

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.007

# 基于高精度遥感亮温的典型流域河道径流模拟分析

许继军<sup>1,2</sup>, 屈星<sup>1,2</sup>, 曾子悦<sup>1,2</sup>, 袁喆<sup>1,2</sup>, 霍军军<sup>1,2</sup>, 王永强<sup>1,2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 随着对地卫星遥感技术的发展, 微波遥感监测为径流模拟提供了新途径。目前, 基于被动微波遥感亮度温度的河道径流模拟方法亟待深入探索。本文基于 M/C 信号法, 利用新一代高精度被动微波亮温数据集在中国典型流域进行河道径流模拟, 探讨该方法的适用性, 分析断面河宽、平均流量、控制面积、植被覆盖度、高程、土地覆盖/利用类型、气候类型等地形地貌和水文气象因素对模拟效果的影响。结果表明: 在中国七大流域 61 个典型站点中, 决定系数  $R^2 \geq 0.5$  的站点占比超过 59.0%, 41.0% 的站点纳什效率系数  $E_{NS} \geq 0.5$ ; 位于西南诸河流域的站点模拟效果最佳, 尤其在青藏高原地区; 高程、平均流量、气候类型以及断面河宽是影响模拟效果的主要因素; 站点位于高原山地气候下的小型河流一般模拟效果更佳, 本文方法相对更适用。研究成果可为河道径流模拟提供研究思路, 为微波遥感的水文应用提供切实指导。

**关键词:** 径流模拟; 对地观测卫星遥感; 被动微波; 亮度温度; M/C 信号法

**中图分类号:** TV121      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2021)06-0877-13

径流是水循环的关键要素之一, 径流精准模拟是开展流域水文模拟、水资源规划和管理、水旱灾害防治等的重要基础<sup>[1]</sup>。目前, 受气候变化和人类活动等因素影响, 径流序列波动加大, 模拟难度增大<sup>[2-3]</sup>。基于物理过程的流域水文模型是河道径流模拟最常用的技术手段, 近年来得到了快速发展<sup>[4-7]</sup>, 但水文模型很大程度依赖于长序列实测流量资料, 偏远山区、地形复杂等地区的水文数据缺测对径流模拟构成了严峻考验<sup>[8-10]</sup>。此外, 在针对无(缺)资料区域的径流模拟研究中, 水文模型通常需要采用降水等气象数据和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地覆盖/利用类型、土壤质地等各类空间数据, 输入数据的精度也会对水文模型模拟结果产生较大影响<sup>[11]</sup>。尤其是在中国青藏高原等区域, 冰川积雪、冻土的存在和气象数据的缺测使得水文模型的应用受到限制<sup>[12-14]</sup>。因此, 当前亟需探索河道径流模拟新途径, 提升径流模拟水平。

随着对地观测卫星遥感技术的发展, 遥感空间信息的水文应用是水循环研究的前沿热点<sup>[15-17]</sup>。针对河道径流模拟, 相比于光学遥感, 微波遥感监测基本不受气象条件干扰, 能为地表径流变化等提供持续观测<sup>[18]</sup>。搭载微波传感器的卫星组网后可获取逐日的全球覆盖数据, 在径流模拟中可利用最佳频率将云层、非水体地物等干扰降到最低, 优势明显, 可为无(缺)资料地区径流模拟提供新途径<sup>[19-20]</sup>。欧洲委员会(European Commission)等国际组织在 2002 年就已开展采用卫星遥感技术进行水文灾害预警管理的研究, 基于被动微波遥感亮度温度(Brightness Temperature, 亮温)的河道径流模拟是核心方法之一<sup>[18]</sup>。亮温( $T_b$ )是星载微波辐射计测量的基本参数, 表征地物与卫星间电磁辐射通量的大小<sup>[21-22]</sup>。通过微波亮温反映地物的辐射特性, 例如水体的微波亮温往往低于其他地物, 可采用阈值分类等方法进行水体识别和径流监测模拟<sup>[23]</sup>。此外, 亮温观测数据易于获取, 美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美

收稿日期: 2021-03-01; 网络出版日期: 2021-09-06

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20210906.1444.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52009007); 湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB132)

作者简介: 许继军(1971—), 男, 湖北武汉人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文学水资源方面研究。

E-mail: xujj07@163.com

通信作者: 曾子悦, E-mail: zengzy@mail.crsri.cn

国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)和中国国家青藏高原科学数据中心等机构都提供免费下载服务,数据一般为实时或准实时公布,时段可前溯至1979年,足以达到用于径流模拟的要求。同时,被动微波遥感用于河道径流模拟的理论方法发展也相对成熟,其中最具代表性的是Brakenridge等<sup>[23-25]</sup>提出的亮温估测河道径流的M/C信号法,该方法在全球多个流域得到应用,可有效模拟河流控制断面流量。例如, van Dijk等<sup>[26]</sup>采用M/C信号法模拟了全球442条河流出水口月平均流量,结果表明热带地区的模拟效果优于干旱地区; Revilla-Romero等<sup>[27]</sup>在欧洲、亚洲、非洲和南美洲等典型流域应用M/C信号法,发现气候类型、土地覆盖、控制面积等是影响径流模拟效果的主要因素; de Groeve<sup>[28]</sup>在考虑局部地形对流量的影响基础上结合M/C信号法提高了径流模拟效果,并在澳大利亚多个流域成功应用。当前,被动微波遥感亮温数据的水文应用在国外尚待深入探索,国内针对M/C信号法等典型微波亮温河道径流模拟方法的研究也仅处于起步阶段。

本文选取中国七大流域61个代表性水文站点,采用目前国际上最新的高精度被动微波亮温数据集利用M/C信号法对河道径流进行模拟,分析地形地貌和水文气象因素对模拟效果的影响,以期为中国河道径流模拟提供新思路。

## 1 研究区域和数据

### 1.1 研究区域

中国地域辽阔,气候复杂多样,地形起伏多变,流域水系众多。本文在中国七大流域片区选取了61个代表性水文站,涉及50条大、中、小型河流(图1)。其中,长江流域和黄河中下游、珠江流域、淮河流域主要以丘陵和平原为主,水系发达,水文测站布置密集;西南诸河流域、三江源区域属于高原地区,是众多河流的发源地,水资源丰富,但地形及气候条件恶劣,水文站网稀疏,水文水资源工作开展困难<sup>[29-30]</sup>;新疆内陆河和海河流域属于温带区域,年降水少,径流量小。

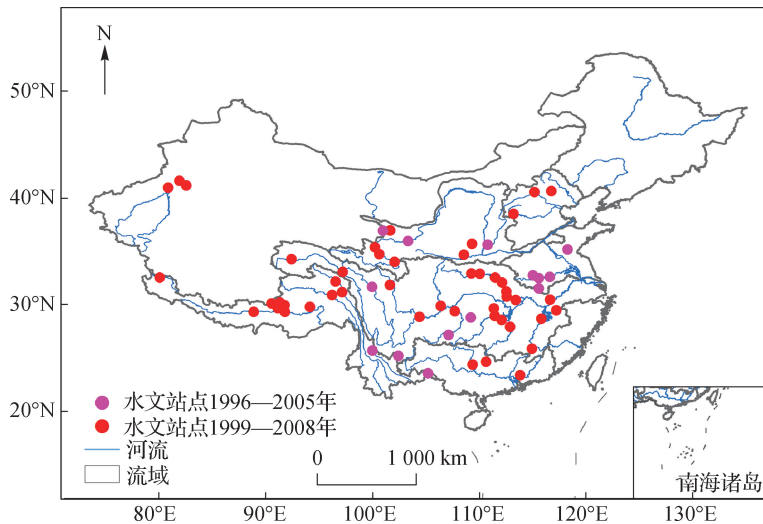


图1 代表性站点分布

Fig. 1 Distribution map of the hydrological stations

### 1.2 数据

本文主要采用水文和遥感空间2类数据:

(1) 水文数据。选取典型水文站点主要考虑站点位置、河流级别等因素,并排除水库、河堤等人为影响。61个典型水文站点中,47个站点日径流序列时段为1999—2008年,14个站点为1996—2005年,站点

基本信息见表1。

表1 水文站点数目统计汇总  
Table 1 Summary of the hydrological station statistics

个

流域	气候带			土地覆盖/利用类型						地形分阶			数据时段	
	亚热带	温带	高原山地	草地	草树混合	农作物	城镇	林地	裸地	第一阶梯	第二阶梯	第三阶梯	1996—2005年	1999—2008年
长江	21		4	4	4	5	6	3	3	4	8	13	4	21
黄河		4	5	5		2	2			6	3		3	6
珠江	3					2	1					3		3
淮河	1	4				5						5	5	
西南诸河	2		11	6	1	2	1	2	1	11	2		2	11
海河		3				3						3		3
内陆河		3							3		3			3
总计	27	14	20	15	5	19	10	5	7	21	16	24	14	47

(2) 遥感数据。采用 MEaSUREs (Making Earth System Data Records for Use in Research for Earth Science) 计划支持下的高精度被动微波亮温数据集 (Calibrated Passive Microwave Daily EASE-Grid 2.0 Brightness Temperature Earth System Data Record, CETB)<sup>[31]</sup>。该数据集由 NSIDC 于 2017 年发布, 涵盖了 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer)、SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)、SSMIS (Special Sensor Microwave Image/Sounder) 以及 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System) 等多个传感器的观测数据, 采用极地坐标 EASE-Grid 2.0 进行统一投影, 通过美国杨百翰大学 (Brigham Young University) 开发的成像重建算法将数据重采样到 25 km、12.5 km 及 3.125 km 3 种精度<sup>[32]</sup>, 并将每天升轨和降轨的 2 次观测结果分别拼接形成全球产品。该套数据集已在水体探测、积雪反演等研究中取得良好评价, 可为水文领域研究提供有力支撑<sup>[11,33-34]</sup>。Brakenridge 等<sup>[23-25]</sup> 以及 van Dijk 等<sup>[26]</sup> 已证明了在星载微波辐射计常用的频率中, 36.5 GHz 或 37 GHz 频率的微波辐射计在水平极化下极易区分接收到的水体和陆地的辐射响应, 对土壤湿度也并不敏感。因此, 本文采用该套数据中 SSM/I 传感器 37 GHz 频段水平极化的高精度亮温数据提取 M/C 信号, 数据时段为 1996—2008 年, 分辨率为 3.125 km/d。

本文采用航天飞机雷达地形测绘任务 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 90 m DEM 数据用于高程信息的提取, 并使用了全球大河宽度数据集 (Global Width Database for Large Rivers, GWD-LR) 的 250 m 河宽数据、中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 三级产品中的 500 m 土地覆盖/利用数据 (2005 年) 以及 250 m 陆地植被连续场数据 (2005 年) 等。以上数据使用前均进行了升尺度处理, 以保证与亮温数据的空间分辨率 (3.125 km) 一致。

## 2 研究方法

### 2.1 M/C 信号法

M/C 信号法认为大气水汽含量、地表温度等自然环境因素对微波亮温数据每个像元值的影响程度相同, 并基于以上假设定义 M 像元和 C 像元。

(1) M 像元。将部分或全部覆盖河道的“湿像元”作为 M 像元, 即河道流量的观测像元。该类像元内的河道水位会随着流量的增加而上涨并产生漫滩, 河岸两侧的陆地区域因此具有周期性或季节性的干湿变化, 亮温值也会产生显著变化。

(2) C 像元。将覆盖区域全部为陆地的“干像元”作为 C 像元, 即观测像元的校准像元。该类像元的位置一般依靠人工筛选在“湿像元”附近进行确定。理想状态下, 该类像元不受水体影响, 其亮温值代表剔除

水体这一因素后该区域其他所有影响因素共同作用下的亮温结果。

(3) 计算亮温值。M/C 信号法将干、湿像元的亮温值进行对比，剔除非水体变化的其他环境因素对“湿像元”亮温值的影响。根据普朗克辐射定律，物体亮温值( $T_b$ )与其物理温度( $T$ )和发射率( $\varepsilon$ )有关，即  $T_b = \varepsilon T$ 。对于水体面积比率为  $w$  的像元，其亮温值可表示为

$$T_b = (1 - w)T_{b,l} + wT_{b,w} \tag{1}$$

式中： $w$  为像元中地表水体所占的面积比率； $T_{b,w}$  为水体的亮温值； $T_{b,l}$  为陆地的亮温值。则 M 像元和 C 像元亮温值可分别表示为：

$$T_{b,m} = T_m [(1 - w)\varepsilon_{1,m} + w\varepsilon_w] \tag{2}$$

$$T_{b,c} = T_{b,l} = T_c \varepsilon_{1,c} \tag{3}$$

式中： $T_{b,m}$  为 M 像元的亮温值； $T_m$  为 M 像元的实际温度； $\varepsilon_w$  为该区域的水体发射率； $\varepsilon_{1,m}$  和  $\varepsilon_{1,c}$  分别为 M 像元和 C 像元陆地发射率； $T_{b,c}$  为 C 像元的亮温值； $T_c$  为 C 像元的实际温度。由于 M 像元和 C 像元基本位于同一区域，可假设 2 个像元的实际温度相同<sup>[24,28]</sup>，且陆地的发射率可视为均等于该区域陆地平均发射率( $\varepsilon_1$ )，即：

$$T_m = T_c \tag{4}$$

$$\varepsilon_{1,m} \approx \varepsilon_{1,c} \approx \varepsilon_1 \tag{5}$$

则比值  $T_{b,m}/T_{b,c}$  能通过关于  $w$  的函数进行表达：

$$\frac{T_{b,m}}{T_{b,c}} = \frac{T_m [(1 - w)\varepsilon_1 + w\varepsilon_w]}{T_c \varepsilon_1} \approx 1 - w + w \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_1} = f(w) \tag{6}$$

因此，比值  $T_{b,m}/T_{b,c}$  能反映 M 像元的水体变化情况，可作为河道流量变化的监测信号。由于水体的发射率往往在 0.5 左右，而陆地(以岩石矿物为例)的发射率为 0.75 ~ 0.95<sup>[35]</sup>，则比值  $T_{b,m}/T_{b,c}$  的取值范围为 0 ~ 1，且  $w$  越大， $T_{b,m}/T_{b,c}$  的取值越小，M 像元所辖河道的径流量相应越大。

(4) 2 类像元选取原则。

M 像元：本文在各典型水文站附近选取某一位置最为合适的湿像元作为 M 像元，尽量避免覆盖弯曲河道以及河道两侧的池塘、水田等水体。另外，针对河宽大的站点，为提高对汛期流量的估算精度，以 M 像元为中心 3 行 × 3 列大小的像元矩阵中各像元平均亮温值作为 M 像元亮温值，如图 2 所示。

C 像元：为简化挑选流程，提高处理效率，本文针对各典型水文站构建以 M 像元为中心的 9 行 × 9 列大小的像元矩阵，考虑到亮温观测中可能存在的异常值，将矩阵中亮温值位于其 95 分位数的像元确定为 C 像元，如图 3 所示。



图 2 仙桃站 M 像元位置示意

Fig. 2 Example of M pixel in Xiantao station

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81

图 3 以 M 像元为中心的像元矩阵示意

Fig. 3 Sketch map of pixel matrix centered on M pixel

## 2.2 率定和验证

使用 M/C 信号法得到的河道模拟流量相较于实测流量值存在滞后现象，即当洪水波来临时，水文站测

量断面的水位会立即升高,但洪水不会迅速向河漫滩扩散,遥感观测的亮温值也不会及时发生改变,这一延迟问题可能会导致率定结果出现误差<sup>[36]</sup>。此外,使用单一回归方程率定流量时,可能会造成模拟的枯季径流过高以及汛期洪水峰值过低的情况<sup>[37]</sup>。为更好地反映丰枯期流量特征,将实测月径流值与M/C信号法月平均值分别建立线性回归方程,通过M/C信号法得到的模拟流量可表示为

$$Q_{s,i} = a_i + b_i (T_{b,m}/T_{b,c})_i \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \quad (7)$$

式中:  $Q_{s,i}$ 为第*i*月的模拟流量值,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $a_i$ 、 $b_i$ 为第*i*月的回归方程系数;  $(T_{b,m}/T_{b,c})_i$ 为第*i*月的M像元与C像元亮温比值。

### 2.3 评价指标

本文选取水文模型常用的决定系数( $R^2$ )与纳什效率系数( $E_{\text{NS}}$ )来评价模拟效果<sup>[37]</sup>。 $R^2$ 和 $E_{\text{NS}}$ 的计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (8)$$

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (9)$$

式中:  $Q_{o,i}$ 为第*i*月的实测的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{Q}_o$ 为实测流量平均值,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{Q}_s$ 为模拟流量平均值,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。 $R^2$ 用来反映模拟值与实测值之间的相关程度,取值范围为0~1,  $R^2$ 值越接近1表明模拟效果越好,本文将 $R^2$ 划分为5个评判等级: 0~0.2、0.2~0.5、0.5~0.7、0.7~0.8及0.8~1.0。 $E_{\text{NS}}$ 除了可以评价模拟效果程度好坏外,还可以反映峰值的拟合效果,当 $E_{\text{NS}} = 1$ 时,表明拟合效果最好,  $E_{\text{NS}} = 0$ 时表示模拟结果接近观测值的平均水平,取值范围为 $-\infty \sim 1$ ,本文将 $E_{\text{NS}}$ 划分为5个评判等级: <0、0~0.3、0.3~0.5、0.5~0.7及0.7~1.0。

## 3 研究结果

M/C信号法中,流量的模拟效果除了取决于所选河道断面和河漫滩的几何形状外,数据的时间序列长度也存在一定影响<sup>[28]</sup>。考虑水文数据资料长度,本文针对61个典型站点选取前7a(1996—2002年、1999—2005年)作为率定期,后3a(2003—2005年、2006—2008年)作为验证期。根据M/C信号法,首先提取1996—2008年的M像元、C像元每日的亮温值,由于SSM/I亮温观测的数据传输等客观问题,在实际中无法精确达到每天均有数据记录和存档,故采用7a向前滑动平均处理填补空缺值,同时也减少了原始时间序列的噪声;接着对率定期的实测各月径流值与M/C信号法各月平均值分别进行线性拟合得到回归方程。

### 3.1 率定结果

率定结果表明,约26.2%的站点 $R^2 \geq 0.8$ ,主要集中在1月、11月和12月。约17.8%的月份拟合得到的 $R^2 > 0.5$ ,  $R^2 > 0.8$ 的月份占3.0%,如坝上站1月份拟合得到的 $R^2$ 达到0.96(如图4(a))。图4(b)表明,在模拟效果较好的情况下,4—10月的拟合效果稍逊于其他月份,这一时段与中国主要流域汛期时段基本吻合。造成以上现象的主要原因是某些河宽较大的站点在洪水过境出现漫滩时,淹没面积超过了单个M像元覆盖范围(3.125 km × 3.125 km),而探测到的亮温值并未相应减小,导致模拟流量偏小。

### 3.2 验证结果

利用率定所得的各月关系曲线求取各站点验证期模拟月径流,结果表明,所有站点中验证期 $R^2$ 和 $E_{\text{NS}}$ 达

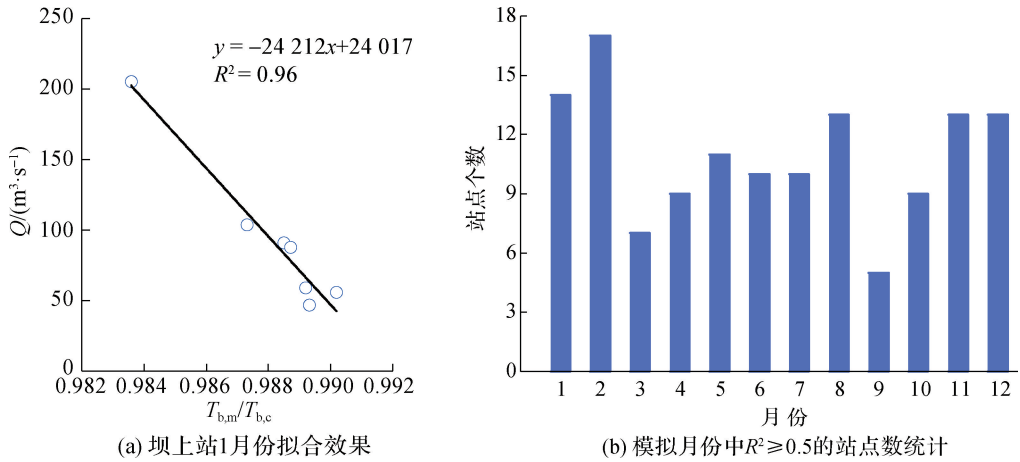


图 4 率定期模拟效果展示

Fig. 4 Simulated results for the calibration period

到0.5的站点数占比分别达到59.0%和41.0%， $R^2 \geq 0.8$ 的占比16.4%，位于0.7~0.8区间的占比34.4%，0.5~0.7的占比24.6%； $E_{NS}$ 则稍差，为正值的站点占比达到73.8%，其中 $E_{NS} \geq 0.7$ 的站点占比13.1%，0.5~0.7的占比27.9%（图5(a)）。图5(b)展示了各流域站点评价指标统计情况。单个站点模拟效果分析表明：珠江流域中，位于柳江上的柳州(二)站及桂江上的平乐(三)站的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 都达到了0.7以上；长江流域中，位于长江源的沱沱河站、直门达站模拟效果最优， $R^2$ 均达到了0.83， $E_{NS}$ 超过0.6；西南诸河流域中，所有站点 $R^2$ 均在0.5以上，均值达到0.75，其中拉萨河支流上的羊八井(三)站和雅鲁藏布江支流上的更张站效果最优， $R^2$ 达到0.91， $E_{NS}$ 在0.86以上；淮河流域中，淮河上游的王家坝和黄泥庄站模拟效果相对较好， $R^2$ 为0.62， $E_{NS}$ 超过0.5；黄河流域中，黄河源的大米滩站和黄河上游的小川站模拟效果最优， $R^2$ 为0.73， $E_{NS}$ 超过0.5；对于海河流域和内陆河流域，内陆河流域站点模拟效果要明显优于海河流域， $R^2$ 均达到0.72， $E_{NS}$ 值则稍差。对比可知，西南诸河模拟效果最好，内陆河其次，海河流域最差，其他流域模拟效果居中。在空间分布上，如图6所示，验证期各站点 $R^2$ 总体呈现出由西北向东南递减的趋势， $E_{NS}$ 空间分布则较为均匀。

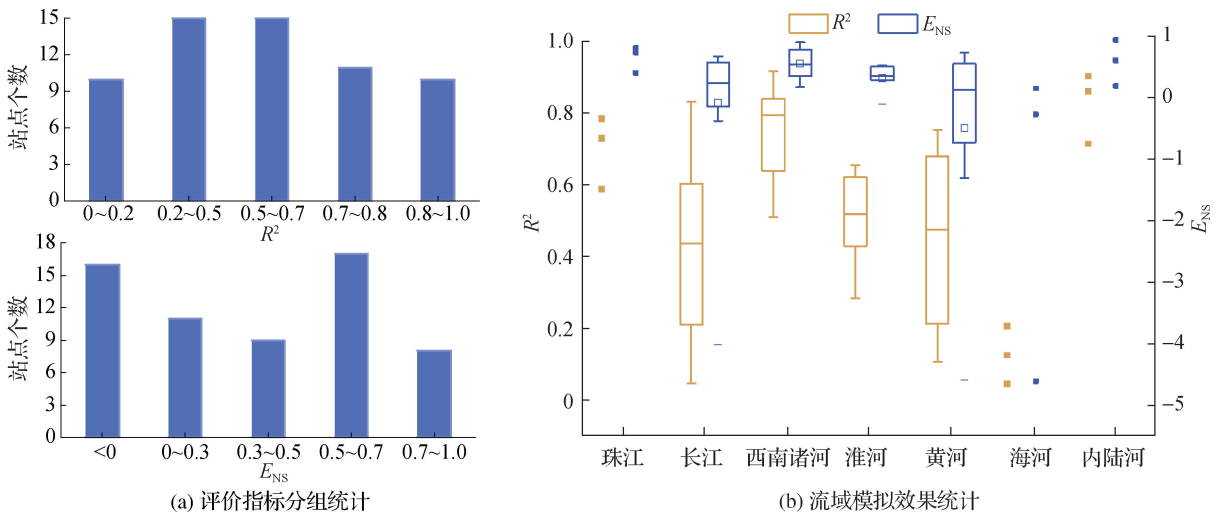


图 5 验证期站点模拟效果展示

Fig. 5 Simulated results for the validation period

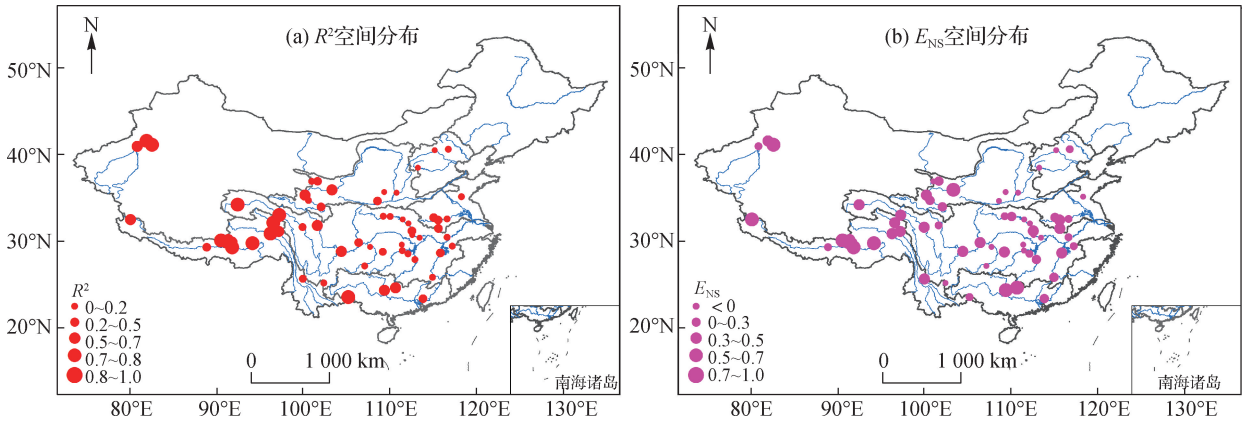


图 6 典型站点验证期效果评价指标空间分布

Fig. 6 Spatial distribution maps of typical stations for the validation period

图 7 对比了部分典型站点的模拟与实测月径流过程, 在验证期及率定期通过 M/C 信号法得到的模拟流量 ( $Q_s$ ) 与实测流量 ( $Q_o$ ) 过程线基本吻合。所有站点均表现为枯季径流模拟效果明显优于汛期, 对多个洪峰值有所低估, 与 Khan 等<sup>[38]</sup>的结论一致。

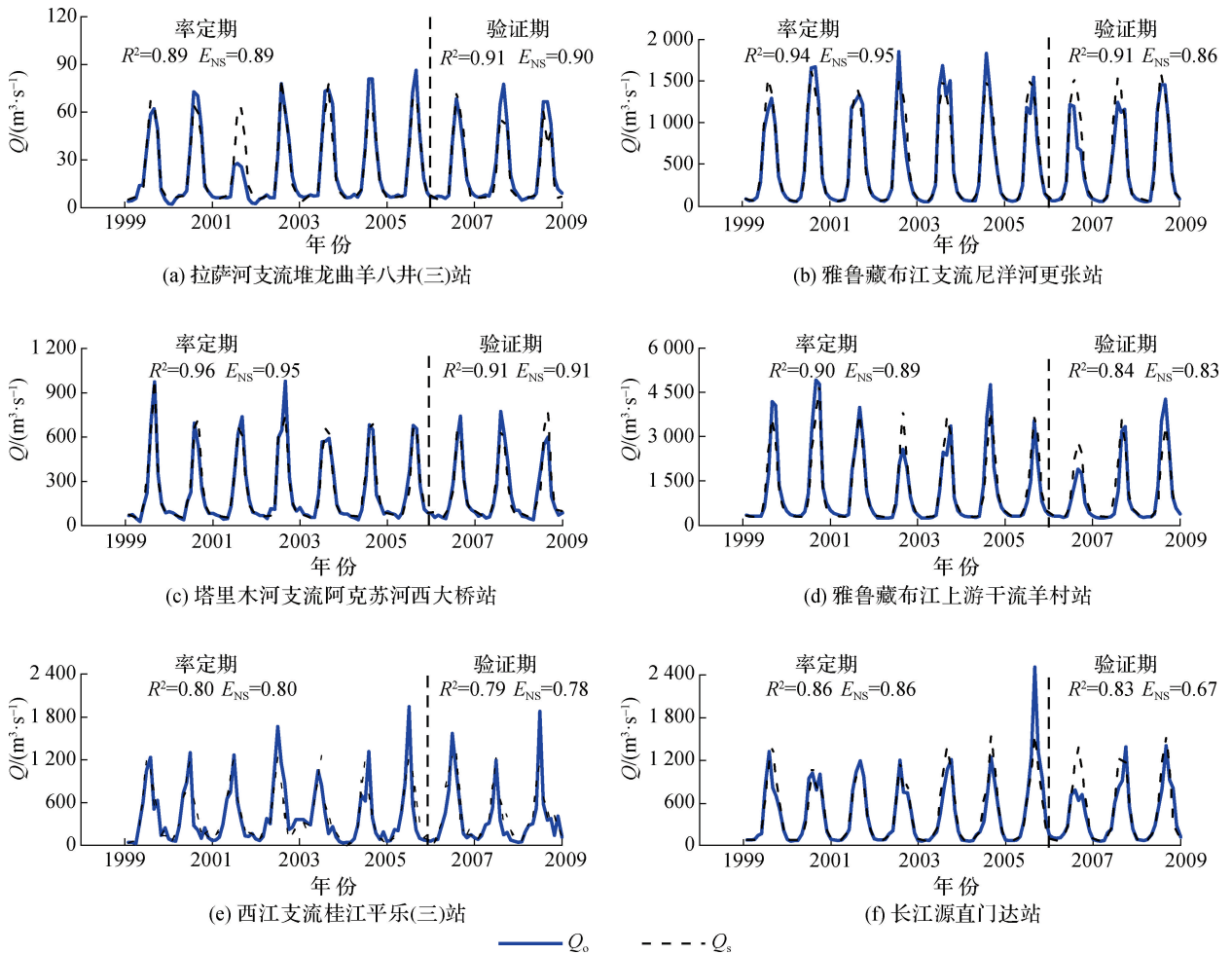


图 7 部分站点模拟和实测月径流过程线对比

Fig. 7 Comparison of the simulated and observed monthly runoff process curves for some typical stations

## 4 讨 论

对比已有的全球范围研究, M/C 信号法用于中国典型流域效果更佳、适用性更强。如 Revilla-Romero 等<sup>[27]</sup>对全球多条典型河流径流模拟分析中,  $R^2 \geq 0.25$  的站点占比仅为 10.6%,  $E_{NS} < 0$  占比达到 53.6%; van Dijk 等<sup>[26]</sup>针对全球范围的分析结果表明仅有 2.5% 的站点  $R^2$  超过 0.64。而在本研究选取的典型流域站点中, 验证期  $R^2 \geq 0.5$  占比超过 59.0%,  $E_{NS} \geq 0$  占比约 73.8%, 特别是在青藏高原地区, 羊八井(三)站、更张站和直门达站等站点的模拟效果突出。

为进一步厘清 M/C 信号法径流模拟效果的影响因素, 本文选取站点断面河宽、平均流量、控制面积、植被覆盖度、高程、土地覆盖/利用类型、气候类型 7 个地形地貌及水文气象因素, 结合各站点所有模拟期的  $R^2$  指标进行讨论:

(1) 断面河宽。根据方程式  $Q = vA$ , 流量变化除取决于流速( $v$ )外, 还与河道断面面积( $A$ )有关,  $A$  取决于河宽、水深及断面几何形态等。因此, 径流模拟效果与河宽( $W$ )存在直接关系。如图 8(a) 所示,  $W < 200$  m 的 42 个站点中,  $R^2 \geq 0.5$  的站点达到 28 个, 占比为 66.7%; 在  $W \geq 200$  m 的 19 个站点中, 超过半数的站点  $R^2 < 0.5$ 。

(2) 平均流量和控制面积。如图 8(b) 和图 8(c) 所示, 考虑平均流量和控制面积,  $\bar{Q}$  为  $100 \sim 1\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  的 32 个站点中  $R^2 \geq 0.5$  的占比超过 78.0%, 其中, 仅 1 个站点的控制面积  $< 50\,000 \text{ km}^2$ 。对于流量过小( $\bar{Q} < 100 \text{ m}^3/\text{s}$ )的河流, M 像元与 C 像元亮温值差异不明显, 导致模拟效果不理想; 若流量较大( $\bar{Q} \geq 1\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 虽排除了站点附近的水利工程干扰, 但河道上下游大型水利工程较多, 且在汛期极易出现 M 像元漫滩现象, 也会降低模拟效果。

(3) 植被覆盖度。植被覆盖度表征像元的树冠覆盖比例, 可用于分析像元亮温受植被的影响程度。站点所在像元的林地植被覆盖度、非林地植被覆盖度和裸地覆盖度 3 个属性(图 8(d)—图 8(f))中, 54.1% 的站点以非林地植被覆盖为主, 37.7% 的站点以裸地覆盖为主, 林地植被覆盖为主的站点最少。站点  $R^2$  与林地

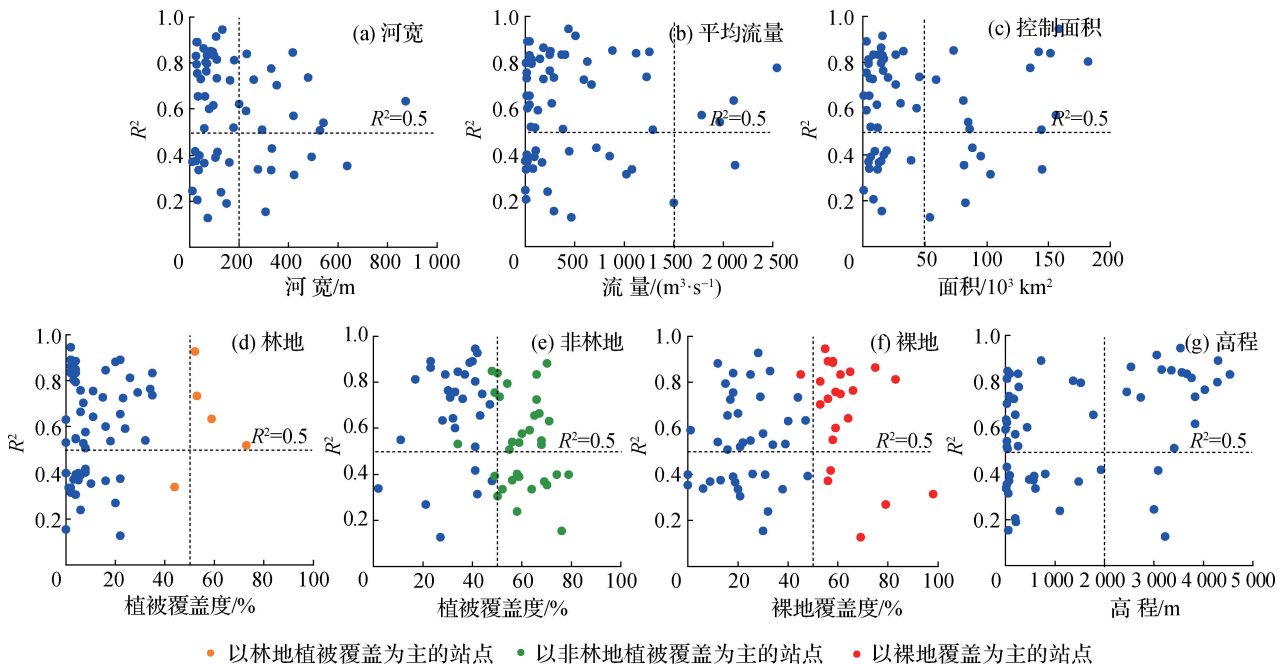


图 8 站点  $R^2$  与河宽、平均流量、控制面积、植被覆盖度及高程等影响因素的关系

Fig. 8 Relationship between  $R^2$  and influential factors including river width, mean observed discharge, control area, percent tree, percent non-tree, percent non-vegetated and elevation for each station



植被覆盖度的空间分布情况如图 9(a) 所示。总体上, 在以裸地覆盖度为主的站点中  $R^2 \geq 0.5$  的站点占比达到 78.3%, 57.6% 的以非林地植被覆盖为主的站点  $R^2 \geq 0.5$ , 以林地植被覆盖为主的 5 个站点  $R^2$  均达到 0.3 以上。Foster 等<sup>[39]</sup> 以及 Revilla-Romero 等<sup>[27]</sup> 的研究也表明, 植被覆盖一定程度会干扰微波信号, 降低水体亮温观测精度, 增大模拟结果的不确定性。

(4) 高程。由图 8(g) 可知, 在高程  $E \geq 2000$  m 的地区,  $R^2 \geq 0.5$  的占比达到 85%, 而对于  $E < 2000$  m 的低海拔地区, 仅 58.5% 的站点  $R^2 \geq 0.5$ 。如图 9(b) 中所示, 模拟效果较好的站点大多位于青藏高原和云贵高原。

(5) 土地覆盖/利用类型。如图 9(c) 和 10(a) 所示, 总体上, 类型为草地或裸地的站点对应的  $R^2$  最

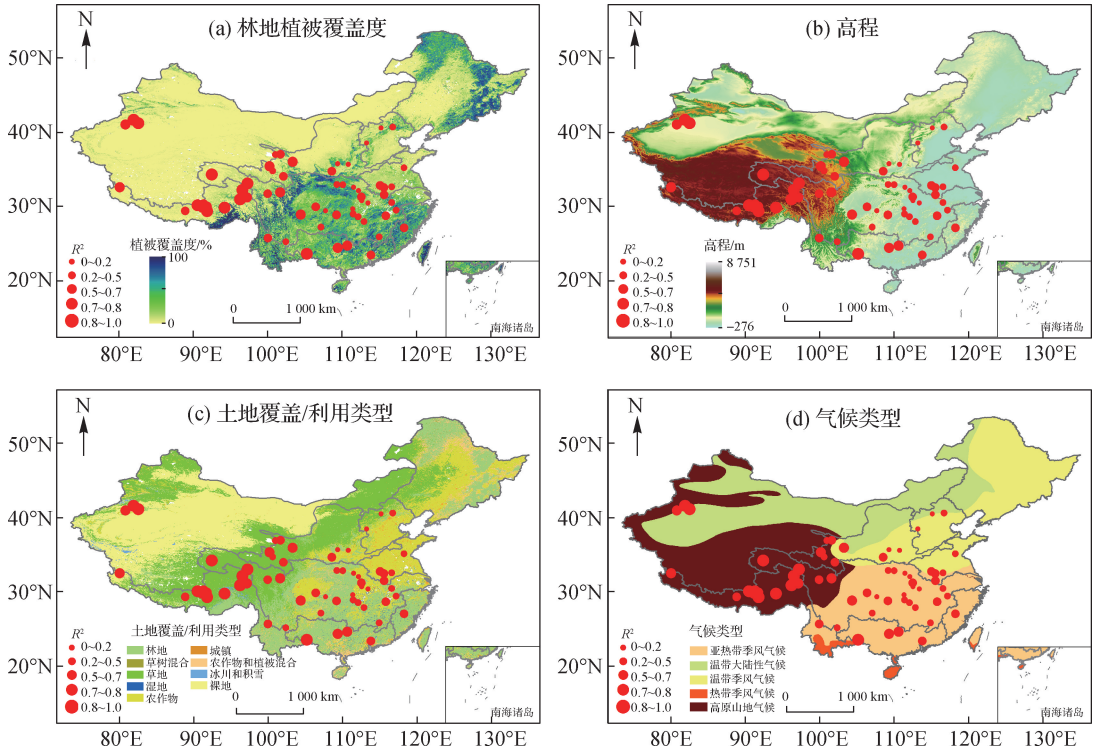


图 9 站点  $R^2$  与林地植被覆盖度、高程、土地覆盖/利用类型及气候类型的空间分布  
Fig. 9 Spatial distribution maps of  $R^2$  and percent tree, elevation, land cover/use type and climate type

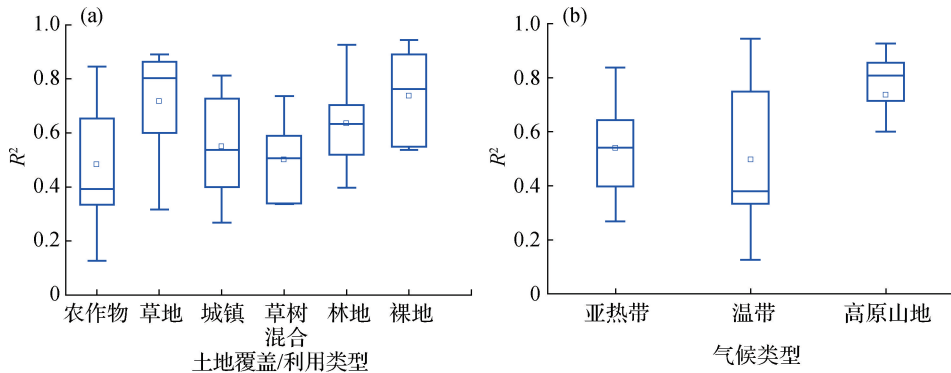


图 10 站点  $R^2$  与土地覆盖/利用类型、气候类型的箱线图  
Fig. 10 Box plots of  $R^2$  and influence factors of land cover/use type and climate type for each station

佳, 均值在 0.75 以上, 农作物、城镇及林地类型对应效果较差。

(6) 气候类型。图 10(b) 显示, 气候类型为高原山地气候的站点  $R^2$  效果最佳, 均值达到 0.73; 其次为亚热带类型, 均值达到 0.55; 位于温带气候带的站点对应效果最差, 分布情况详见图 9(d)。由于气候类型对河流径流量、土地覆盖/利用类型存在影响, 进一步分析发现, 在中国高原山地气候带中, 75.0% 的站点土地类型为草地和裸地, 其中 85.0% 的站点  $\bar{Q}$  为 100 ~ 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

表 2 影响因素多元回归分析

Table 2 Multiple regression analysis of influence factors

影响因素	标准化系数	显著性
高程	0.881	0
平均流量	0.620	0.003
断面河宽	-0.401	0.034
气候类型	0.455	0.039
土地覆盖/利用	-0.119	0.323
植被覆盖度	-0.069	0.559
控制面积	-0.093	0.539

如表 2 所示, 由多元线性回归分析可知, 高程、平均流量、断面河宽、气候类型显著影响模拟效果, 可作为控制因素。土地覆盖/利用、植被覆盖度、控制面积与以上因素存在相关性, 可间接影响模拟效果。以上结论与 van Dijk 等<sup>[26]</sup>、Revilla-Romero 等<sup>[27]</sup> 的发现基本一致。其中, 高程对模拟效果的影响最为显著, 其次为平均流量、气候类型及断面河宽。模拟效果较好的站点多数位于青藏高原和云贵高原等高海拔地区。作为河流源区和上游区域, 高海拔地区人类活动影响小、河宽较小, 可能产生的淹没面积在亮温观测的精度内, 且河道周围土壤湿度小, 对亮温观测干扰相对更小<sup>[40]</sup>, 均为 M/C 信号法的径流模拟创造了有利条件。

综上所述, 处于高原地区(高程  $\geq 2\ 000\ \text{m}$ 、高原山地气候)、平均流量为 100 ~ 1 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 、河宽  $< 200\ \text{m}$  的站点模拟效果相对更好。以上分析进一步证明了基于被动微波遥感亮温观测的 M/C 信号径流模拟方法在中国高原地区具有较强的适用性。在淮河平原、长江流域中下游等区域, 河流下游流量大、河道宽, 使得 M/C 信号法模拟效果稍逊。此外, 率定方式、数据序列长度、站点附近存在其他水体也会影响模拟效果。例如, 在降水过后, 某些站点周围的洼地水量聚集, 干扰 C 像元亮温值的获取精度, 进而影响模拟效果<sup>[28]</sup>。

综上所述, 处于高原地区(高程  $\geq 2\ 000\ \text{m}$ 、高原山地气候)、平均流量为 100 ~ 1 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 、河宽  $< 200\ \text{m}$  的站点模拟效果相对更好。以上分析进一步证明了基于被动微波遥感亮温观测的 M/C 信号径流模拟方法在中国高原地区具有较强的适用性。在淮河平原、长江流域中下游等区域, 河流下游流量大、河道宽, 使得 M/C 信号法模拟效果稍逊。此外, 率定方式、数据序列长度、站点附近存在其他水体也会影响模拟效果。例如, 在降水过后, 某些站点周围的洼地水量聚集, 干扰 C 像元亮温值的获取精度, 进而影响模拟效果<sup>[28]</sup>。

## 5 结 论

本文针对中国七大流域 61 个典型站点, 基于高精度被动微波遥感亮温观测数据, 采用 M/C 信号法模拟月径流过程, 并分析了地形地貌、水文气象因素对模拟效果的影响, 主要结论如下:

(1) 率定期约 26.2% 的站点决定系数  $R^2 \geq 0.8$ , 所有月份中约 17.8% 的月份  $R^2$  可达 0.5,  $R^2 \geq 0.8$  的月份占 3.0%; 验证期  $R^2$  和纳什效率系数达到 0.5 的站点比例分别为 59.0% 和 41.0%。在流域分布上, 位于西南诸河流域的站点模拟效果最佳,  $R^2$  均超过 0.5, 均值达到 0.75。

(2) 对比模拟和实测的月径流过程可知, M/C 信号法对枯季径流的模拟效果明显优于汛期, 对于洪峰值有所低估。

(3) 通过对七大地形地貌及水文气象因素的影响分析可知, 高程、平均流量、气候类型、断面河宽是影响模拟效果的主要因素, 且高程对模拟效果影响最为显著, 其次为平均流量。一般地, 具有高程  $\geq 2\ 000\ \text{m}$ 、河宽  $< 200\ \text{m}$ 、平均流量为 100 ~ 1 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 、气候类型为高原山地气候等特征的站点模拟效果更佳。

对比全球范围的模拟效果, 中国典型流域的 M/C 信号法河道月径流模拟效果相对更优, 该方法用于河道径流模拟具有较强优势, 尤其在青藏高原区域, 模拟效果突出。随着对地观测卫星遥感中微波遥感技术的发展, 微波卫星遥感监测的数据更丰富, 覆盖范围更广, 成本更低, 会进一步推动无(缺)资料地区径流模拟的发展。在未来研究中, 可根据地形地貌及水文气象因素挑选合适的站点, 将 M/C 信号法与水文模型等技术手段融合, 为河道日径流模拟、水旱灾害防治、水资源规划管理等水文应用提供更大支撑。

## 参考文献:

[1] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-

161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [2] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [3] 梁浩, 黄生志, 孟二浩, 等. 基于多种混合模型的径流预测研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 112-125. (LIANG H, HUANG S Z, MENG E H, et al. Runoff prediction based on multiple hybrid models[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(1): 112-125. (in Chinese))
- [4] 田富强, 徐冉, 南熠, 等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 324-336. (TIAN F Q, XU R, NAN Y, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 324-336. (in Chinese))
- [5] 张金存, 芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 286-292. (ZHANG J C, RUI X F. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 286-292. (in Chinese))
- [6] 侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 等. 基于SWAT模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1268-1282. (HOU W J, GAO J B, DAI E F, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe basin as the south source of Wujiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1268-1282. (in Chinese))
- [7] 刘志雨, 侯爱中, 王秀庆. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. *水文*, 2015, 35(1): 1-6. (LIU Z Y, HOU A Z, WANG X Q. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modeling[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(1): 1-6. (in Chinese))
- [8] 魏炳乾, 杨坡, 罗小康, 等. 半干旱无资料中小流域设计洪水方法研究[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(2): 32-39. (WEI B Q, YANG P, LUO X K, et al. Research on design flood methods for semi-arid and non-data basin in a medium-small scale[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(2): 32-39. (in Chinese))
- [9] 刘昌明, 白鹏, 王中根, 等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 272-282. (LIU C M, BAI P, WANG Z G, et al. Study on prediction of ungaged basins: a case study on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 272-282. (in Chinese))
- [10] JAFARZADEGAN K, MORADKHANI H. Regionalization of stage-discharge rating curves for hydrodynamic modeling in ungaged basins[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125165.
- [11] ZENG Z Y, GAN Y J, KETTNER A J, et al. Towards high resolution flood monitoring: an integrated methodology using passive microwave brightness temperatures and Sentinel synthetic aperture radar imagery[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124377.
- [12] 赵长森, 潘旭, 杨胜天, 等. 低空遥感无人机影像反演河道流量[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1392-1408. (ZHAO C S, PAN X, YANG S T, et al. Measuring streamflow with low-altitude UAV imagery[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1392-1408. (in Chinese))
- [13] 刘扬李, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: II: 考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 201-210. (LIU Y L, ZHOU Z H, LIU J J, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II: simulation of water cycle processes in the Niyang River basin considering glaciers and frozen soils[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 201-210. (in Chinese))
- [14] NAZ R, ASHRAF A, TOL C, et al. Modeling hydrological response to land use/cover change: case study of Chirah Watershed (Soan River), Pakistan[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(22): 1-16.
- [15] 刘晓燕, 刘昌明, 杨胜天, 等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J]. *地理学报*, 2014, 69(11): 1595-1603. (LIU X Y, LIU C M, YANG S T, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1595-1603. (in Chinese))
- [16] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究: 以东江和北江为例[J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 174-182. (WANG Z L, ZHONG R D, LAI C G, et al. Evaluation of TRMM 3B42-V7 satellite-based precipitation data product in the Pearl River basin, China: Dongjiang River and Beijiang River basin as examples[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 174-182. (in Chinese))

- [17] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156. (CHEN X H, ZHONG R D, WANG Z L, et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1147-1156. (in Chinese))
- [18] 曾子悦, 许继军, 王永强. 基于遥感空间信息的洪水风险识别与动态模拟研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 463-472. (ZENG Z Y, XU J J, WANG Y Q. Advances in flood risk identification and dynamic modelling based on remote sensing spatial information[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 463-472. (in Chinese))
- [19] ZAJI A H, BONAKDARI H, GHARABAGHI B. Remote sensing satellite data preparation for simulating and forecasting river discharge[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6): 3432-3441.
- [20] HUANG Q, LONG D, DU M D, et al. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 211: 112-128.
- [21] MCFARLAND M J, MILLER R L, NEALE C M U. Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 839-845.
- [22] ALLEY R, JENTOFT-NILSEN M. Algorithm theoretical basis document for: brightness temperature [DB]. California: Jet Propulsion Laboratory, 1999.
- [23] BRAKENRIDGE G R, COHEN S, KETTNER A J, et al. Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475: 123-136.
- [24] BRAKENRIDGE G R, NGHIEM S V, ANDERSON E, et al. Space-based measurement of river runoff[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2005, 86(19): 185.
- [25] BRAKENRIDGE G R, NGHIEM S V, ANDERSON E, et al. Orbital microwave measurement of river discharge and ice status [J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): W04405.
- [26] van DIJK A I J M, BRAKENRIDGE G R, KETTNER A J, et al. River gauging at global scale using optical and passive microwave remote sensing[J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 6404-6418.
- [27] REVILLA-ROMERO B, THIELEN J, SALAMON P, et al. Evaluation of the satellite-based Global Flood Detection System for measuring river discharge: influence of local factors[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(11): 4467-4484.
- [28] de GROEVE T. Flood monitoring and mapping using passive microwave remote sensing in Namibia[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2010, 1(1): 19-35.
- [29] 何惠. 中国水文站网宏观评价[J]. 水利水电技术, 2002, 33(12): 1-4. (HE H. Macro evaluation of hydrological station network in china[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(12): 1-4. (in Chinese))
- [30] 芮孝芳. 中国地学通鉴-水文卷[M]. 西安: 陕西师范大学出版总社, 2018. (RUI X F. General survey of earth science in China-hydrology volume[M]. Xi'an: Shaanxi Normal University Press, 2018. (in Chinese))
- [31] BRODZIK M J, LONG D G, HARDMAN M A, et al. MEaSURES calibrated enhanced-resolution passive microwave daily ease-grid 2.0 brightness temperature ESDR[DB]. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2016.
- [32] BRODZIK M J, HARDMAN M A, LONG D G. Leveraging metadata conventions to improve usability of an ease-grid 2.0 passive microwave data product [C] // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE, 2017: 5197-5200.
- [33] JOHNSON M T, RAMAGE J, TROY T J, et al. Snowmelt detection with calibrated, enhanced-resolution brightness temperatures (CETB) in Colorado watersheds[J]. Water Resources Research, 2020, 56(1): e2018WR024542.
- [34] LONG D G, DAUM D L. Spatial resolution enhancement of SSM/I data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 407-417.
- [35] REES W, PELLIKKA P. Principles of remote sensing[M] // Remote Sensing of Glaciers. Oxfordshire: Taylor & Francis Group, 2009: 1-20.
- [36] BRAKENRIDGE G R, de GROEVE T, et al. Satellite river discharge and runoff measurements: technical summary [DB]. Boulder: University of Colorado, 2013.
- [37] 董廷军, 周丰, 李杰, 等. 流域水文模型模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2016: 120-123. (DONG T J, ZHOU F, LI J, et al. Watershed hydrological model simulation[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2016: 120-

123. (in Chinese))

- [38] KHAN S I, HONG Y, VERGARA H J, et al. Microwave satellite data for hydrologic modeling in ungauged basins[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 663-667.
- [39] FOSTER J L, SUN C J, WALKER J P, et al. Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 187-203.
- [40] TIAN H, IQBAL M. Utilizing a new soil effective temperature scheme and archived satellite microwave brightness temperature data to estimate surface soil moisture in the Nagqu region, Tibetan Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(1): 84-100.

## River runoff simulation and analysis for typical basins based on high-resolution brightness temperature observations\*

XU Jijun<sup>1,2</sup>, QU Xing<sup>1,2</sup>, ZENG Ziyue<sup>1,2</sup>, YUAN Zhe<sup>1,2</sup>, HUO Junjun<sup>1,2</sup>, WANG Yongqiang<sup>1,2</sup>

(1. *Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;*  
2. *Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment, Wuhan 430010, China*)

**Abstract:** Accurate river runoff simulation is of great importance for basin hydrological simulation, water resources plan and sustainable management, hydrological disaster prevention and control. With the rapid development of the earth observation satellite remote sensing techniques, microwave remote sensing monitoring can provide a new method for river runoff simulation. To date, for river runoff simulation, further exploration is needed based on passive microwave remote sensing brightness temperature observations. This paper applied the M/C signal method to river runoff simulation in typical river basins in China based on a high-resolution passive microwave remote sensing brightness temperature dataset. The usability of this method was discussed. To analyze the influence factors of the simulation results, 7 geomorphologic and hydrometeorological factors were chosen, including river width, mean observed discharge, control area, vegetation percentage, elevation, land use/cover and climate type. Results of the monthly runoff simulation show that among the 61 typical sites in 7 river basins in China,  $R^2$  of 59.0% of them exceeded 0.5 and more than 41.0% reached an  $E_{NS}$  larger than 0.5. Performance for the sites in basins of the rivers in Southwest China is obviously better, especially for the sites on the Tibetan Plateau; elevation, mean observed discharge, climate type and width of the river cross section are found out to be the dominated factors; and the M/C method is more suitable for sites on small rivers of high elevation under mountain plateau climate. Generally, this paper can inspire research ideas for river runoff simulation, thus providing reliable guidance for extending the hydrological application of microwave remote sensing in China.

**Key words:** runoff simulation; earth observation satellite remote sensing; passive microwave; brightness temperature; M/C signal method

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52009007) and the Nature Science Foundation of Hubei Province, China (No. 2020CFB132).