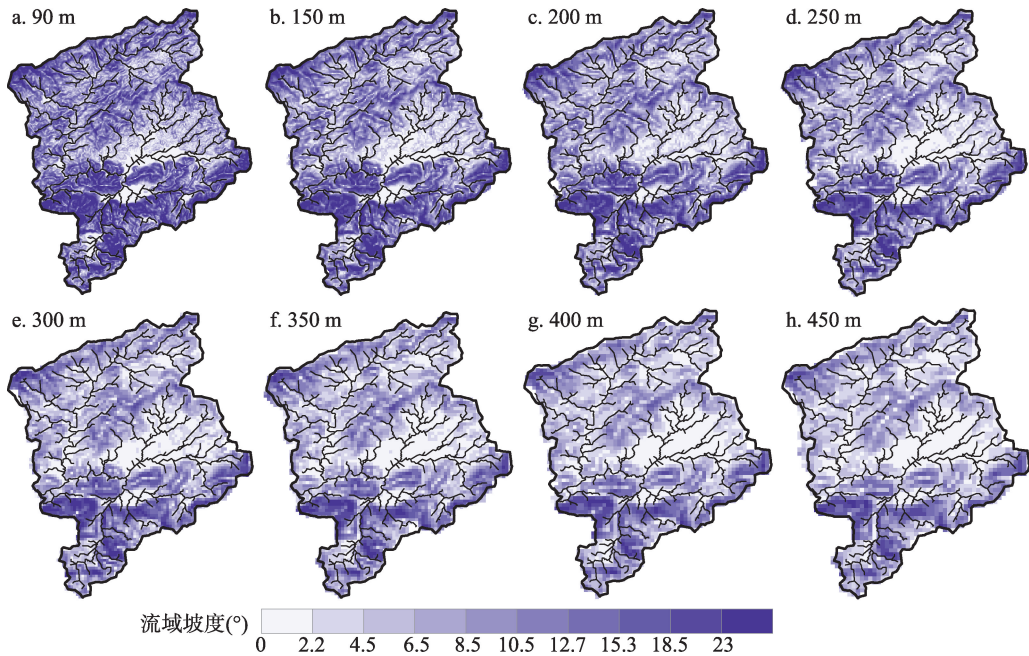


图8 8组分辨率下流域坡度变化图

Fig. 8 The spatial patterns of slope change at eight different spatial resolutions

土壤中的水分增多。并且结合NPP值(图5),随分辨率减小研究区内部分面积的NPP值增大,净初级生产力的增大说明植物生长更为活跃,因此植物蒸腾作用也会增加。而径流均值(图2a)也显示,随分辨率降低值下降。总的来说,分辨率降低会导致储蓄在土壤中的水分增多,该部分没有在出口流出所以会计入蒸发量中;植被蒸散发水分增多;流域径流值减小。

4.2 河网提取对流域和网格尺度水文模拟的影响

河道可用来说明坡面汇流和河道汇流,而两种汇流方式的汇流速度不同,进而会对流域出口处径流值产生影响。有研究表明同一流域因集水面积阈值的差异会提取出不同的河网^[38]。通过双因素方差分析,本文发现驱动数据分辨率和集水面积阈值之间无交互作用,但集水面积阈值对模拟结果产生显著影响。

集水面积阈值的变化对水文变量和生态变量均存在显著性影响。因为分辨率与集水面积阈值之间无交互作用,所以仅选择90 m分辨率下的模拟结果进行研究。1976—1988年的长系列模拟结果表明,随着集水面积阈值的增大,模拟所得的径流值减小、蒸散发增大、NPP值减小。集水面积阈值的大小会影响子流域的划分,并改变网格内水分的流向,集水面积的阈值越大会导致子流域面积越大,进而造成部分网格的出流水量的坡面汇流距离增加,导致流域蒸发量增多。并且CHES模型主要应用于小流域,在模型设置上即为上游径流在当日就能到达流域出口。所以集水面积阈值的变化不会影响到峰现时间,只会对径流值造成影响(图9)。综合来看,集水面积阈值增大会使得部分网格到达河道的距离增加,而增加的距离由原来的河道汇流转为坡面汇流,增大流域蒸发量;同时由于研究的流域小,降水一日内可全部汇集到流域出口处,所以日尺度径流无法反映出集水面积阈值对于峰现时间的影响,即在本研究中集水面积阈值的变化对峰现时间无影响。

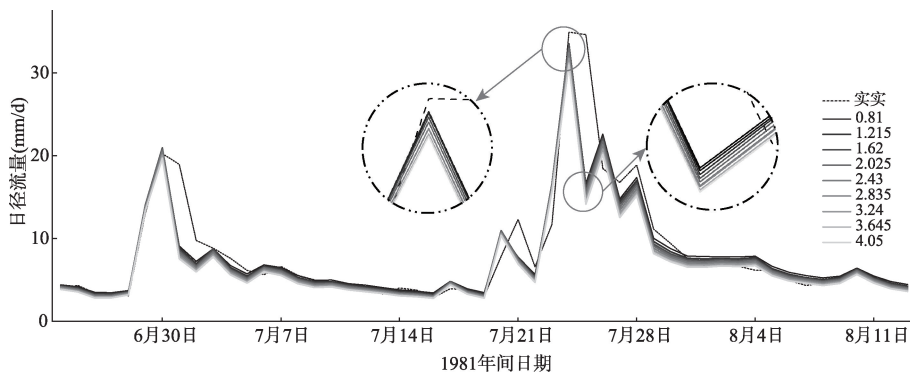


图9 9种集水面积阈值下模拟的1981年6月24日到8月13日的日径流值

Fig. 9 The variation of simulated runoff for the period of June 24 to August 13 in 1981 at nine different drainage area thresholds

5 结论

基于CHES分布式耦合水文生态模型, 本研究发现:

(1) 就模型模拟效果来看, 高分辨率调参所得参数与低分辨率调参所得参数运用到各个分辨率下得到的模拟结果均可信, 并且两种方案下径流模拟的NSE值线性相关, 净初级生产力的MAE值接近, 这表明数据分辨率对参数调节的影响小。由于分辨率会影响模拟的总网格数, 在使用低分辨率进行模型调参时, 因为网格数量相对少, 所需的时间相对减少, 运行速度快。因此, 本文建议当模拟区域比较大或者计算机性能受限时, 可采用低分辨率数据调参, 然后把调参结果应用到高分率驱动数据, 这样可提高模型率定的效率。

(2) 驱动数据分辨率降低, 会造成模拟的水文变量均值减小峰值增大, 生态变量值增大。产生这种变化的原因主要是随分辨率降低, 流域坡度减小、流域地形趋于平缓, 使得土壤饱和差减小, 降水蓄积在土壤中的水量增多而产流的水量减少, 从而导致流域蒸发量增多、径流量减小。对于生态过程而言, 坡度减小会增大地表接受太阳辐射的时间, 从而导致模拟的NPP值增大。

(3) 驱动数据分辨率与集水面积阈值之间无交互作用。集水面积阈值对水文变量和生态变量均具有显著影响。集水面积阈值增大, 径流值减小、蒸散发值增大, 但由于研究区面积小且CHES模型为日步长, 所以在本研究中峰现时间对阈值不敏感。当研究区为小流域时, 峰现时间较准确但模拟的径流值较小时, 可以考虑减小集水面积阈值。由于水文条件发生变化, 生态变量也受到影响, 随集水面积阈值增大, 模拟的生态变量值降低。

致谢: 真诚感谢匿名专家在论文评审中所付出的时间和精力, 评审专家对于水文模型的规范使用, 模拟结果分析中注意事项等方面的修改意见, 使本文获益匪浅。

参考文献(References)

[1] 芮孝芳. 论流域水文模型. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 1-7. [Rui Xiaofang. Discuss watershed hydrological mod-

- els. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(4): 1-7.]
- [2] 林三益, 薛焱森, 晁储经等. 斯坦福(IV)萨克拉门托流域水文模型的对比分析. *成都科技大学学报*, 1983, 27(3): 83-90. [Lin Sanyi, Xue Yansen, Chao Chujing, et al. Comparative analysis of Stanford watershed model (IV) and Sacramento model. *Journal of University of Science and Technology of Chengdu*, 1983, 27(3): 83-90.]
- [3] 芮孝芳, 石朋. 数字水文学的萌芽及前景. *水利水电科技进展*, 2004, 24(6): 55-58, 73. [Rui Xiaofang, Shi Peng. Seeds and prospects of digital hydrology. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004, 24(6): 55-58, 73.]
- [4] Wu Y, Tang G, Gu H, et al. The variation of vegetation greenness and underlying mechanisms in Guangdong province of China during 2001-2013 based on MODIS data. *Science of The Total Environment*, 2019, 653(1): 536-546.
- [5] Vieux B E. DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modeling. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1993, 7(3): 310-338.
- [6] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water resources research*, 1994, 30(4): 1019-1028.
- [7] Yang D, Herath S, Musiak K. Spatial resolution sensitivity of drainage geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. *Hydrological processes*, 2001, 15(11): 2085-2099.
- [8] Wu S, Li J, Huang G H. Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(9): 1250-1260.
- [9] Wu S, Li J, Huang G. A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography*, 2008, 28(3): 210-223.
- [10] Ghaffari G. The impact of DEM resolution on runoff and sediment modelling results. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2011, 5(8): 691-702.
- [11] Buakhao W, Kangrang A. DEM resolution impact on the estimation of the physical characteristics of watersheds by using SWAT. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 2016(1): 1-9.
- [12] Cho S M, Lee M. Sensitivity considerations when modeling hydrologic processes with digital elevation model. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(4): 931-934.
- [13] Dixon B, Earls J. Resample or not?! Effects of resolution of DEMs in watershed modeling. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2009, 23(12): 1714-1724.
- [14] Son K, Tague C, Hunsaker C. Effects of model spatial resolution on ecohydrologic predictions and their sensitivity to inter-annual climate variability. *Water*, 2016, 8(321): 1-20.
- [15] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of hydrology*, 2005, 312(1-4): 207-222.
- [16] Lin S, Jing C, Chaplot V, et al. Effect of DEM resolution on SWAT outputs of runoff, sediment and nutrients. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2010, 7(4): 4411-4435.
- [17] Tan M L, Ficklin D L, Dixon B, et al. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. *Applied Geography*, 2015, 63(1): 357-368.
- [18] Grohmann C H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers & geosciences*, 2015, 77(1): 111-117.
- [19] Liang X, Guo J, Leung L R. Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. *Journal of Hydrology*, 2004, 298(1-4): 287-310.
- [20] Chaubey I, Cotter A, Costello T, et al. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2005, 19(3): 621-628.
- [21] Han J C, Huang G H, Zhang H, et al. Effects of watershed subdivision level on semi-distributed hydrological simulations: Case study of the SLURP model applied to the Xiangxi River watershed, China. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(1): 108-125.
- [22] Ghumman A R, Al-Salamah I S, Alsaleem S S, et al. Evaluating the impact of lower resolutions of digital elevation model on rainfall-runoff modeling for ungauged Drainages. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(2): 1-11.
- [23] Ariza-Villaverde A B, Jimenez-Hornero F J, Rave E G. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. *Geomorphology*, 2015, 241(1): 243-254.
- [24] Tan M L, Ramli H P, Tam T H. Effect of DEM resolution, source, resampling technique and area threshold on SWAT outputs. *Water Resources Management*, 2018, 32(14): 4591-4606.
- [25] Li J, Wong D W. Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(3): 251-261.

- [26] 窦乙峰. 流溪河水库流域土地利用和气候变化对径流的影响. 广州: 中山大学硕士学位论文, 2018. [Dou Yifeng. The impacts of land use change and climate variability on runoff in the Liuxihe reservoir watershed. Guangzhou: Master Dissertation of Sun Yat-Sen University, 2018.]
- [27] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于SWAT模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998. [Yuan Yuzheng, Zhang Zhengdong, Meng Jinhua. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 989-998.]
- [28] Tang G, Carroll R W H, Lutz A, et al. Regulation of precipitation-associated vegetation dynamics on Drainage water balance in a semiarid and arid mountainous watershed. *Ecohydrology*, 2016, 9(7): 1248-1262.
- [29] Tang G, Hwang T, Pradhanang S M. Does consideration of water routing affect simulated water and carbon dynamics in terrestrial ecosystems?. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2014, 18(4): 1423-1437.
- [30] Tang G, Li S, Yang M, et al. Streamflow response to snow regime shift associated with climate variability in four mountain watersheds in the US Great Basin. *Journal of Hydrology*, 2019, 573(1): 255-266.
- [31] 许振武. 高分辨率大尺度分布式水文模型建模与应用. 广州: 中山大学硕士学位论文, 2019: 8-15. [Xu Zhenwu. Developing high-resolution large-scale distributed hydrological model and its application in the Dongjiang River Basin. Guangzhou: Master Dissertation of Sun Yat-Sen University, 2019: 8-15.]
- [32] Tague C, Band L. RHESys: Regional hydro-ecologic simulation system: An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. *Earth Interactions*, 2004, 8(19): 1-42.
- [33] Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975: 217-231.
- [34] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [35] 贾俊平. 统计学. 第四版. 北京: 中国人民大学出版社, 2009. [Jia Junping. *Statistics*. Fourth Edition. Beijing: China Renmin University Press, 2009.]
- [36] Ochoa-Tocachi B F, Buytaert W, Bievre B D, et al. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean Drainages. *Hydrological Processes*, 2016, 30(22): 4074-4089.
- [37] 郭方, 刘新仁, 任立良. 以地形为基础的流域水文模型. 水科学进展, 2000, 11(3): 295-300. [Guo Fang, Liu Xinren, Ren Liliang. A Topography Based Hydrological Model. *Advances in Water Science*, 2000, 11(3): 295-300.]
- [38] Tribe A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method. *Journal of Hydrology*, 1992, 139(1-4): 263-293.

Effects of spatial resolution of model-driving data on simulating land-surface eco-hydrological processes

GU Hui, TANG Guoping, JIANG Tao

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This study used CHES (The Coupled Hydrology and Ecology Simulation System) to explore (i) how the model's parametrization scenarios affect model simulation driven by forcing data of different spatial resolutions; (ii) how the spatial resolutions of model-forcing data affect model results; and (iii) how the selection of drainage area threshold affects model simulations. Eight sets of driving data of different spatial resolutions, two independent parameterization schemes A and B as well as nine sets of drainage area thresholds are developed in this study for analyses. As for the parameterization scenarios, the scheme A/B first parameterizes the model based on high-resolution/low-resolution forcing data. Then, the parameterization results are applied to simulations driven by low-resolution/high-resolution data. Based on the results from the parameterization scenario B, the effects of spatial resolution of model driving data on simulated land-surface eco-hydrological processes are investigated. Our results indicate that the simulated eco-hydrological variables between schemes A and B are strongly correlated and their differences are minimal. This indicates that the model's parameterization is not sensitive to the resolutions of model driving data. Additionally, the resolution of model driving data has little effect on the land cover and soil types but it greatly affects the elevation and slope of the study catchment. With the decrease in spatial resolution of model driving data, the elevation and slope of the catchment decrease, the micro terrains suffer from loss, and the terrain becomes flatter. Through the statistical analysis of simulated eco-hydrological variables, we found that the mean value of simulated runoff decreases, the peak value increases, and the value of ecological variable increases with the decrease in the resolution of the driving data. Besides, there is no significant interaction between the resolution of driving data and the selection of drainage area thresholds. With the increase in drainage area threshold, the mean and peak values of runoff decrease and so do the magnitudes of modeled ecological variables. Nevertheless, the selection of drainage area thresholds does not affect the peak time of runoff.

Keywords: model driving data; spatial resolution; drainage area threshold; distributed eco-hydrological model; watershed simulation