

基于数字地形信息的拉萨河流域河宽预测模型研究

倪飞宇¹, 吴鹏飞¹, 王静², 江玉吉², 刘金涛^{1,3,4}, 王万杰^{1,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 西藏自治区水文水资源勘测局, 西藏拉萨 850000; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098; 4. 河海大学水利学科专业实验教学中心, 江苏南京 210098)

摘要: 河道宽度是重要的水文特征, 对水文计算具有重要意义。以拉萨河流域为研究区, 依据 Google Earth 影像, 测量了 1 000 个河段的河宽, 计算了相应测段的集水面积、局部坡度、坡度原点矩、河道曲率 4 项地形要素。使用其中 800 个河段的数据判别河宽与各地形要素的相关关系, 选取与河宽相关性最好的集水面积和坡度原点矩两要素, 构建了集水面积模型、坡度原点矩模型及 4 种河宽因子模型, 使用另外 200 个河段的数据进行模型验证。结果表明: 在集水面积小于 2 100 km² 的拉萨河上游河段, 基于集水面积和坡度原点矩的河宽因子模型效果最优, 在集水面积大于 2 100 km² 的拉萨河下游河段, 基于集水面积的模型效果最优。因此, 预测拉萨河流域河宽时应以 2 100 km² 集水面积为阈值, 在上游使用河宽因子模型, 在下游使用集水面积模型, 采用该方法预测的上、下游河宽误差均小于 20%。

关键词: 河道宽度; 地形要素; 预测模型; 数字地形; 拉萨河流域

中图分类号: P334⁺.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0102-08

Channel width prediction model based on digital terrain in Lhasa River Basin

NI Feiyu¹, WU Pengfei¹, WANG Jing², JIANG Yuji², LIU Jintao^{1,3,4}, WANG Wanjie^{1,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Experimental Teaching Center of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Channel width is an important hydrological feature, which is of great significance to the hydrological calculation of the rivers in Tibet Plateau. The channel widths of 1000 rivers in Lhasa River Basin were measured using Google Earth images, and the corresponding catchment area, local slope, origin moment of slope and channel curvature of each channel section was calculated accordingly. The correlation between channel widths and these topographic factors were evaluated based on the data of 800 channel sections. Then channel width models based on catchment area, origin moment of slope and four channel width factors were constructed subsequently. The other 200 channel width data were used to verify the precision of the models. The results show that the channel width factor model based on catchment area and origin moment of slope with the catchment area less than 2 100 km² in the upstream section has the best performance and the model based on catchment area with the catchment area more than 2 100 km² in the downstream has the best performance. Thus, the catchment area threshold of 2100 km² should be applied in the prediction of the river width in Lhasa River Basin, with the application of channel width factor model to the upstream channels, and catchment area model to the downstream channels. The average deviation of the prediction result is less than 20%.

Key words: river width; topographic factor; prediction model; digital terrain; Lhasa River Basin

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-02-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0207); 国家自然科学基金项目(91647108, 91747203)

作者简介: 倪飞宇(1998-), 男, 江苏淮安人, 本科生, 研究方向为流域水文相似与模拟。

通讯作者: 吴鹏飞(1994-), 男, 江苏如东人, 硕士研究生, 研究方向为流域水文相似与模拟。

1 研究背景

河道宽度作为河流的一项基本地形特征,被许多河流水动力学模型作为重要参数^[1-2]。在这些水文模型中,河宽数据的精度对洪水流量的模拟结果具有显著影响^[3-5]。受资金和人力资源限制,详细地手动测量河道各处的河宽分布在较大研究尺度下并不可行^[6]。因此,当前的水文研究需要有能够自动获取流域内河宽分布的可靠手段^[1]。

河宽的自动化获取手段主要分为两类,即图像识别方法^[7-9]和统计拟合方法^[4,6]。其中,图像识别方法可以从高精度卫星影像中直接判读出水体区域,然后测量出河流任意位置的水面宽度作为输出结果^[8]。由于水面宽度存在季节性波动,使用旱季影像得到的水面宽度与真实的河道宽度间差异较大,因此测量河道宽度时还应包含以稳定河岸为边界的经常性过水的河床^[6]。此外,地表覆盖、云雾等影响因素使得借助卫星影像判读出的河道往往并不连续,需要额外的手动修正^[1]。统计拟合方法通过在河宽与上游集水面积、坡度等地形要素间构建经验性的统计关系,并在此基础上直接使用由数字高程模型(digital elevation model, DEM)计算得到的地形要素预测河宽^[6,10-12]。由于图像识别方法主要应用于宽度达数千米的大型河流,在类似拉萨河流域的河道宽度较小的区域缺乏应用评价^[12],且高精度的青藏高原夏季卫星影像较难获取,因此只需要少量资料的统计拟合方法更适合于青藏高原的河宽获取研究。

现有的统计拟合方法普遍认可上游集水面积是河宽的重要影响因素^[6,12]。此外,研究表明河宽同样受其他地形要素影响^[11-13]。例如,石书缘等^[11]利用 Google Earth 发现较大河道曲率下的河道宽度随点坝长度增大而增大;何蒙等^[6]将坡度原点矩和集水面积结合成河宽因子,发现该因子与河宽间具有良好的相关性。蒋成伟等^[12]使用 Google Earth 分别测量了拉萨河 10 个主要河段的平均河宽与 5 种地形要素平均值,以 10 组数据分析相关性。他们的研究发现河宽与集水面积、河道纵比降分别呈良好的线性、幂函数关系,与流域的平均坡度、河流凹度、河流弯曲度间相关性不佳。但是,蒋成伟等^[12]使用的是自冬季枯水期影像中读取的水面宽度,其结果未必能准确反映真实河道宽度的分布规律。此外,该研究仅使用 10 组平均值构建的相关关系,存在一定偶然性,且并未对所构建的经验性模型进行精度

评价。

在已有研究选取的地形要素中,河道纵比降与坡度原点矩相似,都被用于描述河道地形起伏变化^[6],而河流凹度的测量相对复杂,难以通过编程实现^[12]。因此本文选取了上游集水面积、局部坡度、坡度原点矩、河道曲率 4 种地形要素,以拉萨河流域主要河段为研究对象,分析了河宽与各地形要素间的相关关系。然后选取其中相关性较好的地形要素,探讨建立河宽预测模型的可行性,并进行了模型验证。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

拉萨河发源于念青唐古拉山,流经拉萨市后于曲水县汇入雅鲁藏布江,总面积 32 588 km²,地理坐标为东经 90°05'~93°21',北纬 29°15'~31°25'。当地属高原温带半干旱气候,年平均气温 5.3℃,年平均降水量约 500 mm^[12]。流域内高山密布,河谷宽窄相间,河道上游为单一蜿蜒型河道,下游多呈分叉、辫状河道。拉萨河流域高程及主要水系分布如图 1 所示。

本研究以流域内集水面积大于 700 km² 的主要河段为研究对象,主要河段从 1''(约 30 m)分辨率的 SRTM DEM 使用 D8 方法并设置上游集水面积阈值提取得到。

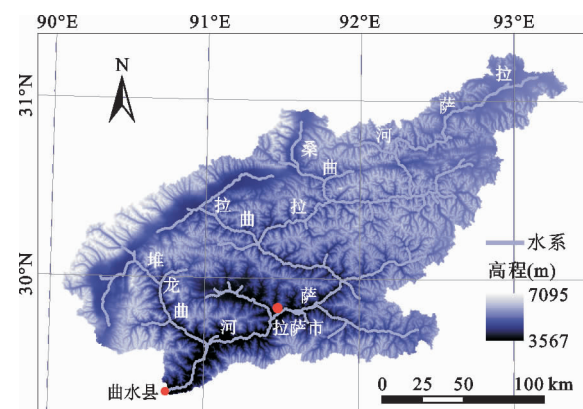


图1 拉萨河流域高程及主要水系分布

2.2 数据获取

2.2.1 河宽数据读取 本文使用的河宽数据通过 Google Earth 提供的卫星影像测量得到。Google Earth 作为一款应用广泛的地理信息软件,其提供的高精度卫星影像在目前的水文、地理研究中应用广泛^[14-15]。本文依据拉萨河流域主要河段走向,大致每隔 500 m 量取一次,共量取河宽 1 000 个,其中 800 个用于寻找与地形要素之间的规律及建模,200 个用于模型验证。所量取的河宽同时包含了水体部

分和经常性的过水河床。为了保证有效河宽的准确性,量测过程中避开了部分大坝拦水区和辫状河道。由于部分河段尤其在下游辫状河道过多,量取的河宽点较少,因此读取得到的较大河宽数值较少。

2.2.2 地形要素计算 本文选取了上游集水面积、局部坡度、坡度原点矩、河道曲率 4 种地形要素进行分析,相关要素主要通过 SRTM DEM 提取得到。集水面积可以通过多种基于 DEM 的流向算法计算得到,但不同方法对山丘区河道栅格的集水面积影响不大^[16]。例如使用 ArcGIS 内置的 D8 方法^[17]和 SAGA 内置的 D_{∞} 方法^[18]计算得到的拉萨河主要河段栅格的集水面积间的平均绝对偏差约为 0.2%,最大绝对偏差仅为 1.4%。因此本文只使用了目前应用更为广泛的 D8 方法获取集水面积。

由于河道的 DEM 高程只是水面高程而非河底高程^[19],传统的 DEM 计算局部坡度的方法只能反映水面起伏程度而非河道断面所处位置的地形特征。针对这一问题,何蒙等^[6]提出了坡度原点矩的定义,通过计算一定范围内所有 DEM 栅格局部坡度的平均值度量河道的地形起伏特征。本文同时计算了所有河道栅格的局部坡度和坡度原点矩用于分析,其中局部坡度由 ArcGIS 计算得到,坡度原点矩则根据何蒙等^[6]的方法获取。

河道曲率指的是一段河流的实际长度与两端点间直线距离的比值。已有研究主要通过卫星影像直接测量曲率^[11-12]。在 Google Earth 中,为确定河段的实际长度,本研究于正视状态下以“添加路径”工具大致沿河道中泓绘制一段大致以选定断面为中点的长度约 200~300 m 的曲折路径。以该路径长度作为河流实际长度,除以路径首尾端点间的直线距离即可得到实测的断面处真实河道曲率。由于该方法不适用于提取全流域河道所有局部位置的曲率信息,本文仿照常有的基于 DEM 的河道形态提取方法^[20],尝试借助提取的栅格河道测量曲率,探讨使用 DEM 提取河道曲率的可行性。该方法以需要计算曲率的河道栅格为中心,向前向后各追踪读取 5 个栅格,计算共 11 个栅格间的流径长度及两端的 2 个栅格中心间的直线距离,求取两者比值,进而得到计算的曲率。此外,本文在读取河宽的同时实测了相应位置的真实河道曲率用于验证。

2.3 研究方法

2.3.1 河宽与各地形要素间相关性分析 为了更好地发现不同河宽对应地形要素的整体规律,仿照 McNamara 等^[21]的策略对相关要素值进行了整体平

均处理。其原理是:从 0 开始对每 2 m 范围内的所有河宽对应的要素值进行平均,获得的平均值作为该范围内中值河宽对应的地形要素值,用以更加清晰地表现河宽所对应的各地形要素的整体特征。使用线性函数、指数函数、对数函数、幂函数 4 种方法拟合河宽与各地形要素值的关系曲线,得到相应的确定性系数和回归方程,并取其中确定性系数最高的一种方法。

2.3.2 河宽预测模型构建 河宽预测模型采用 2 种方法构建:一是采用常见的方法,以河宽与单一地形要素的回归方程构建模型^[12];二是通过对何蒙等^[6]构建河宽因子的方法进行优化,选取与河宽相关性较好的多个地形要素结合成新型河宽因子,以河宽与河宽因子的回归方程构建模型。

河宽因子的确定主要通过将地形要素划分为趋势性因素和局地性因素。趋势性因素反映河宽在流域上下游的变化趋势,主要考虑集水面积。局地性因素反映局部地形和河道形态变化对河宽的影响,具体影响因素从局部坡度、坡度原点矩、河道曲率 3 种地形要素中根据相关性选取。DEM 中任一河道栅格的趋势性因素可以利用公式(1)进行表达,即:

$$f_a = 1 - \frac{\sqrt{\max(A)} - \sqrt{A}}{\sqrt{\max(A)} - \sqrt{T}} \quad (1)$$

式中: f_a 为趋势性因素; T 为集水面积阈值,km²; A 为当前栅格的集水面积,km²; $\max(A)$ 为流域最大集水面积,km²。

考虑到河宽随局部地形特征的变化趋势,局地性因素的计算分为 2 种情况。

当河宽随第 i 个局地地形要素数值增大而增大时,局地性因素 f_{si} 用公式(2) 进行表达:

$$f_{si} = \frac{Mer_i}{\max(Mer_i)} \quad (2)$$

式中: Mer_i 为第 i 个地形要素的数值; $\max(Mer_i)$ 为第 i 个地形要素的最大值。

当河宽随第 i 个局地地形要素数值增大而减小时,局地性因素 f_{si} 用公式(3) 进行表达:

$$f_{si} = 1 - \frac{Mer_i}{\max(Mer_i)} \quad (3)$$

为反映多个地形要素的综合影响,将趋势性因素和所有 n 个局地性因素乘积作为河宽因子 f_{ie} 即:

$$f_{ie} = f_a \prod_{i=1}^n f_{si} \quad (4)$$

使用线性函数、指数函数、对数函数、幂函数 4 种方法拟合河宽与河宽因子间的回归方程,选取确

定性系数最大的回归方程构建河宽预测模型。

3 结果分析

3.1 河宽与各地形要素间相关性分析

图2为实测河宽与各地形要素(集水面积、局部坡度、坡度原点矩和河道曲率)间的相关关系,图2中的拟合曲线均为4种拟合方式中确定性系数最高者。

图2(a)显示河宽与集水面积呈良好的幂函数关系,确定性系数达到了0.92。这是因为冲积河流的河宽与流量有良好的相关性,同时流量与集水面积之间的关系也十分密切,因此河宽与集水面积之间的关系较好。河宽与局部坡度的相关性较弱(图2(b)),确定性系数仅为0.41,这是因为借助DEM测得的局部坡度是水面比降而非河底坡度,河底坡度反映了河道地形起伏的特点,而水面比降不能准确反映河宽与地形起伏的关系。与只考虑可见水面的已有研究相比^[12],本研究判读的包含了经常性过水河道的河宽与集水面积间确定性系数更高,相关性更好。图2(c)表明,随着河宽的增大,坡度原点矩存在先增大后减小的趋势。经过反复试验,发现以30 m河宽为界,对数据点分别进行拟合,可以各自拟合出良好的函数关系。其中窄于

30 m的河道与坡度原点矩呈线性关系,确定性系数为0.87,宽于30 m的河道与坡度原点矩呈对数关系,确定性系数为0.77,二者均优于河宽与局部坡度的相关性。此处以坡度原点矩反映河道起伏变化,得到河宽随地形起伏呈两段式变化规律,这与蒋成伟等^[12]以河道比降反映河道起伏变化得到的河道起伏越缓则河道越宽的规律不一致。这是由于蒋成伟等^[12]考虑的河段主要属于本研究选取河段的偏下游部分,不能反映上游偏窄河段的变化趋势。图2(d)分析了河宽与实测河道曲率间的幂函数关系,发现二者间存在较好的相关性,确定性系数为0.59。这是因为河流越曲折,河道所能容纳的水量就越大,而河宽就会相应减小。此处较好的相关性与已有研究任务的河宽与河道曲率无关的结论不一致,可能是由于已有研究只使用了经过平均化的10个点值确定规律,不能很好地体现规律。然而,河宽与使用DEM直接提取计算得到的河道曲率间相关性不佳(图2(e)),确定性系数仅为0.22,且计算的河道曲率与实测曲率间并不接近(图2(f))。这是因为基于DEM提取河道栅格的方法受限于栅格尺寸,栅格尺寸无法准确反映宽度不同于栅格尺寸的河道的形变趋势,进而无法准确描述河宽与地形因子之间的关系。

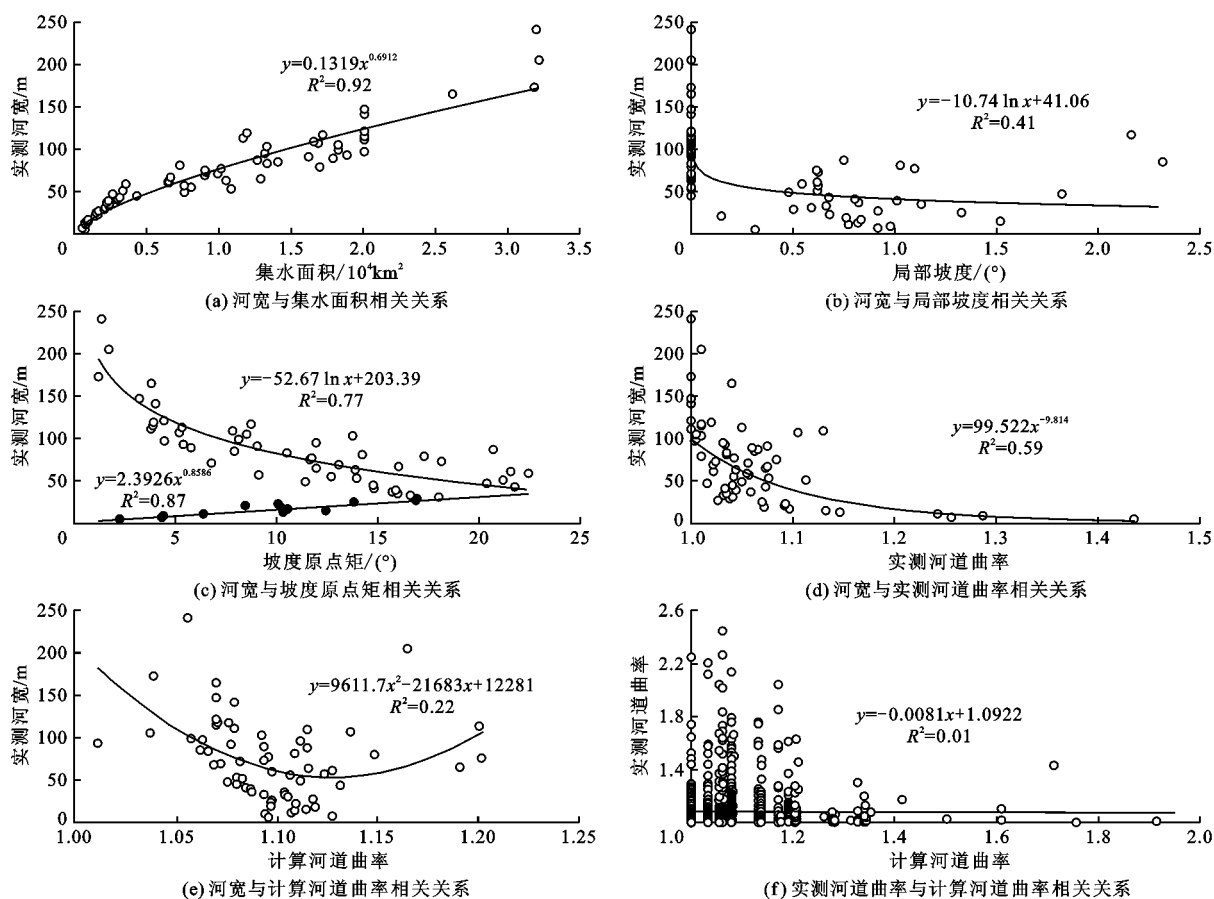


图2 实测河宽与各地形要素的相关关系

结果表明,河宽与集水面积的关系最为密切,且与坡度原点矩、实测河道曲率之间的相关性较好。但是,河道曲率难以准确地自动提取。因此,构建河宽模型主要考虑集水面积和坡度原点矩两个地形要素。鉴于实测河道曲率与河宽间较好的相关性,本研究同样采用了实测河道曲率参与建模计算,以探讨是否需要发展能够自动计算且准确反映真实河道曲率的方法用于河宽预测模型。此外,由于局部坡度在相关研究中应用广泛,本研究同样将其作为建模的一个可选参数。

3.2 河宽预测模型

3.2.1 模型构建 根据 2.1 节的相关性分析结果,分别选取与河宽相关性良好的集水面积和坡度原点矩构建河宽与单一地形要素的回归模型。

根据图 2(a) 的拟合结果,河宽 W 与集水面积 A 的回归方程为:

$$W = 0.1319A^{0.6912} \quad (5)$$

根据图 2(c) 的拟合结果,分两段确定河宽 W 与坡度原点矩 s 的回归方程。为了量化临界点特征,这里借助了 30 m 河宽在图 2(a) 中大致对应的 2 100 km² 集水面积。当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时,回归方程为:

$$W = -52.67 \ln(s) + 203.39 \quad (6)$$

当集水面积 A 大于阈值 700 km²,且 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时,回归方程为:

$$W = 2.3926s^{0.8586} \quad (7)$$

以河宽与河宽因子的回归方程构建模型时,除使用集水面积提供河宽因子的趋势性因素外,局地性因素由坡度原点矩、实测河道曲率、局部坡度中的部分项提供。根据局地性因素的不同,本研究共构建了 4 个河宽因子模型,其局地性因素分别包含坡度原点矩、坡度原点矩和局部坡度、坡度原点矩和实测河道曲率、所有 3 个地形指标(坡度原点矩、实测河道曲率、局部坡度)。

仅使用坡度原点矩提供局地性因素时,以 2 100 km² 为阈值,当集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时,局地性因素使用公式(2)计算,当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时,局地性因素使用公式(3)计算。再用公式(4)拟合趋势性因素和唯一的局地性因素得到河宽因子,对河宽 W 和河宽因子 f_{te} 分段拟合的结果如图 3(a) 和 3(b) 所示。

当集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 28.78f_{te}^{0.284} \quad (8)$$

当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 153.66f_{te} + 42.758 \quad (9)$$

使用坡度原点矩与局部坡度提供局地性因素时,分段拟合的结果如图 3(c) 和 3(d) 所示。

当集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 31.85f_{te}^{0.2861} \quad (10)$$

当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 147.08f_{te} + 47.078 \quad (11)$$

使用坡度原点矩与实测曲率提供局地性因素时,分段拟合的结果如图 3(e) 和 3(f) 所示。

当集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 34.759f_{te}^{0.2631} \quad (12)$$

当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 311.24f_{te} + 43.489 \quad (13)$$

使用坡度原点矩、局部坡度与实测曲率提供局地性因素,分段拟合的结果如图 3(g) 和 3(h) 所示。

当集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 38.302f_{te}^{0.2655} \quad (14)$$

当集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 时的回归方程为:

$$W = 298.18f_{te} + 47.675 \quad (15)$$

3.2.2 模型验证 使用 200 个实测点对集水面积模型、坡度原点矩模型及 4 种河宽因子模型效果进行验证,实测河宽和预测河宽的对比如图 4 所示。表 1 展示了对这 6 种模型预测的河宽与实测河宽进行误差统计的结果。由表 1 可知,仅以坡度原点矩为参数构建的坡度原点矩模型的预测结果最差,在集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 和 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 的 2 个范围内都产生了最大的相对误差。以坡度原点矩和实测曲率为局地性因素构建的河宽因子回归模型的预测结果也较为不理想。相较坡度原点矩模型,使用集水面积为参数构建的回归模型具有更好的应用效果,这与图 2 展示的集水面积与河宽间较坡度原点矩与河宽间更好的相关性吻合,相关性越高,拟合的回归方程预测效果越好。以集水面积为趋势性因素,坡度原点矩与局部坡度或坡度原点矩、局部坡度与实测曲率为局地性因素构建的河宽因子模型效果较为理想,但预测效果均差于仅以坡度原点矩为局地性因素的河宽因子模型。以坡度原点矩为局地性因素的河宽因子预测模型在集水面积 $A < 2\ 100\text{ km}^2$ 的上游区域拥有最好的预测效果,预测结果的相对误差小于集水面积模型。但在集水面积 $A \geq 2\ 100\text{ km}^2$ 的下游区域,该河宽因子预测模型的预测效果则差于集水面积模型,这同样与两个要素和河宽间的相关性强弱关系吻合。鉴于以坡度原点矩和实测曲率为参数构建的回归模型预测效果较差,可认为实测曲率不适合作为局地性因素,因此不进一

步探讨自动获取准确河道曲率的方法。

根据预测模型的精度评价可以得知,集水面积是影响拉萨河流域河宽分布规律的主要因素,但在集水面积较小的上游河段,地形起伏同样具有相当明显的影响。最佳的拉萨河流域河宽预测模型可以以 2 100 km² 集水面积为阈值,当集水面积 $A <$

2 100 km² 时使用基于坡度原点矩和集水面积的河宽因子模型,当集水面积 $A \geq 2\ 100\ \text{km}^2$ 时使用集水面积模型。考虑到这种方法的处理过程较为繁杂,针对所有河段直接使用基于坡度原点矩和集水面积的河宽因子模型以避免复杂的情景划分步骤同样可取,其上下游相对误差均稳定且较小。

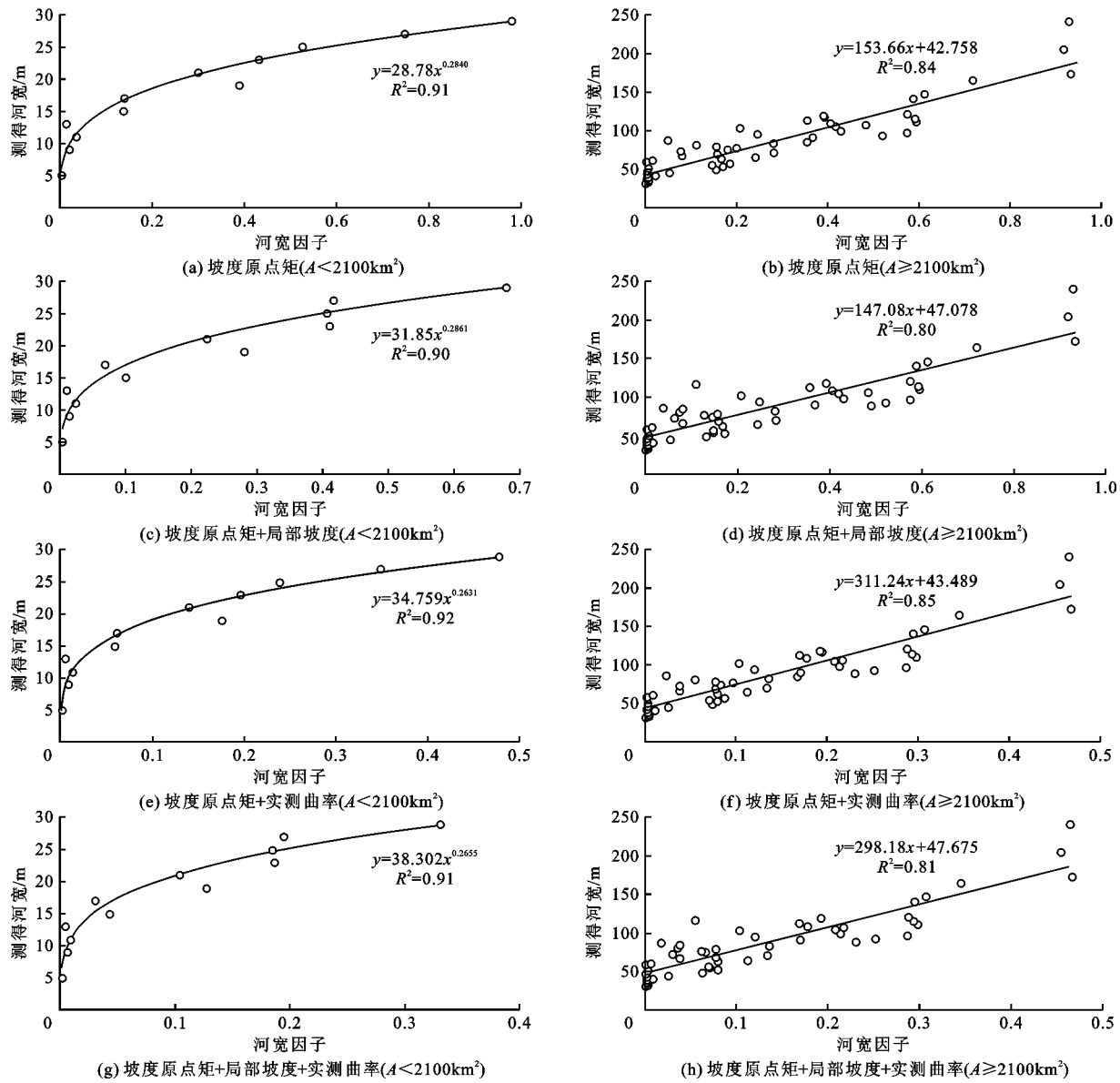


图 3 以不同地形指标提供局地性因素时河宽因子与测得河宽相关关系

表 1 6 种模型平均预测误差统计结果

预测模型	集水面积 $A < 2\ 100\ \text{km}^2$		集水面积 $A \geq 2\ 100\ \text{km}^2$	
	绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差
集水面积模型	8.22	28.25	33.61	16.40
坡度原点矩模型	11.49	42.27	54.45	58.27
河宽因子模型(坡度原点矩)	6.86	19.27	36.35	21.43
河宽因子模型(坡度原点矩+局部坡度)	6.98	20.16	37.90	24.80
河宽因子模型(坡度原点矩+实测曲率)	7.94	22.58	38.55	47.33
河宽因子模型(坡度原点矩+局部坡度+实测曲率)	7.25	20.55	39.78	24.29

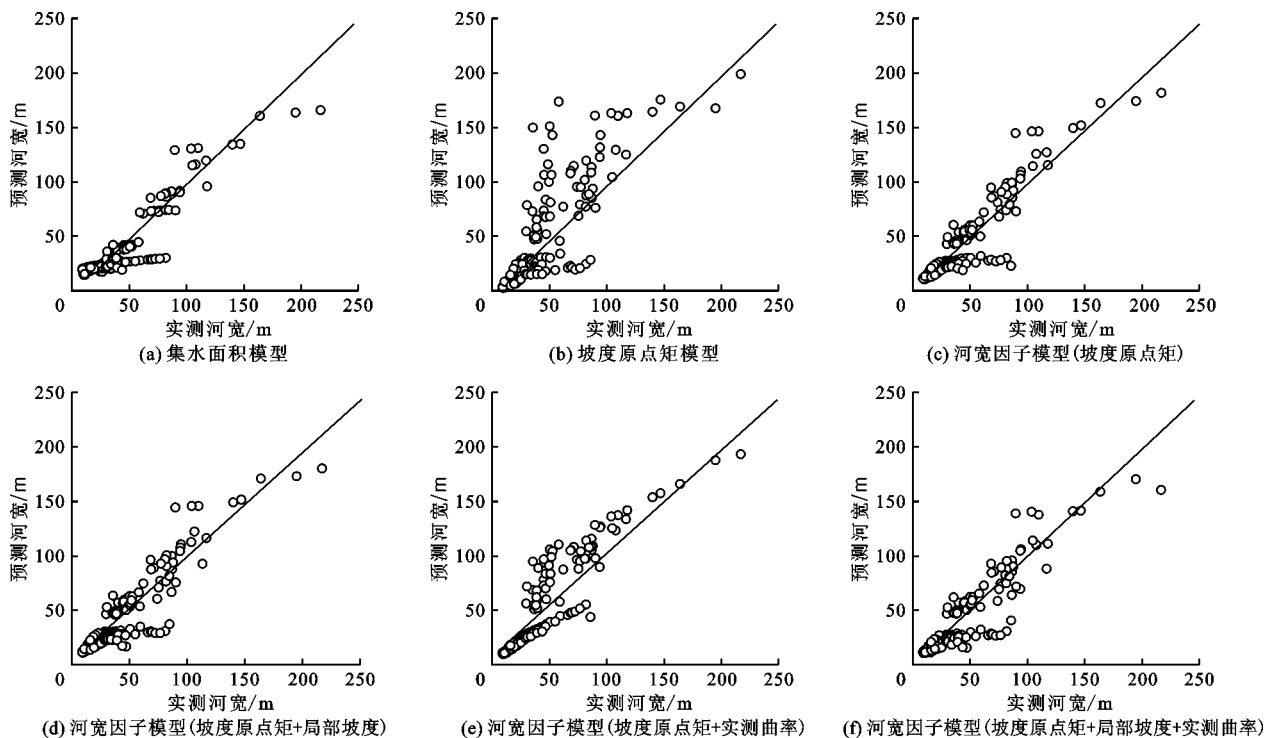


图4 模型预测河宽与实测河宽对比

4 结论与展望

本文依据 Google Earth 影像,对拉萨河流域主要河道的 1 000 个局部河段的河宽进行了测量。同时利用该流域的 DEM 数据,计算了实测点对应位置的地形要素(上游集水面积、局部坡度、坡度原点矩、河道曲率),分析了河宽与地形要素间的相关关系,基于不同要素建立了 6 种河宽预测模型并进行了验证。研究得到以下结论:

(1)拉萨河流域河宽与上游集水面积呈良好的幂函数关系,确定性系数达到了 0.92。虽然局部坡度不能很好地展现出河道地形的起伏变化,但坡度原点矩与河宽间明显存在两段不同的相关关系。以坡度原点矩表现的流域内主要河道的坡度从上游到下游先变陡后变缓,以 30 m 河宽为界拟合的两段相关关系的确定性系数均大于 0.75。尽管实测河道曲率与河宽同样存在一定相关性,但是由于使用 DEM 难以准确提取河道曲率,因此不适用于河宽预测模型的建立研究。

(2)单独使用坡度原点矩建立的河宽预测模型预测效果不佳。使用综合了集水面积和坡度原点矩生成的河宽因子构建的预测模型整体较好。对比发现在集水面积 $A < 2\,100\text{ km}^2$ 的上游较窄河段使用以坡度原点矩为局地性因素的河宽因子模型预测效

果最优,在集水面积 $A \geq 2\,100\text{ km}^2$ 的下游河段使用集水面积模型预测效果最优。

(3)拉萨河流域精确河宽模型应同时采用以坡度原点矩为局地性因素的河宽因子模型和集水面积模型,在上、下游分别使用河宽因子模型和集水面积模型以达到最高精度。该精确综合模型的平均误差在上、下游均小于 20%。此外,为追求简便性,全河道使用河宽因子模型同样不会造成太大误差。

考虑到拉萨河流域的 Google Earth 等影像全部为低水期的卫星影像和航拍影像,读取实测点时需要大量人眼判别经常性过水河道,人工判别的精度对结果易产生较大影响。因此,对青藏高原河宽的进一步研究有待无人机摄影测量等高精度雨季影像数据的推广。本研究发现的河道地形起伏自上游向下游呈先变陡后变缓的规律,与部分其他流域的已有研究成果一致^[22],表明该现象具有一定的普遍性。鉴于较多流域内集水面积、坡度原点矩(或河道比降)与河宽间的相关性最好^[6,10-12],本研究提出的基于河宽与坡度原点矩相关规律的拐点分段建模,根据集水面积模型、坡度原点矩模型及结合上述两个要素的河宽因子模型中选取最优者的河宽预测方法适合推广到其他流域。

参考文献:

[1] YAMAZAKI D, O'LOUGHLIN F, TRIGG M A, et al. De-

- velopment of the global width database for large rivers[J]. *Water Resources Research*, 2014,50(4):3467–3480.
- [2] BATES P D, DE ROO A P J. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2000,236(1–2):54–77.
- [3] 钟向宁,周买春,刘远. 河宽模型对 Muskingum–Cunge 方法汇流的影响[J]. *水力发电学报*,2014,33(5):28–35.
- [4] LU Minjiao, KOIKE T, HAYAKAWA N. Development of a distributed hydrological model using multi-step, multi-reach Muskingum–Cunge method[J]. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 1999,12(5):384–390.
- [5] 范玉燕,汪诚文,喻海军. SWMM 模型河道及明满流模拟能力分析研究[J]. *水资源与水工程学报*,2019,30(1):1–6.
- [6] 何蒙,李致家,童冰星,等. 基于 DEM 的河宽模型在山区中小流域内的构建与应用[J]. *水力发电*,2019,45(4):22–27.
- [7] ALLEN G H, PAVELSKY T M. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American river width data set[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015,42(2):395–402.
- [8] PAVELSKY T M, SMITH L C. Rivwidth: A software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008,5(1):70–73.
- [9] SUN Wenchao, ISHIDAIRA H, BASTOLA S, et al. Calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river width at the basin outlet[J]. *IAHS – AISH Publication*, 2012,352:468–472.
- [10] 谢慧民,李品涵,丁翎. 台湾西部河川宽度单变数经验公式之研究[J]. *农业工程学报*,2013,59(1):49–66.
- [11] 石书缘,胡素云,冯文杰,等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. *沉积学报*,2012,30(5):869–878.
- [12] 蒋成伟,刘金涛,林璐,等. 拉萨河流域河宽与地形结构因子相互关系分析[J]. *长江科学院院报*,2018,35(6):117–121+134.
- [13] 余国安,王兆印,刘乐,等. 新构造运动影响下的雅鲁藏布江水系发育和河流地貌特征[J]. *水科学进展*, 2012,23(2):163–169.
- [14] 杨瑞东,魏晓,文雪峰,等. 利用 Google Earth 研究构造对喀斯特地貌的控制和对碳酸盐岩系风化成土的影响[J]. *地球与环境*,2009,37(4):319–325.
- [15] ZHOU Xuewen, WANG Hongliang. Application of Google Earth in modern river sedimentology research[J]. *Journal of Geoscience & Environment Protection*, 2015,3(8):1–8.
- [16] 崔寅鹤,吴鹏飞,汪银奎,等. 栅格流向算法在山丘区水系提取中的应用评价[J]. *水力发电*,2019,45(7):18–23.
- [17] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984,28(3):323–344.
- [18] TARBOTON D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1997,33(2):309–319.
- [19] YAMAZAKI D, IKESHIMA D, SOSA J, et al. Merit hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets[J]. *Water Resources Research*, 2019,55(6):5053–5073.
- [20] HOOSHYAR M, SINGH A, WANG Dingbao. Hydrologic controls on junction angle of river networks[J]. *Water Resources Research*, 2017,53(5):4073–4083.
- [21] MCNAMARA J P, ZIEGLER A D, WOOD S H, et al. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006,224(1–2):147–156.
- [22] GRIEVE S W D, MUDD S M, HURST M D. How long is a hillslope? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016,41(8):1039–1054.