

WASSI-C生态水文模型响应单元空间尺度的确定——以杂古脑流域为例

刘 宁¹ 孙鹏森^{1*} 刘世荣¹ 孙 阁²

¹中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ²Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA

摘 要 模型基本单元空间尺度的确定是大尺度生态水文模型应用的前提, 也是提高模型模拟精度的关键。该文以长江流域岷江上游的杂谷脑河上游流域为例, 通过设置最小流域面积阈值, 构建不同的水文响应单元划分方案, 探讨生态水文模型WASSI-C响应单元的最佳空间响应尺度。结果表明: 模型响应单元空间尺度的变化对模型精度有显著影响, 模拟效果存在随响应单元划分面积阈值增加先提高再稳定的趋势, 面积阈值小于85 km²时, 模型的模拟效果较好。此外, 面积阈值小于85 km²时, 模型模拟的水、碳循环变量验证的拟合相关性系数和效率系数均趋于稳定, 因此可以将模型水文响应单元流域划分的面积阈值确定为85 km²。基于这一尺度的模拟与验证研究, 分析了WASSI-C模型中关键变量设置对模拟结果的影响。

关键词 生态水文模型, 水文响应单元, 空间尺度

Determination of spatial scale of response unit for the WASSI-C eco-hydrological model—a case study on the upper Zagunao River watershed of China

LIU Ning¹, SUN Peng-Sen^{1*}, LIU Shi-Rong¹, and SUN Ge²

¹Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of the State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; and ²Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA

Abstract

Aims Optimal spatial scale of hydrological response unit (HRU) is a precondition for eco-hydrological modeling as it is essential to improve accuracy. Our objective was to evaluate the spatial scale of HRU for application of the WASSI-C model.

Methods We determined the best HRU scale for the eco-hydrological model (WASSI-C) through examining the modeling accuracies at different HRU thresholds. This study focused on a large watershed, the upper Zagunao River watershed, situated in the upper reach of the Minjiang River, Yangtze River Basin, China.

Important findings Variation of spatial scales in HRU significantly affected the modeling accuracy. With the increase of the spatial scale of HRU, the accuracy of simulated results first increased then remained relatively unchanged and then decreased, suggesting existence of a threshold around 85 km² in HRU for this model for this watershed. We validated the model using this optimum spatial scale and discussed the potential to improve model output by addressing input parameters such as temperature.

Key words eco-hydrological model, hydrological response unit (HRU), spatial scale

生态水文学作为生态学和水文学的交叉学科, 逐渐成为全球气候变化条件下研究水、碳耦合关系的热点学科(王根绪等, 2001; 王凌河等, 2009)。基于遥感和地理信息系统技术的生态水文模型随之得到广泛应用, 并成为生态水文学研究的重要内容。生态水文模型能够同时模拟生态过程和水文过程, 是研究水、碳耦合关系的重要途径。近年来, 已

经构建出大量不同类型的生态水文模型(刘宁等, 2012), 其中包括基于光合-气孔-蒸腾机理的模型(如: CEVSA (Cao & Woodward, 1998)、BEPS (Liu *et al.*, 1997)、IBIS (Foley *et al.*, 1996)等)和基于水文和生态模型构建的模型(如: DLEM (田汉勤等, 2010)、WASSI-C (Sun *et al.*, 2011b)、RHESSys (Tague & Band, 2004)等)。

水、碳循环过程变量是非线性的尺度响应变量, 随时空的变化发生显著改变, 因此模型模拟尺度的确定是模型应用的前提, 只有对模型进行多尺度的分析和验证, 才能找到最适模拟尺度, 得到准确的模拟结果。生态过程和水文过程具有各自的尺度特性, 随着尺度变化, 许多过程和参数会随之改变, 从而影响模型的适用性。模型的模拟尺度包括时间尺度和空间响应尺度。模型的时间尺度为模型可以模拟的最小时间间隔, 由于受现实观测条件的限制, 在模型实际应用时, 并不能完全满足各时间尺度模拟的需要, 因此模型的时间尺度需要基于现实的观测条件和研究目的而定; 而模型的空间响应尺度需要基于不同地理条件下的立地条件确定。模型的空间响应尺度是确定模型尺度适用性的关键。一些研究者对模型的空间响应尺度进行了研究, 其中包括分布式生态水文模型的单元格大小和集总式模型响应单元大小的确定。王盛萍等(2008)对分布式水文模型MIKESHE的研究发现, 模拟单元大小对径流的模拟具有显著影响, 单元格变化引起流域特征变化, 从而可改变流域的径流量和峰值。张雪松等(2004)对SWAT模型的流域单元划分研究发现, 随着亚流域数的增加, 径流逐渐增加, 但是当亚流域数增加到一定程度后, 模拟结果的敏感性就会降低, 模拟结果趋于稳定。

由于水文过程和碳循环过程对尺度的依赖性不同, 目前对于同时评价水、碳耦合模拟效果的研究尚少, 本文以杂古脑流域为例, 基于不同的流域单元划分方案, 对杂古脑上游流域水、碳通量的模拟结果利用多个验证指标进行评价, 探讨月尺度生态水文过程耦合模型WASSI-C模拟生态和水文过程的空间尺度依赖性。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

本研究选取杂古脑河上游流域为研究区(102°34.8′-103°13.2′ E, 31°10.8′-31°55.8′ N)。杂古脑河隶属于长江流域, 是岷江上游的主要支流之一。研究区海拔1 823-5 769 m, 平均海拔3 859 m。夏季凉爽, 冬季寒冷, 属于典型的高山气候。夏季主要受印度洋西南季风的影响, 形成5至9月的雨季。雨季平均降水量为880 mm, 占全年总降水量的80%。流域主要的植被类型为高山草甸和亚高山针

叶林, 它们分别占流域总面积的46%和32%, 主要树种为岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)和云杉(*Picea asperata*) (Jiang, 1963)。

1.2 数据

用于流域划分的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据分辨率为90 m, 作为模型输入参数的气象数据包括月尺度的降水和温度数据。本研究使用的气象数据基于全国752个气象站的温度和降水数据, 利用Anusplin (Ver. 4.1; Australian National University, Center for Resources and Environmental Studies, Canberra, Australia)软件, 引入经度、纬度、高程信息作为协变量, 采用三变量薄板光顺样条插值法制备的1 km × 1 km温度和降水数据集(余振等, 2011)。用到的中分辨率成像光谱仪数据(MODIS)包括MODIS叶面积指数(leaf area index, LAI) (MOD 15)、MODIS蒸散(evapotranspiration, ET) (MOD 16)、MODIS总初级生产力(gross primary production, GPP) (MOD 17)和MODIS 2000年的土地覆盖数据集。其中LAI和土地覆盖数据集为模型的输入参数; ET和GPP数据集用于模型的验证。为了表述一致, 将MODIS的总初级生产力数据写为MODIS_GEP。在生态系统尺度上, GPP近似等于总生态系统生产力(GEP), GPP和GEP都代表植被的固碳能力。GPP多次被用于模型模拟结果的验证(Sun *et al.*, 2011b)。模型土壤属性参数获取的基础数据为中国1:100万土壤图(Shi *et al.*, 2010), 其中包含分层的土壤类型和土壤质地数据等。用于模型径流验证的数据为流域出口杂古脑水文站2000年的日径流数据。模型的验证数据还有Zhang等(2010)制备的全球1983-2006年的植被月ET数据集。此数据集基于改进的Penman-Monteith公式(Penman, 1948)计算, 其中通过引入归一化植被指数(NDVI)和遥感数据实现对冠层表面阻抗的计算, 从而构建遥感彭曼模型对ET进行模拟。详细数据集介绍见表1。

2 研究方法

2.1 WASSI-C模型

WASSI-C模型是Sun等(2011b)开发的一个以水文模拟为核心的月尺度生态系统模型, 是由水分供需计算模型(water supply stress index, WASSI) (Sun *et al.*, 2011a)和水碳经验模型构成的月尺度生态系统集成水、碳耦合模型, 模型框架如图1。该模型以

表1 本研究中用到的数据集
Table 1 Datasets used in the study

数据集 Dataset	来源 Source	用途 Usage	分辨率 Resolution ratio	年份 Year
气象数据(温度和降水) Climate data (temperature and precipitation)	国家气象局 State Meteorological Administration, China	输入数据 Input data	1 km × 1 km	2000
植被覆盖数据 Vegetation cover data	中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (http://modis.gsfc.nasa.gov)	输入数据 Input data	1 km × 1 km	2000
叶面积指数 Leaf area index (LAI)	中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (http://modis.gsfc.nasa.gov)	输入数据 Input data	1 km × 1 km	2000
土壤属性数据 Soil property data	中国科学院南京土壤研究所 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, China	输入数据 Input data	1 km × 1 km	
总初级生产力 Gross primary production (GPP)	中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (http://modis.gsfc.nasa.gov)	模型验证 Model validation	1 km × 1 km	2000
蒸散 Evapotranspiration (ET)	MODIS蒸散 MODIS_ET Zhang蒸散 Zhang_ET	中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (http://modis.gsfc.nasa.gov) ET全球数据集 Global ET database (ftp://ftp.ntsg.umd.edu)	模型验证 Model validation 模型验证 Model validation	1 km × 1 km 2000 8 km × 8 km 2000
径流 Runoff (RUNOFF)	四川省水文资源勘测局 Hydrology and Water Resource Investigation Bureau of Sichuan Province, China	模型验证 Model validation		2000

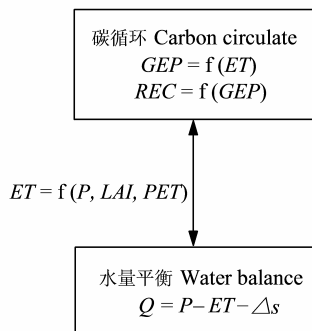


图1 WASSI-C模型的框架。*ET*, 蒸散; *GEP*, 总生态系统生产力; *LAI*, 叶面积指数; *P*, 月降水量; *PET*, 潜在蒸散; *REC*, 生态系统呼吸消耗量; *Q*, 径流量; Δs , 土壤水分变化量, 其多年平均值为0。

Fig. 1 Framework of WASSI-C model. *ET*, evapotranspiration; *GEP*, gross ecosystem productivity; *LAI*, leaf area index; *P*, monthly precipitation; *PET*, potential evapotranspiration; *REC*, ecosystem respiration consumption; *Q*, runoff; Δs , variation of soil moisture, the average is zero for many years.

水文响应单元(hydrological response unit, HRU)为基本单位进行计算, 可对包括径流(*RUNOFF*)、*GEP*、生态系统呼吸消耗量(*REC*)和*ET*等在内的水、碳通量进行模拟。其中, 水、碳耦合模型是基于全球通量网络(FLUXNET)测定的水、碳通量, 利用统计分析方法构建的水、碳耦合的经验模型; 水文模型萨

克拉门托土壤湿度计算模型是20世纪70年代初由美国加利福尼亚州萨克拉门托河预报中心研制的一个确定性、概念性的集总参数模型, 以土壤水分的贮存、渗透、运移和蒸散特性为基础, 用一系列具有一定物理概念的数学表达式描述径流形成的各个过程, 模型中的状态变量代表水文循环中一个相对独立的特性, 模型参数具有明确的物理意义, 可以根据流域特征、降雨量和流量资料推求。

WASSI-C模型的核心是蒸散模型和碳循环模型。其中, 蒸散经验模型基于涡度相关法和树干液流法实测的蒸散数据、降水数据和MODIS的叶面积指数数据, 利用SAS 9.2的回归分析程序构建; 碳循环经验模型则基于全球通量网络(FLUXNET)中的通量数据(*GEP*, *ET*, *REC*), 利用线性回归模型进行关系构建。

2.1.1 计算蒸散的经验公式

计算蒸散的经验公式是:

$$ET = a \times PET + b \times LAI + c \times PET \times P \quad (1)$$

其中, *LAI*是从站点测量或者是陆地MODIS产品得到的月平均叶面积指数; *a*、*b*、*c*为经验参数; *PET*是通过Hamon (1963)模型利用大气温度和最大日照时数计算的潜在蒸散, 由于这种*PET*计算方法避免了复杂的参数化过程, 从而提高了模型的可靠性

(Sun *et al.*, 2011b)。

2.1.2 碳循环模型

*GEP*与*ET*的关系是基于全球通量网络中的数据构建的,强制使二者拟合关系曲线通过坐标原点,从而使*GEP*与*ET*回归模型的斜率代表基于*GEP*的水利用效率,以此有效地评价区域水、碳资源平衡的关系。

$$GEP = a \times ET \quad (2)$$

$$REC = m + n \times GEP \quad (3)$$

其中,*GEP*为总生态系统生产力,*ET*为生态系统的实际蒸散,*REC*为生态系统的呼吸消耗量,*a*、*m*、*n*为基于通量站数据推导出的经验参数,不同植被类型的参数值详见表2。

2.1.3 萨克拉门托土壤湿度计算模型

萨克拉门托土壤湿度计算模型(Sacramento soil moisture accounting model)是美国国家天气局萨克拉门托预报中心于20世纪70年代初期在第IV斯坦福模型基础上改进和开发的一个集总参数的概念性降雨径流模型,已在美国的水文预报中广为应用,是水文模型中较为成熟的一种模型。

萨克拉门托土壤湿度计算模型根据土壤垂向分布的不均匀性,分为上下两层计算土壤水分动态,其中主要的水文过程有:蒸散、地表径流、壤中流和地下径流。其中蒸散的水分来自于上层土壤和下层土壤的束缚水。模型中地表径流直接进入河网;壤中流和地下径流按线性水库调蓄后进入河

网;各种水源的总和扣除时段内的水面蒸发,即得河网总入流,河网总入流经河网调蓄后形成出口断面流量过程。该模型由于在基本单元的划分过程中考虑了自然地形对水文过程的影响,成为具有较好模拟效果的集总式水文模型。

2.2 研究区流域的划分方案

本研究利用更佳的综合点源与非点源污染评价科学系统BASINS (better assessment science integrating point and non-point sources) 4.0集成的地理信息系统(geographic information system, GIS)水文单元划分模块,基于90 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,给定不同水文响应单元(hydrologic response unit, HRU)划分的面积阈值AREA (km²),对杂古脑上游流域进行水文响应单元划分。本文基于不同的面积阈值,设计出13种流域划分方案(表3)。

2.3 模型的评价方法

模型模拟的准确性可以通过水、碳通量的模拟值与观测值的比较评价,还可进一步利用相关统计参数评价模型的模拟效果。本研究主要利用决定系数(*R*²)和Nash-Sutcliffe效率系数(*NS*) (McCuen *et al.*, 2006)对模型进行评价。

*R*²和*NS*的计算公式如下:

$$R^2 = \left(\frac{n(\sum(O \times S)) - (\sum O)(\sum S)}{\sqrt{[n\sum O^2 - (\sum O)^2][n\sum S^2 - (\sum S)^2]}} \right)^2 \quad (4)$$

表2 WASSI-C模型主要植被类型的碳通量回归模型的参数

Table 2 Parameters of main vegetation types for carbon flux regression model in WASSI-C model

植被类型 Vegetation type	<i>GEP</i> = <i>a</i> × <i>ET</i>		<i>REC</i> = <i>m</i> + <i>n</i> × <i>GEP</i>		
	<i>a</i> ± <i>SD</i>	<i>R</i> ²	<i>m</i> ± <i>SD</i>	<i>n</i> ± <i>SD</i>	<i>R</i> ²
农田 Cropland	3.13 ± 1.69	0.78	40.6 ± 3.84	0.43 ± 0.02	0.77
郁闭灌丛 Closed shrubland	1.37 ± 0.62	0.77	11.4 ± 15.62	0.69 ± 0.15	0.74
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	3.20 ± 1.26	0.93	30.8 ± 2.93	0.45 ± 0.03	0.83
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	2.59 ± 0.54	0.92	19.6 ± 8.74	0.61 ± 0.06	0.63
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	2.46 ± 0.96	0.89	9.9 ± 2.24	0.68 ± 0.03	0.80
草地 Grassland	2.12 ± 1.66	0.84	18.9 ± 2.31	0.64 ± 0.02	0.82
混交林 Mixed forest	2.74 ± 1.05	0.89	24.4 ± 4.24	0.62 ± 0.05	0.88
稀疏灌丛 Open shrubland	1.33 ± 0.47	0.85	9.7 ± 3.03	0.56 ± 0.08	0.81
高山草甸 Alpine meadow	1.26 ± 0.77	0.80	25.2 ± 3.23	0.53 ± 0.07	0.65
湿地 Wetland	1.66 ± 1.33	0.78	7.8 ± 3.04	0.56 ± 0.03	0.80

ET, 蒸散; *GEP*, 总生态系统生产力; *R*², 决定系数; *REC*, 生态系统呼吸消耗量; *SD*, 标准偏差。*a*、*m*、*n*为回归方程的系数。

ET, evapotranspiration; *GEP*, gross ecosystem productivity; *R*², determination coefficient; *REC*, ecosystem respiration consumption; *SD*, standard deviation. *a*, *m* and *n* are the coefficients of regression equation.

表3 不同面积阈值对应的水文响应单元数及其相应的所有水文响应单元的平均面积

Table 3 Number of hydrologic response units (HRUs) and associated mean area of all HRUs corresponding to different area threshold

面积阈值 Area threshold (km ²)	10	12.5	15	25	35	40	50	85	100	160	200	300	650
水文响应单元数 Number of hydrologic response units (HRUs)	105	78	64	45	35	27	24	21	15	11	7	3	1
水文响应单元的平均面积 Mean area of all HRUs (km ²)	22.9	30.8	37.5	53.4	68.6	88.9	104.5	126.4	160.2	218.4	343.2	800.9	2 403

式中, O 和 S 分别是时间步长上的观测值和模拟值, n 是观测值和模拟值的数目。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

效率系数是一个广泛应用的统计变量, 用于评价模型的效果。 NS 是均方差与观测值变异的比减去1, 其值从负无穷到1。若模拟与观测之间的方差与观测方差一样大, 则 $NS = 0$; 若模拟与观测之间的方差超过观测方差, 则 $NS < 0$; 若模拟与观测之间的方差趋近于0, 则模型很好地模拟了观测值的变化, NS 趋近于1。

本研究中采用 R^2 和 NS 这两个参数对水碳通量的模拟效果进行评价, 以期获得可靠的流域划分方案。

2.4 模型的参数敏感性及其最优值

本研究中选取11个参数和变量进行敏感性分析, 探讨这些参数在模型径流模拟中的贡献。敏感性的评价通过参数变化±10%时模型模拟指标的变化大小进行评价, 结果发现: 这11个参数中影响土壤下层径流的参数具有较高的敏感性(表4)。在敏感性分析的基础上, 基于现有的输入参数对模型的这11个参数进行初步的率定, 得到研究区相关参数的最优值, 见表4。

3 结果和讨论

3.1 不同流域划分方案的验证结果对比

基于初步率定的参数, 分别模拟不同面积阈值的流域划分方案、杂古脑上游流域2000年每个月的 GEP 、 ET 和径流($RUNOFF$, mm·month⁻¹)。然后利用表1中的验证数据集, 分别计算这3个变量不同流域划分方案的 R^2 和 NS , 从而对不同流域划分方案的模拟效果进行评价。

表4 WASSI-C模型中主要参数的敏感性和最优值

Table 4 Sensitivity of main parameters in the WASSI-C model and their optimal value

敏感性排序 Sensibility rank	参数 Parameter	理论区间 Theory interval	单位 Unit	最优值 Optimal value
1	<i>REXP</i>	1–5	–	2.4
2	<i>UZFWM</i>	5–150	mm	22
3	<i>LZFSM</i>	5–400	mm	36
4	<i>LZSK</i>	0.01–0.35	–	0.060
5	<i>LZPK</i>	0.001–0.05	–	0.016
6	<i>LZTWM</i>	10–500	mm	162
7	<i>UZK</i>	0.10–0.75	–	0.15
8	<i>ZPERC</i>	5–350	–	80
9	<i>UZTWM</i>	10–300	mm	30
10	<i>LZFPM</i>	10–1000	mm	65
11	<i>PFREE</i>	0.0–0.8	–	0.20

LZFPM, 下层主要自由水容量; *LZFSM*, 下层次要自由水容量; *LZPK*, 下层主要基流出流速率; *LZSK*, 下层次要基流出流速率; *LZTWM*, 下层张力水容量; *PFREE*, 渗透到下层自由水的比例; *REXP*, 渗流曲线形状参数; *UZFWM*, 上层自由水容量; *UZK*, 上层交互流出速率; *UZTWM*, 上层张力水容量; *ZPERC*, 土壤上下层间的最大下渗率。

LZFPM, lower layer primary free water storage; *LZFSM*, lower layer supplemental free water storage capacity; *LZPK*, lower layer primary baseflow discharge rate; *LZSK*, lower layer interflow discharge rate; *LZTWM*, lower layer tension water storage capacity; *PFREE*, percolation fraction going to lower layer free water storage; *REXP*, percolation curve shape parameter; *UZFWM*, upper layer free water storage capacity; *UZK*, upper layer interflow discharge rate; *UZTWM*, Upper layer tension water storage capacity; *ZPERC*, ratio of max to min percolation rates between upper and lower soil layers.

由图2可见, 不同流域划分方案, 3个水、碳变量(GEP 、 ET 和 $RUNOFF$)的模拟值与其验证值的 R^2 存在一致的变化特征, 在流域划分面积阈值较大时, 对尺度较为敏感, 拟合度较差; 而中小尺度敏感性较小, 拟合度较好。 R^2 表现出随着流域划分面积阈值减小先增加, 然后稳定再减小的变化趋势。并且 R^2 的变化曲线存在明显分界点, 曲线可以分为两个不同变化特征区域——尺度敏感区域和稳定区域, 其中, 面积阈值等于85 km²为曲线的分界点。另外, 3个变量对流域响应单元空间尺度的变化表现出不

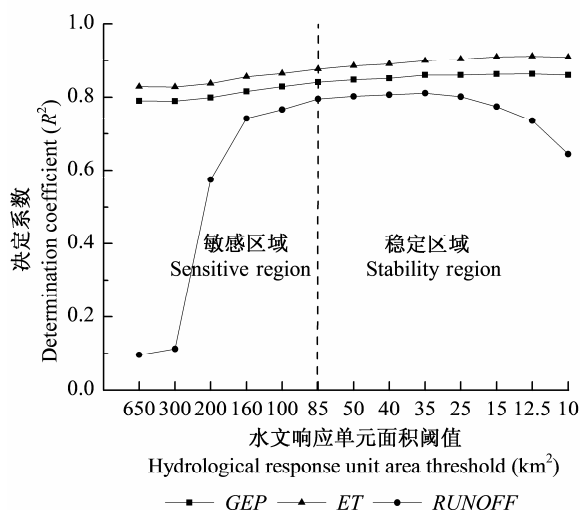


图2 不同流域划分方案的总生态系统生产力(GEP)、蒸散(ET)和流域总径流(RUNOFF)与其验证数据的决定系数。
Fig. 2 Determination coefficients of gross ecosystem productivities (GEP), evapotranspiration (ET) and total runoff of the watershed (RUNOFF) between simulated results and verification data under different watershed classification schemes.

同的敏感性,其中流域径流的响应幅度最大, R^2 的最大值为0.81, 最小值为0.10; ET和GEP的响应幅度相似,其中ET的 R^2 最大值和最小值分别为0.91和0.83; GEP的 R^2 最大值和最小值分别为0.81和0.76。从3个变量的 R^2 曲线可知,三者模拟效果也存在差异,模拟效果从好到差分别为 $ET > GEP > RUNOFF$ 。

图3描述了模型模拟的3个变量在不同流域划分方案验证的NS指标,3个变量的NS与 R^2 存在相似的变化特征,变量之间也存在一致的变化趋势:面积阈值较大时,NS较小,变化显著;中小尺度的模拟效果较好,差异不大。NS变化曲线也以85 km²为分界点,将整个曲线分为敏感区和稳定区。3个变量的效率系数指标从好到差的顺序为 $GEP > ET > RUNOFF$,敏感程度的顺序为 $RUNOFF > ET > GEP$ 。

随着流域划分面积阈值的减小,流域数逐渐增加,子流域面积逐渐减小,通过模型的计算原理发现:随着子流域数增加,模型对流域内不同植被类型和土壤类型的气候条件的考虑趋于精细,因此必将提高模型的模拟效果(如图2、3左侧的上升趋势);但随着流域数增大到一定程度,模型响应单元中包含的植被类型和土壤类型趋于稳定,从而出现模拟效果相对不变的阶段(图2、3中部的稳定期);当流

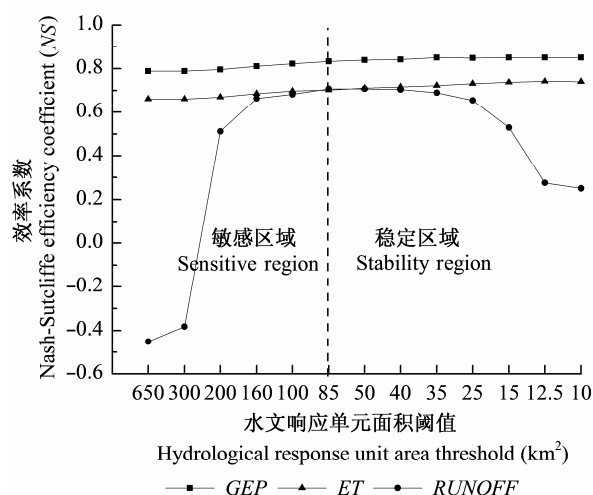


图3 不同流域划分方案模拟的总生态系统生产力(GEP)、蒸散(ET)和流域总径流(RUNOFF)与验证数据的效率系数(NS)的值。
Fig. 3 The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NS) of gross ecosystem productivity (GEP), evapotranspiration (ET) and total runoff of the watershed (RUNOFF) between simulated results and verification data under different watershed classification schemes.

域单元数增大到一定程度后,由于子流域汇流过程以及模型误差的积累造成径流模拟效果的降低(图2、3右侧)。萨克拉门托模型作为模型的水文模块,充分考虑了土壤中的水文过程,主导了模型对水文过程的模拟。从模拟结果来看,该模型对水文过程的模拟具有很强的尺度依赖性。随着尺度的精细,径流的模拟结果变差,一定程度上反映需要进一步完善模型的汇流过程。张雪松等(2004)和郝芳华等(2004)分别在卢氏流域和Lake Fork流域的类似研究中发现,流域径流随着流域数的增加出现先快速增加后趋于稳定的变化趋势; Wolock (1995)在面积为111.5 km²的Sleepers河流域对基于地形为基础的水文模型(topography based hydrological model, TOP-MODEL)模拟水文响应单元的尺度进行研究也发现:水文响应单元的面积从0.05 km²变化到5 km²过程中,模拟的流域径流迅速增加,之后随着面积增大趋于相对恒定的状态。Wood等(1988)对山坡的研究发现,随着采样单元数的增加,同一水文过程响应的差异逐渐减小,达到某一尺度时,流域对同一水文过程的响应差异达到最小值,这一尺度就是模型的最适模拟尺度。

另外,从评价指标的变化曲线发现,空间响应

尺度变化对模型模拟的3个变量的影响程度不同,其中RUNOFF对尺度变化最为敏感,ET和GEP对尺度变化的敏感性较低。这主要是由尺度变化使子流域汇流过程明显变化所致。而ET和GEP基于植被类型计算,流域响应单元内植被类型的变化随尺度变化相对缓和,从而出现较弱的敏感性。同时,由于模型中的碳通量模型基于FLUXNET中通量数据推导的经验公式,从机理上也表现出对尺度的不敏感性。同时,3个变量的模拟效果也存在差异,其中ET的 R^2 最大,而NS相对较低,这表明模型模拟的ET与验证数据存在较一致的时间变化趋势,然而数值上仍与Zhang等(2010)的ET存在较大的差异(如图6中点的离散分布)。GEP模拟验证的 R^2 和NS相对都较高,说明模拟结果与MODIS的GEP比较一致,模型对GEP的模拟效果较好。RUNOFF模拟验证的 R^2 和NS相对低一些,但是均已符合模拟标准。

综合上述两个验证评价指标发现,尽管GEP和ET的尺度敏感性较弱,然而径流模拟确具有较强的尺度敏感性,因此可以认为响应单元的空间尺度对WASSI-C模型的模拟效果具有较大的影响。只有找出最佳的模型响应单元空间尺度,模型才能得到最好的模拟效果。结果显示:流域划分的面积阈值小于85 km²时模型的模拟效果较好,并且随着尺度的减小,模拟效果略有增加,然而,基于3个模拟变量的两个评价指标和模型模拟工作量的考虑,我们将模型响应单元的划分面积阈值确定为85 km²。

3.2 流域划分面积阈值为85 km²时模型的验证结果

将85 km²作为模型流域划分的面积阈值,利用BASINS 4.0对杂古脑上游流域进行子流域划分,可以得到21个水文响应单元,此时的水文响应单元分布如图4所示。

基于这一流域划分方案,分别利用MODIS的月GEP、ET产品和Zhang等(2010)的ET全球数据集和杂古脑水文站的径流数据,对模型的模拟结果进行验证。从模拟数据和验证数据之间的散点图(图5–8)可见,GEP、ET的模拟值与验证值都存在较好的一致性,RUNOFF的模拟效果相对差一些。此时,各水文响应单元(HRU)GEP和RUNOFF的模拟值与验证值的 R^2 和NS分别为0.90、0.77和0.90、0.60;ET的模拟值与Zhang等(2010)和MODIS的ET值之间的 R^2 和NS分别为0.80、0.60和0.70、-0.63。从GEP的验证散点图(图5)可以发现,在杂古脑上游流域模型

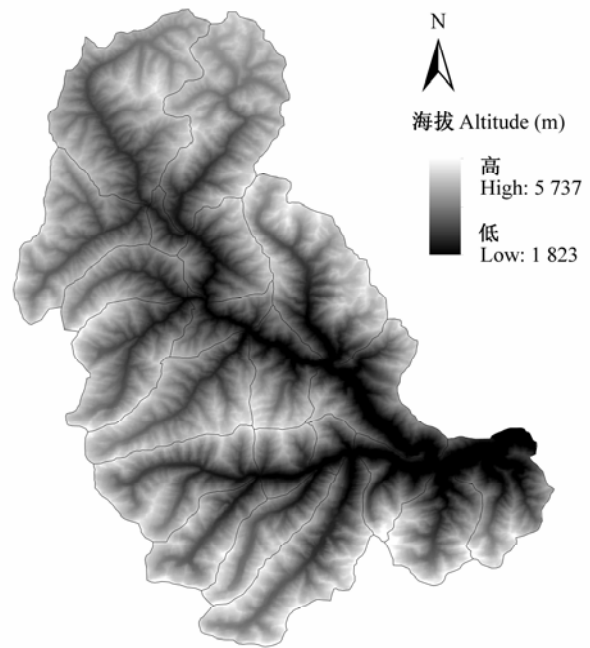


图4 杂古脑上游流域水文响应单元分布。
Fig. 4 Distribution of hydrologic response units (HRUs) in the upper Zagunao River watershed.

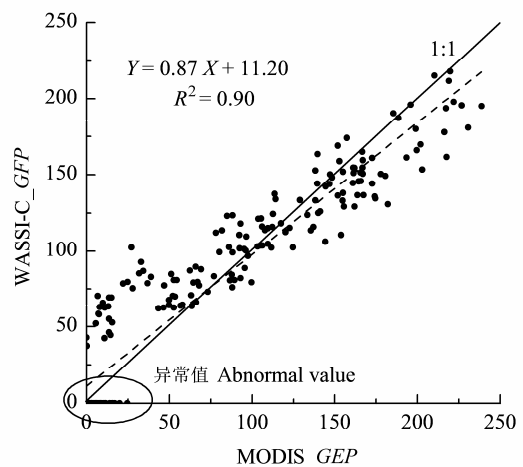


图5 各水文响应单元月总生态系统生产力(GEP, g C·m⁻²·month⁻¹)的WASSI-C模拟结果与MODIS值的对比。
Fig. 5 A comparison between mean monthly gross ecosystem productivity (GEP) (g C·m⁻²·month⁻¹) simulated by WASSI-C and MODIS for each hydrology response unit.

模拟的GEP值大于MODIS的GEP值,这与Sun等(2011b)对美国2 103个水文响应单元模拟结果的验证结论一致,MODIS低估了生态系统的GEP。ET的验证结果(图6、图7)显示,WASSI-C模拟的ET值与Zhang等(2010)的ET具有更好的一致性,拟合线性方程的系数为1.02。然而ET模拟值与MODIS数据之

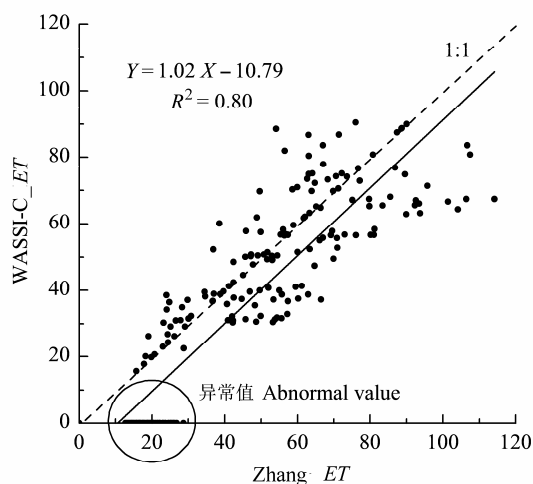


图6 各水文响应单元各月蒸散(ET , $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$)的WASSI-C模拟值与Zhang模拟值的对比。

Fig. 6 A comparison between mean monthly evapotranspiration (ET , $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$) simulated by WASSI-C and Zhang for each hydrology response unit.

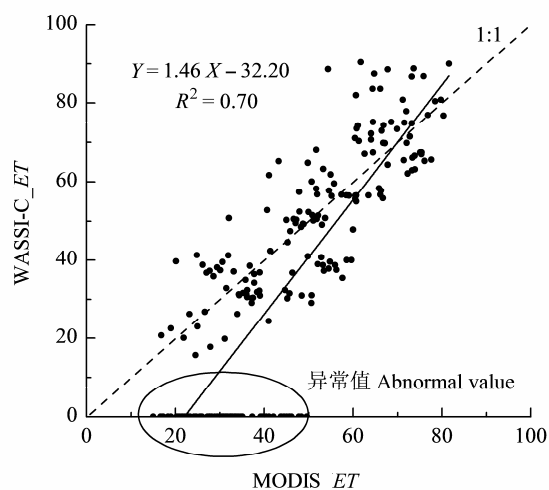


图7 各水文响应单元各月蒸散(ET , $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$)的WASSI-C模拟值与MODIS模拟值的对比。

Fig. 7 A comparison between mean monthly evapotranspiration (ET , $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$) simulated by WASSI-C and MODIS for each hydrology response unit.

间确实存在较大的不一致性,尤其在模拟值上存在较大的差异。从3个 ET 的数据集可知,MODIS在非生长季对 ET 的估测值偏高。从流域径流的验证结果(图8)可以发现,径流的模拟值和观测值还存在较大的时空差异性,径流模拟存在低估问题。这主要是由于高海拔地区降水数据存在较大的误差,从而影响了模拟结果;另外,模型对于冬季融雪与积雪的简化考虑也可能是其原因之一。

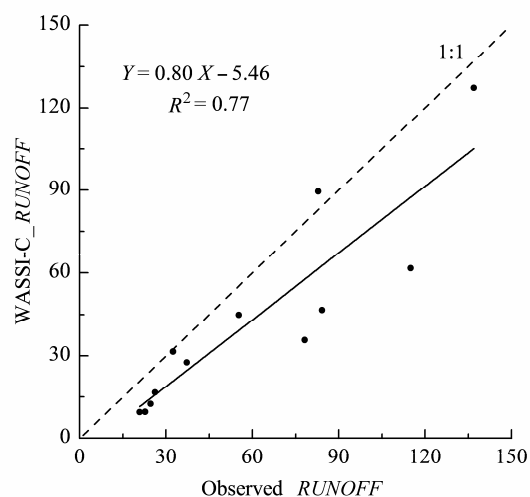


图8 流域月总径流($RUNOFF$, $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$)的WASSI-C模拟值与观测值的对比。

Fig. 8 A comparison between total monthly runoff ($RUNOFF$, $\text{mm}\cdot\text{month}^{-1}$) simulated by WASSI-C and observed.

另外,验证散点图中(图5-7中圈内的点)出现一些落在横坐标轴上的点,说明此时模拟值为0,而验证值并不为0。这是因为模型在计算过程中基于温度的考虑对模拟运算进行了简化处理,即:模拟过程中对温度小于 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的月份进行简化处理,默认不存在蒸散和表面径流。然而研究区域冬季的空气温度均在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,并且存在大量常绿针叶林,因此在这期间也有一定的蒸散和生物量的积累,另外,此时的降水方式以积雪为主,并且不存在融雪过程,因此几乎没有表面径流,但是存在地下的基流过程。从而,这种简化对 ET 和 GEP 产生了一定的影响,而对 $RUNOFF$ 的影响相对较小。

4 结论

本文通过构建不同面积阈值的流域划分方案,探讨了生态水文模型WASSI-C模型响应单元对空间尺度的依赖性。研究发现:模型响应单元空间尺度的变化对模型的模拟效果存在显著的影响,基于模型验证的散点图和两个评价指标值可以确定,WASSI-C模型的响应单元的划分面积阈值为 85 km^2 。此时的模拟水、碳循环变量验证的拟合相关性系数和效率系数均达到理想的水平。

从本研究结果可知,WASSI-C模型具有高度的尺度依赖性,因此对其模拟尺度的研究具有重要的应用价值。然而,模拟尺度的确定是一个复杂而耗

时的过程, 需要进行大量的流域对比分析。本研究虽然不能充分地确定模型的固有尺度, 但是在一定程度上解释了模型的空间响应尺度的变化特征, 可为模型在类似气候条件和植被类型的流域以及其他流域的应用提供参考依据。另外, 85 km²为ARCGIS流域划分过程中的一个约定值, 在实际应用中应该代表接近85 km²的一个阈值区间。

从模拟的3个变量(*GEP*、*ET*、*RUNOFF*)的验证结果可以发现, 模型对*GEP*的模拟效果最好, 模拟值与MODIS验证数据之间存在较好的一致性; 然而, *ET*的模拟还存在较大的不确定性, 表现在模拟结果与Zhang等(2010)的*ET*数据集存在较好的一致性, 而与MODIS的对比差异较大, 因此模型中*ET*的模拟是未来模型应用和改进的关键, 应该加强*ET*的验证和改进工作, 尤其是对冬季*ET*的计算。尽管模拟的*RUNOFF*与实测*RUNOFF*存在较高的 R^2 , 但是存在普遍低估的现象, 考虑到模型本身和输入数据的限制, 未来应该加强输入数据质量的控制和水文模型的率定工作。

基金项目 国家科技支撑项目(2012BAD22B01)、中国林业科学研究院院所基金海外人才专项(CAFYBB2008007)和林业公益性行业科研专项(200804001)。

参考文献

Cao MK, Woodward FI (1998). Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 4, 185–198.

Foley JA, Prentice IC, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A (1996). An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 603–628.

Hao FH, Zhang XS, Cheng HG (2004). Discussion on reasonable subdivision level of watershed for distributed hydrologic model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 75–78. (in Chinese with English abstract) [郝芳华, 张雪松, 程红光 (2004). 分布式水文模型亚流域合理划分水平刍议. *水土保持学报*, 17, 75–78.]

Hamon WR (1963). Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 63, 52–62.

Jiang XY (1963). The primary study on habitat type of alpine forest in Miyalu and Markang, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 8, 321–335.

Liu J, Chen JM, Cihlar J, Park WM (1997). A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 62, 158–175.

Liu N, Sun PS, Liu SR (2012). Research advances in simulating land water-carbon coupling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 3187–3196. (in Chinese with English abstract) [刘宁, 孙鹏森, 刘世荣 (2012). 陆地水碳耦合模拟研究进展. *应用生态学报*, 23, 3187–3196.]

McCuen RH, Knight Z, Cutter AG (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597–602.

Penman HL (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193, 120–145.

Shi XZ, Yu DS, Xu SX, Warner ED, Wang HJ, Sun WX, Zhao YC, Gong ZT (2010). Cross-reference for relating genetic soil classification of China with WRB at different scales. *Geothermal*, 155, 344–350.

Sun G, Alstad K, Chen JQ, Chen SP, Ford CR, Lin GH, Liu CF, Lu N, McNulty SG, Miao HX, Noormets A, Vose JM, Wilske B, Zeppel M, Zhang Y, Zhang ZQ (2011a). A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology*, 4, 245–255.

Sun G, Caldwell P, Noormets A, McNulty SG, Cohen E, Myers JM, Domec JC, Treasure E, Mu QZ, Xiao JF, John R, Chen JQ (2011b). Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model. *Journal of Geophysical Research*, 116, G00J05.

Tague CL, Band LE (2004). RHESSys: regional hydroecologic simulation system—an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. *Earth Interactions*, 8, 1–42.

Tian HQ, Liu ML, Zhang C, Ren W, Xu XF, Chen GS, Lü CQ, Tao B (2010). The dynamic land ecosystem model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change. *Acta Geographica Sinica*, 65, 1027–1047. (in Chinese with English abstract) [田汉勤, 刘明亮, 张弛, 任巍, 徐小锋, 陈广生, 吕超群, 陶波 (2010). 全球变化与陆地系统综合集成模拟——新一代陆地生态系统动态模型 (DLEM). *地理学报*, 65, 1027–1047.]

Wang GX, Qian J, Cheng GD (2001). Current situation and prospect of the ecological hydrology. *Advance in Earth Sciences*, 16, 314–323. (in Chinese with English abstract) [王根绪, 钱鞠, 程国栋 (2001). 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 16, 314–323.]

Wang LH, Yan DH, Long AH, Yang SY (2009). Advances in basin ecohydrological process modelling. *Advance in Earth Sciences*, 24, 891–898. (in Chinese with English

- abstract) [王凌河, 严登华, 龙爱华, 杨舒媛 (2009). 流域生态水文过程模拟研究进展. *地球科学进展*, 24, 891–898.]
- Wang SP, Zhang ZQ, Sun G, McNulty S, Zhang ML, Li JL (2008). Effect of grid size and time step of MIKESHE on hydrological processes modeling at watershed scale. *Hydrology*, 28, 1–7. (in Chinese with English abstract) [王盛萍, 张志强, 孙阁, McNulty S, 张满良, 李建牢 (2008). 基于物理过程分布式流域水文模型尺度依赖性. *水文*, 28, 1–7.]
- Wolock DM (1995). Effects of subbasin size on topographic characteristics and simulated flow paths in Sleepers River watershed, Vermont. *Water Resource Research*, 31, 1989–1997.
- Wood EF, Sivapalan M, Beven K, Band L (1998). Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102, 29–47.
- Yu Z, Sun PS, Liu SR (2011). Phenological change of main vegetation types along a North-South Transect of Eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 316–329. (in Chinese with English abstract) [余振, 孙鹏森, 刘世荣 (2011). 中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化. *植物生态学报*, 35, 316–329.]
- Zhang K, Kimball JS, Nemani RR, Running SW (2010). A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resource Research*, 46, W9522.
- Zhang XS, Hao FH, Cheng HG, Yang ZF (2004). Influence of subdivision of watershed on distributed hydrological model. *Shuili Xuebao*, 35, 119–123. (in Chinese with English abstract) [张雪松, 郝芳华, 程红光, 杨志峰 (2004). 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响. *水利学报*, 35, 119–123.]

责任编辑: 邹伯才 责任编辑: 王 葳