

复杂地形下降水的高空间分辨率插值方法研究

郎立晨^{1,2,3}, 唐 诚¹, 高 星², 李志慧², 吴 锋²

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 复杂地形山区降水格局在多种地形要素的综合影响下呈现出显著异质性特征, 弱化了降水站点观测资料的空间代表性, 限制了遥感及再分析产品的适用性及传统插值方法的准确性。常用的PRISM降水插值算法通过提取并权重化地形要素, 借助加权最小二乘算法对降水站点观测数据进行空间插值, 被广泛应用于降水产品制备。本文针对PRISM算法对中小地形地貌刻画能力不足的问题, 在解析影响复杂地形降水模式的地形要素的基础上, 改进了PRISM的地形要素计算与权重化过程, 同时, 考虑到实际日降水量的随机性, 将改进后的PRISM嵌入到“平均态日降水—比值”插值框架, 构建了适用于复杂地形的日降水插值算法MPRISM。随后, 以具有复杂地形特征的元江流域为例, 通过交叉验证及与ERA5-Land和TRMM_3B42降水产品的对比分析, 发现该算法具有较高的准确性与可靠性。结果表明, 在元江流域23个气象站点上, MPRISM的插值结果与观测值的相关系数、相对偏差的中位数分别为0.72、0.98%, 总体上优于ERA5-Land和TRMM_3B42日降水产品。另外, MPRISM插值结果的精度随时间变化更小, 更为稳定。最后, 研究基于MPRISM制备了空间分辨率约3 km的元江流域日尺度降水格网数据。本文可为复杂地形的陆面模式或流域水文水质模型提供高精度降水驱动场数据产品, 从而支持流域可持续管理决策。

关键词: PRISM; 复杂地形; 降水插值; 高分辨率降水产品; 干热河谷; 元江流域

DOI: 10.11821/dlxb202301007

1 引言

复杂地形山区通常是大江大河的源头, 占中国陆域面积的65%以上, 其水资源的精准评价与预测关乎水文安全、经济发展等诸多涉及生态文明建设、脱贫攻坚等时代议题的关键环节^[1]。在气候变化的背景下, 水资源的可持续管理决策, 需要考虑其组分空间分布的异质性。降水是水资源的核​​心, 降水数据是驱动陆面过程、水土污染运移、水文循环等模型的关键性变量^[2]。而高时空分辨率的降水数据作为陆地表层格局与过程模拟的重要参数, 其数据精度直接影响科学决策的信度。但是, 复杂地形山区内部存在多种地形要素对降水的空间分布产生影响, 如山体坡面对湿润气流的阻滞、抬升作用, 连绵山体之间山谷对干燥空气的聚集、通道作用。因此复杂地形山区的降水格局呈现显著异质性, 单点气象站观测值的空间代表性也受到限制。加之山地地区气象观测站因架设维护困难而分布稀疏, 导致山区普遍面临着长时序、高精度和高分辨率的气象观测数据稀缺的问题^[3]。

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2102208) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U2102208]

作者简介: 郎立晨(1998-), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士生, 主要从事流域水文与水质模拟等领域研究。

E-mail: langlichen20@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 吴锋(1979-), 男, 河北张家口人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事流域水资源管理、复杂系统建模领域的研究工作。E-mail: wufeng@igsnrr.ac.cn

大气再分析资料和遥感数据产品空间覆盖广且时间连续,近年来常被作为降水驱动的相关模型的输入数据^[4]。然而,遥感与大气再分析资料往往与地面真实数据有着较大偏差^[5],且其最高空间分辨率为 0.05° (CHIRPS)^[6],刻画降水随小尺度地形起伏变化的能力仍旧不足,难以满足流域尺度模型的精度要求。空间插值是细化降水资料的传统手段。然而,传统插值方法有些只考虑观测站点间的空间关系而忽视了高程效应,如基于观测站点空间位置关系的反距离权重法^[7]、泰森多边形法^[8]及基于观测值空间统计特征的普通克里金法^[9];有些能够考虑高程和坡向,但对地形部位不做区分,如基于多变量互作用关系的多元线性回归法^[10]、以高程作为约束项的协同克里格方法^[11]及考虑坡向和高程改进的角距加权算法^[3];特别是部分模型缺乏与先验知识的充分结合^[12-13],在观测站点稀疏、地形起伏剧烈的地区难以得到可靠的结果。

1994年Daly等提出一种能够考虑多种地形要素的插值方法PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model),并在之后的实际应用中不断丰富完善^[14-16]。该方法认为在不同地形要素组合中,高程与降水存在不同的线性关系。因此通过观测站点与待插值点所在区域地形要素的差异,调节观测站点的权重大小,控制其在线性回归过程中的重要程度。PRISM计算框架更为灵活,为所要考虑的地形要素的增减留有空间。基于该方法,Daly等生产了美国内陆地区的气温降水800 m格网数据,并一直更新维护了一套美国内陆地区4 km分辨率降水产品 (<http://www.prism.oregonstate.edu/>)^[16]。此外,PRISM还在重庆市、江西省等地区的降水插值数据制备上取得了较好的结果^[17]。PRISM除带来高精度山区降水插值结果之外,其算法中提出的地形要素如坡向、高程的参数化方法也广泛被后续研究借鉴延用,主要涉及降水插值方法的开发及降水产品的校正^[3, 18]。但是,考虑地形条件的复杂性及观测站点数据的稀疏性,目前PRISM算法仍存在两个不足。第一,PRISM算法用有效地形高度表征地形部位,但其计算所涉及到的用户自定义参数需要通过集合测试确定,该过程难以推广,导致地形部位要素在后续应用中被忽略。但是,当研究区域为包含多个山体及地形起伏较大的流域,如果不对其进行识别,PRISM算法会将处于不同地形部位的观测站点包括进降水与高程关系的回归中,为本就稀少的观测站点数据引入无关信息。朱华忠等在验证了Daly等基于PRISM生成的中国 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 逐月降水数据后也发现PRISM在山区的降水模拟结果略差,建议进一步考虑中小地形地貌对降水季节变化的影响^[19]。同时,因为算法的不准确很可能是用户自定义参数选取不当导致的,因此有效地形高度的确定方法也为算法本身的精度评价引入了不确定性。第二,实际日降水相对于多年平均值具有随机噪声,因而实际日降水与高程的线性关系往往不显著,这一点在PRISM算法中未予考虑。

美国加利福尼亚州及中国西南青藏高原周边等热带、亚热带山区的山谷下部受山体阻滞作用影响形成的干旱少雨的“雨影区”,被称为干旱河谷。中国干旱河谷根据不同的自然地理区及热量条件,还可分为干热河谷、干暖河谷和干温河谷。其中,干热河谷是指山谷下部与周围区域相比呈现出明显“干”“热”特征的纵伸深切河谷,主要分布在西南金沙江支流、雅砻江和元江^[20]。其中,元江流域内河谷与相邻山脊区域多年降水均值相差可达1500 mm,是复杂地形影响下降水在空间上呈现强烈异质性的典型代表。降水不足导致的脆弱生态环境严重威胁干旱河谷区的农业及生态系统的可持续发展。而相比于干旱河谷,干热河谷的干旱与高温协同作用,造成的威胁比干旱或高温单一因素作用更为严重^[21]。在人类干扰的不断加强以及极端气候事件可能增多的背景下^[22],这种威胁还可能进一步加剧^[23]。干热河谷区尤其需要高分辨率降水资料,为区域生态环境的现状评估和趋势预测提供科学支撑。但是,目前中国西南干热河谷区降水数据多采用观测站点

数据和粗分辨率的格网数据产品^[24-28]。降水驱动的陆面过程模型在干热河谷区的应用尚未得到深入研究,降水数据产品的局限性也尚未得到重视。

鉴于此,本文以元江干热河谷区的元江流域为例,针对目前PRISM存在的第一个不足,结合复杂地形影响局地降水模式的机制及特征,将原PRISM算法中有效地形高度参数拆分为大尺度地形起伏度和小尺度地形起伏度两个参数,提升了PRISM刻画中小尺度地形地貌的能力;考虑目前PRISM存在的第二个不足,将改进后的PRISM嵌入“平均态日降水—比值”插值框架;构建了适用于复杂地形下日降水高空间分辨率插值的算法MPRISM (Modified PRISM-Ratio of actual to mean daily precipitation)。随后基于“留一法”交叉验证及与ERA5-Land和TRMM_3B42降水产品的对比分析,检验了MPRISM算法的可靠性与插值结果准确性。最后生成了2000—2018年元江流域首个空间分辨率约3km的逐日高分辨率降水数据集,以期为陆面过程模型的应用提供数据支撑。

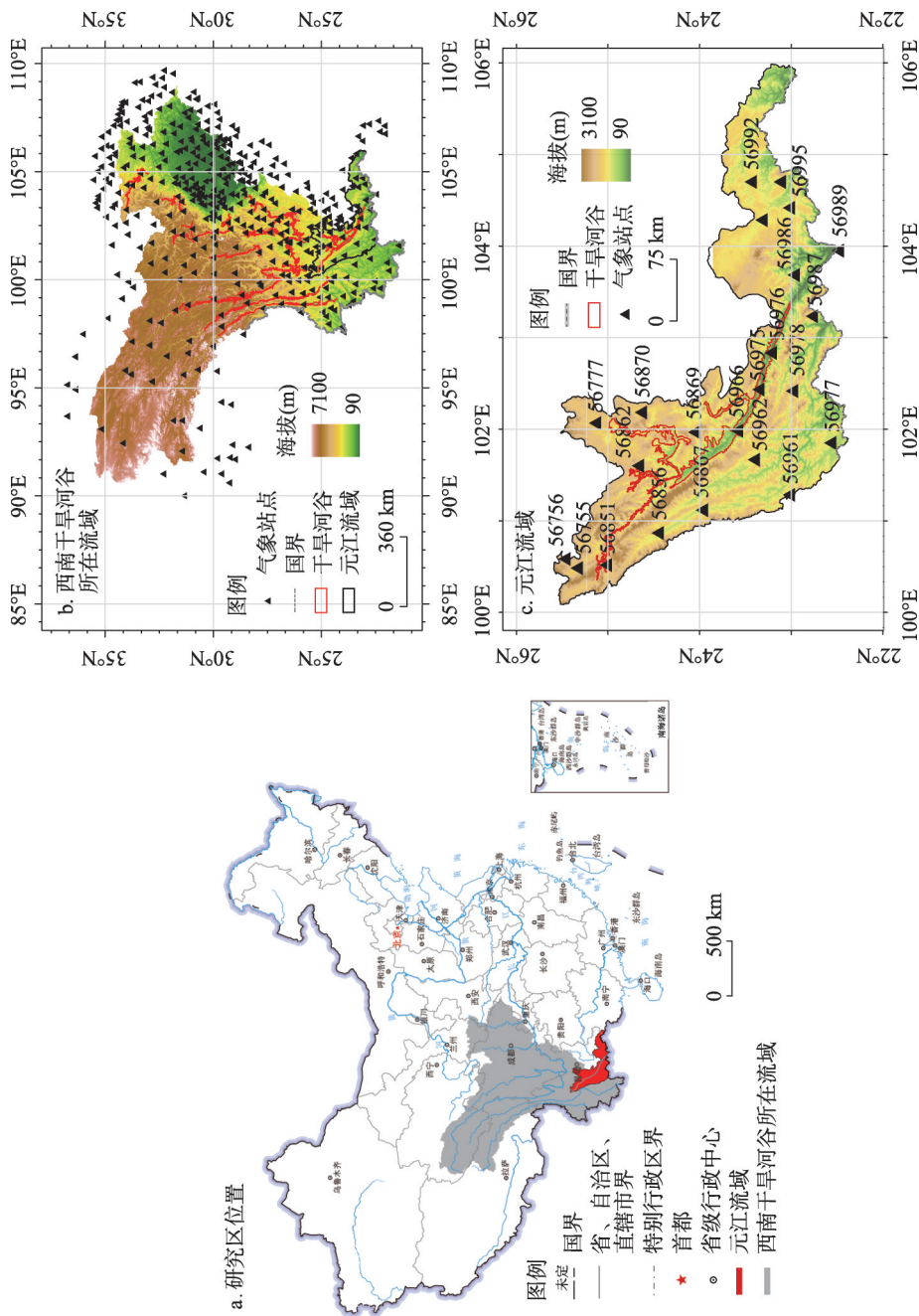
2 数据来源及研究方法

2.1 研究区概况

中国西南干旱河谷是横断山区及其南延山系一种独特的自然景观和生态系统类型,沿怒江、澜沧江、元江、金沙江及其支流雅砻江等河谷的部分地段分布^[20]。其中,元江位于中国云南省境内,是国际性河流红河上游的主要干流。元江流域面积占红河流域面积的45%,地理位置处于22.5°N~25.5°N、100.0°E~106.0°E(图1a)。流域整体地势自西北向东南倾斜,高差可达1500 m;西北—东南走向的山脉与山谷相间分布,构成了对湿润气流运动产生剧烈影响的“地形波”,其中哀牢山平均海拔最高,与其北侧元江干热河谷的脊—谷差最大达到1600 m。流域总体上属于亚热带气候,年降水量在1230 mm左右,时间和空间分配都相对不均。从时间分布上看,元江流域年内降水分为明显的干湿两季,85%的降水集中在湿季;从空间分布上看,在水平与垂直地带性的影响下,元江流域降水总体呈由河谷向山脊、由上游至下游递增的趋势,海拔2800 m左右的哀牢山区与海拔900 m以下的哀牢山北麓平均年降水量相差达1300~1400 mm,元江发源地巍山县与下游河口县年平均降水量相差近750 mm。同样受气候区及地形影响,元江流域河谷地区气温较高,年平均气温24.7℃,最高气温43.7℃,全年有100 d以上温度超过35℃(中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站2012年1月至2017年12月观测结果)。因此,元江流域的干旱河谷可以被进一步归为干热河谷。河谷区极端气候条件造成了脆弱的生态环境,而在河谷外,人类扰动较少,拥有众多的自然保护区,为大量野生动植物提供了栖息地。

2.2 数据来源

本文所需数据主要涉及气象观测数据和高程地形数据。气象观测数据来自中国地面气候资料日值数据集,时间跨度为1951—2018年,日值数据的记录时间为前一日12时至当日12时(UTC)。该数据集在全国共有2480个气象站点,但其分布不均,在高原山区分布稀少,分布在元江流域的仅有23个,其中位于干热河谷谷底的站点仅有3个(图1c)。鉴于此,本文扩大了参与插值的站点的选取范围,最终选取中国西南地区干旱河谷所在流域内及周边共458个气象站点(图1b)。中国西南地区干旱河谷边界来自范建容等^[29]。流域划分边界数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)。数字高程模型(DEM)是提取地形特征信息的基础资料,本文采用来自NASADEM的30 m高程数据。该数据发布于2020年2月,是对SRTM(Shuttle Radar Topography



注：图a基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1606号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1 中国西南干旱河谷所在流域及元江流域地理位置及其气象站点分布
Fig. 1 Geographical location of the river basin with arid valleys of Southwest China and Yuanjiang River basin and the spatial distribution of the meteorological observation stations

Mission) 原始传感器观测值的再处理数据 (<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>), 数据质量较SRTM有明显提升。

为了对本文数据产品精度进行验证分析, 研究选取ERA5-Land (Enhanced global dataset for the land component of the 5th generation of European ReAnalysis) ^[30-31]和TRMM_3B42 (TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree) ^[32-33]数据集作为对比。前者由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 对第五代全球大气再分析数据集 (ERA5) 进行融合生成。ERA5系列产品提供了1950年至今的小时尺度全球降水数据, 是目前时间跨度最长的高时空分辨率大气再分析产品, 已经被广泛应用于相关模型并取得了良好的模拟结果^[34-35]。ERA5-Land数据在ERA5数据基础上进行了一系列改进, 将空间分辨率从约31 km提升到了约9 km。与结合物理过程和地面站点观测数据同化生成的大气再分析资料不同, 遥感降水产品由卫星的对地观测数据反演生成。TRMM是全球第一颗搭载测雨雷达的卫星, 由美国国家航空航天局 (NASA) 和日本空间探索中心 (JAXA) 共同发射, 其多卫星降水分析 (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis, TMPA) 产品TRMM_3B42版本融合了微波和红外降水传感器观测值以兼顾时间和空间分辨率。其他遥感降水观测数据还包括TRMM的下一代GPM (Global Precipitation Measurement), 代表产品为IMERG-F (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM-Final); 结合多颗卫星观测值的GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation), 代表产品为GSMaP-GAUGE (GSMaP gauge-adjusted); 以及中国的风云FY-2 (FengYun-2) 等。Yuan等针对TRMM、GPM、GSMaP的降水产品在缅甸开展的两次对比研究表明, TRMM_3B42数据精度相对较高^[36-37]。此外, TRMM系列数据具有时间序列长 (1997.12.31—2020.01.01) 的优势。因此, 考虑元江流域与缅甸邻近, 且具有相似地形与气候条件, 本文选择TRMM_3B42数据作为遥感降水产品的代表 (表1)。

表1 大气再分析和遥感降水产品信息
Tab. 1 Information of climate reanalysis and remote sensing precipitation products

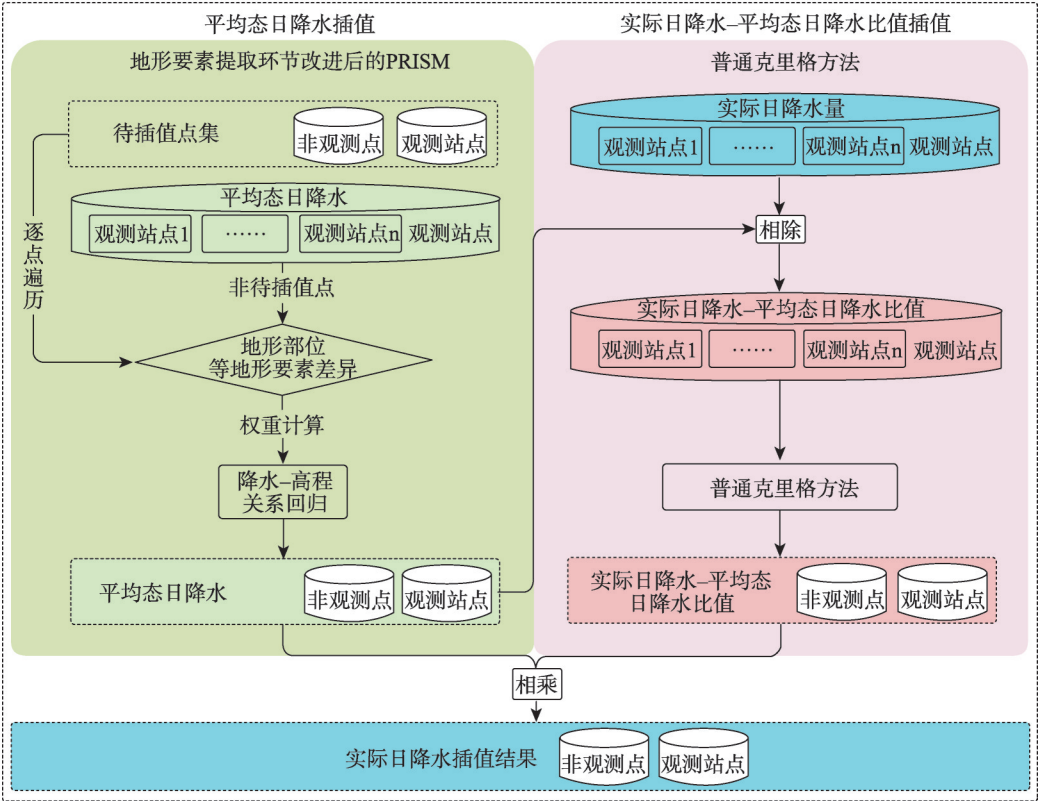
产品名称	时间分辨率	空间分辨率	数据来源	时间跨度	参考文献
ERA5-Land	1 h	0.1°×0.1°	大气再分析资料	1950.01.01 至今	[30-31]
TRMM_3B42	3 h	0.25°×0.25°	遥感产品	1997.12.31—2020.01.01	[32-33]

2.3 研究方法

由于实际日降水相对于多年平均值具有随机噪声, 因而MPRISMR算法在插值生成降水日值数据前, 将观测站点日降水数据处理成两部分, 分别是多年平均气候态日降水 (后简称平均态日降水) 和实际日降水与平均态日降水插值结果的差值或比值。相较差值的空间分布而言, 比值的空间分布更均匀且变幅更小^[3, 38]。因此, 本文选择计算实际日降水与平均态日降水插值结果的比值 (后简称比值), 用改进后的PRISM算法插值平均态日降水, 普通克里格方法插值比值, 构成MPRISMR插值算法框架, 其流程概念图如图2所示。

在以元江流域为例的2000—2018年日降水插值过程中, MPRISMR的具体应用流程如下。首先计算各观测站点2000—2018年多年日降水观测数据的多年平均日降水, 然后对其进行傅里叶变换, 定义前6个谐波成分为2000—2018年的平均态日降水, 接着用改进后的PRISM算法对其沿年内日时间序列做空间插值, 然后计算观测站点上实际日降水与平均态日降水插值结果的比值, 采用普通克里格方法对生成的比值做空间插值, 最终用插值后的平均态日降水与插值后的比值相乘, 得到实际日降水插值结果。在

MPRISMR插值算法框架



注：蓝色背景框表示实际日降水观测值或插值结果,绿色背景框表示由观测值计算或插值得到的平均态日降水,粉色背景框表示实际日降水—平均态日降水比值。

图2 MPRISMR插值算法框架概念图

Fig. 2 Conceptual workflow of MPRISMR interpolation algorithm

MPRISMR 插值算法框架下，本文重点介绍 MPRISMR 算法对 PRISM 算法的改进和最终插值结果验证的方法。

2.3.1 PRISM 算法及 MPRISMR 对其地形要素提取环节的改进 利用 PRISM 结合先验知识的降水空间插值，关键在于识别影响降水模式的地形要素，基于待插值点与观测站点在各地形要素上的差异，给每一个观测站点生成一个综合权重，再利用加权最小二乘法（Weighted Least Square, WLS）进行高程—降水关系的加权线性回归，WLS 具体公式为：

$$y = \beta_1 x + \beta_0 \tag{1}$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2}, \quad \beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \tag{2}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{3}$$

式中： y 为待插值点降水量； x 为待插值点的高程； β_1 为斜率； β_0 为截距；

$x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个观测站点的高程; $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个观测站点的降水量; \bar{x} 为所有观测站点高程均值; \bar{y} 为所有观测站点降水量均值; $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为观测站点 i 的综合权重。综合权重 w_i 的确定建立在 对影响复杂地形降水模式的关键地形要素参数的识别与分析的基础上。

(1) 影响复杂地形降水模式的地形要素分析

复杂地形中与降水量分配相关的地形要素可以概括为高程、坡向及地形部位。地形部位可以通过大尺度地形起伏度和小尺度地形起伏度表征。大尺度与小尺度的区别在于能否识别出山谷、河谷和山脊等高程突变的区域。大尺度地形起伏度区分山区或平原, 而小尺度地形起伏度刻画山区内部地形部位的分布, 识别深入谷底的程度。地形部位对降水模式的影响在干热河谷中有着良好体现。以元江流域为例, 具体而言, 湿季干热河谷区受来自印度洋的西南季风控制, 在海拔 3000 m 以下主要有东南和西南两股暖湿气流。其中, 前者在西北—东南走向的河谷“通道”中畅通无阻地北上, 随地势抬升在高原内部形成降水, 河谷降水相应减少^[39]。后者由于垂直于岭谷延伸的方向 (图3①), 在岭谷纵向相间构成的地形波作用下, 于山体迎风面被抬升, 在迎风面及山顶形成降水 (图3②), 同时挤压干热气流向山谷, 在背风坡形成“焚风”效应 (图3③)。这些干热气流一部分在河谷与山岭的巨大高差下被封闭在凹陷的地形中, 于谷地内部形成局地环流 (图3④); 另一部分从谷地另一侧散溢, 继续向东北运动 (图3⑤)^[40]。这些因素使得湿季河谷下部呈现与周围地区差异巨大的干燥气候, 也使得干热河谷区降水模式的影响因素在流域内呈现空间异质性, 如地形部位处于山体中上部的区域降水与坡向相关, 迎风坡较多, 而背风坡受焚风影响降水较少; 但地形部位处于谷地下部的区域在干热气流局地环流的作用下, 降水基本不受坡向影响。

基于上述分析, 当观测站点与待插值点间存在较大的地形部位差异, 观测站点的权重会相应减小。这类差异包括两站点分属平原和山区 (大尺度地形起伏度差异大); 观测站点与待插值点同属山区的谷地上部 (大、小尺度地形起伏度相近), 但所处坡向不同; 及观测站点与待插值点分属谷地下部和上部 (小尺度地形起伏度差异较大) 3 种情形。

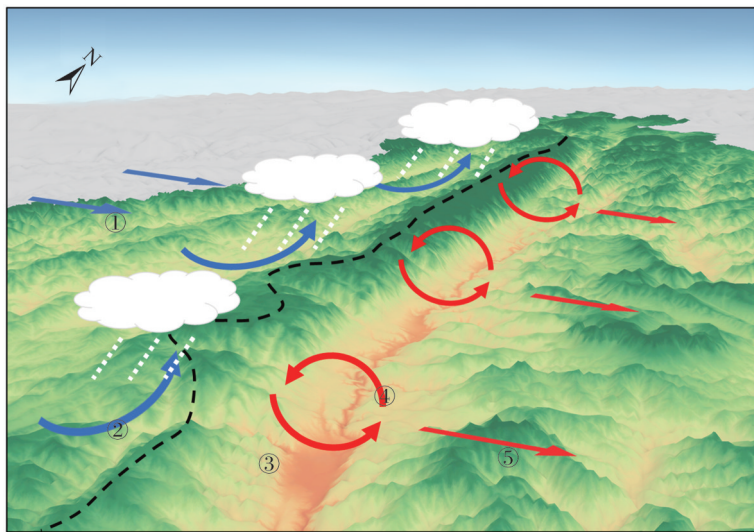


图3 地形部位要素影响降水过程概念图

Fig. 3 Conceptual illustration of the effect of topographic location factors on precipitation formation process

(2) 影响复杂地形降水模式的地形要素提取

本文基于DEM提取高程、坡向、大尺度地形起伏度、小尺度地形起伏度4个地形要素，进行观测站点的综合权重计算。地形要素的空间尺度影响着对某站点进行邻域统计的范围。本文用不同带宽的旋转对称的高斯低通滤波器进行邻域统计，带宽越大，站点周边考虑的空间范围越广，提取的地形要素的空间尺度越大^[16]。

为计算不同尺度地形起伏度或地形部位，2008年Daly引入有效地形高度对美国大陆的降水进行插值（表2）。理论上，有效地形高度的引入是为了区分山谷、平原与山地^[15]。然而，由于Daly等当时的插值区域面积过大，提取有效地形高度的相关用户自定义参数是通过穷举实验多种参数组合确定的^[15]。由于上述过程难以推广，从而导致在PRISM模型的评价、对比和实际应用的众多研究中，有效地形高度被直接省略^[13, 41-43]。实际上，在流域尺度，大尺度和小尺度地形起伏度的提取可以基于对流域地形地貌的认识直接确定。因此，本文结合对复杂地形下降水空间异质性形成原因的分析，对原方法计算地形部位的环节进行改进，即将有效地形高度拆分为大尺度地形起伏度和小尺度地形起伏度，分别

表2 改进前后PRISM地形部位参数物理意义、提取方法及权重化方法对比

Tab. 2 Comparison of original and modified PRISM in aspects of the physical meanings, extraction methods, and weighting methods of topographic location parameters

方法	PRISM	MPRISM	
地形部位参数	有效地形高度	大尺度地形起伏度	小尺度地形起伏度
物理意义	地形部位(谷地、平原/山地)及其延伸效应	大尺度地形部位(平原/山地)及其延伸效应	小尺度地形部位(谷地上部/下部)
提取方法	步骤1: 遍历网格点提取周边半径 <i>a</i> 内高程最小值作为像元值, 生成栅格A 步骤2: 以半径 <i>b</i> 对栅格A每个像元值进行平滑, 生成栅格B 步骤3: 用原DEM减去栅格B, 生成栅格C 步骤4: 以半径 <i>b</i> 对栅格C每个像元值进行平滑, 生成栅格D 步骤5: 以半径 <i>b</i> 对栅格D每个像元值进行反距离权重平滑, 生成栅格E 步骤6: 逐像元对比栅格D和栅格E, 取最大值, 生成最终参数栅格 半径 <i>a</i> 和半径 <i>b</i> 通过集合测试确定	沿用PRISM算法的有效地形高度提取方法, 但提取过程中半径 <i>a</i> 等于插值流域内拥有最大脊—谷差的谷地—山脉总宽度, 半径 <i>b</i> 等于 <i>a</i> /2	步骤1: 遍历网格点提取周边半径 <i>c</i> 内高程平均值作为像元值, 生成栅格F 步骤2: 用原DEM减去栅格F, 生成栅格G 半径 <i>c</i> 为最深山谷两侧山脊平面最短距离/2
	$I_{3D} = \begin{cases} 1, & h_c \geq h_3 \\ \frac{h_c - h_2}{h_3 - h_2}, & h_2 < h_c < h_3 \\ 0, & h_c \leq h_2 \end{cases} \quad (4)$	沿用公式(4)~(5), 但式中 <i>h</i> ₂ 为平原的最大脊—谷差, <i>h</i> ₃ 为山地的最小脊—谷差	$I_{PNTd} = \begin{cases} 0, & I_{PNTi} < 0; I_{PNTm} < 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$
权重计算	$W_i = \begin{cases} 1, & I_{3Di} = 1 \\ \frac{1}{(100 I_{3Di} - I_{3Dm})^{0.5(1 - I_{3Di})}}, & 0 < I_{3Di} < 1 \end{cases} \quad (5)$ <p>式中: <i>h</i>₂和<i>h</i>₃通过集合测试确定</p>	$W_p = \frac{1}{\Delta I_{PNT}^{c_p}} \quad (7)$	

注: 在元江流域内,流域脊—谷差最大达到1600 m,山脉—河谷的平面宽度在30 km左右,因此,选择比该宽度略大的半径*a*,本文选取50 km,在第一次寻找最小高程后,山地及相邻河谷对应的区域像元值均为河谷最低点的值;用DEM减去该结果,能够得到包含脊—谷差的影像,也就是内部的地形起伏程度。计算小尺度地形起伏度的最小高程搜索半径为河谷两侧平行山脊的平面最短距离,步骤1和步骤2能够使得河谷上半部分被赋予正值,河谷下半部分被赋予负值;权重计算中*I*_{3D}为大尺度地形起伏度(有效地形高度)作为坡向的指数项,*I*_{3Di}和*I*_{3Dm}分别代表待插值点和观测站点的有效地形高度(大尺度地形起伏度)指数;*I*_{PNTd}为小尺度地形起伏度要素作为坡向的指数项,*I*_{PNTi}和*I*_{PNTm}分别为观测站点和待插值点小尺度地形起伏度计算值,Δ*I*_{PNT}为观测站点与待插值点的小尺度地形起伏度计算值之差,*c_p*为小尺度地形起伏度权重指数。

对应大尺度(平原、山地)和小尺度地形(山脊、山谷)。改进后的方法所涉及的自定义参数物理意义明确,是基于对研究区地形特征分布的认识直接确定(表2),而非穷举法确定。

(3) 综合权重计算

基于4种地形要素的分布图,进一步提取待插值点及观测站点上相应的地形要素栅格值。针对每一个待插值点,研究根据其与观测站点在这些地形要素值上的不同对观测站点赋权重。综合权重值是待插值点与观测站点间地形要素差异的数字化体现。除提到的四个地形特征之外,MPRISMR算法还考虑了海拔差异、距离差异以及观测站点聚类权重(观测站点分布不均)对综合权重值的影响。具体的综合权重计算公式如下:

$$w_i = W_c(F_d W_d^2 + F_z W_z^2)^{1/2} W_f W_t W_p \quad (8)$$

式中: $w_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为观测站点 i 的综合权重; W_c 为观测站点聚类度权重; F_d 和 F_z 为用户定义的距离和高程重要性因子; W_d 和 W_z 分别代表距离和高程权重; W_f 为坡向权重; W_t 代表大尺度地形起伏度权重; W_p 为小尺度地形起伏度权重。其中, W_c 、 W_d 、 W_z 的计算方法与Daly等方法^[16]一致(表3)。同时,MPRISMR算法为改进后的地形要素,即大尺度和小尺度地形起伏度,建立了相应权重 W_t 、 W_p 计算方法(表2)。

由(1)和(8)式可以看出,调节权重的作用在于两方面,一是通过减小或增大观测站点的综合权重,调节观测站点在线性回归中的重要性;其次是通过增大或减小某综合权重分量值在所有观测站点间差异,调节对应权重要素在判断待插值点与观测站点间相似度过程中的重要性。此外,MPRISMR算法还在Daly等方法^[16]的基础上添加了对迎风、背风坡的判断,坡向权重 W_f 的计算方法如下:

$$W_f = \begin{cases} 1, & \text{观测站点与待插值点同在迎风坡/背风坡} \\ \frac{1}{\Delta f^{c_f}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$c_f = C_f I_{3D} I_{PNTd} \quad (10)$$

式中: Δf 为两点间坡向的差异; c_f 为坡向权重指数; C_f 为用户定义的初始坡向权重指数; I_{3D} 为大尺度地形起伏度要素作为坡向的指数项; I_{PNTd} 为小尺度地形起伏度要素作为坡向的指数项; I_{3D} 和 I_{PNTd} 的计算方式见表2。可见,当观测站点和待插值点均处于谷地时, I_{PNTd} 为0,使得观测值点与待插值点间的坡向权重与两者坡向差异无关,恒为1。

对每一观测站点计算上述各要素权重后,代入式(8)中,可以得到每个观测站点的综合权重,代入公式(1)计算得到待插值点的降水—高程线性关系公式,代入待插值点高程后,即可得到待插值点的降水量。

表3 MPRISMR算法综合权重组分的物理意义、计算方法及权重化方法

Tab. 3 Physical meanings, calculation method and weighting method of the comprehensive weight components in MPRISMR

考虑要素	物理意义	计算方法	权重化方法
距离	观测站点与待插值点相距的平面距离	-	[16]
观测站点聚类度	观测站点分布不均匀导致不同地形被代表程度不同	[16]	[16]
高程	观测站点与待插值点像元所在一定范围内的高程均值间的差异	[16]	[16]
坡向	观测站点与待插值点像元所在一定范围内的整体坡向间的差异	[16]	公式(9)、公式(10)
大尺度地形起伏度	考虑延伸效应的观测站点与待插值点所在大尺度地形部位(平原/山地)差异	[16]	[16]
小尺度地形起伏度	观测站点与待插值点所在小尺度地形部位(谷地上部/下部)差异	公式(6)	公式(7)

2.3.2 日降水插值结果验证 本文首先采用“留一法”对MPRISMR算法的降水插值结果进行交叉验证,该方法通过将观测站点视作日降水量未知的待插值点,对比其实际观测值与插值结果,以验证插值结果准确性。“留一法”的具体做法如下,首先对元江流域内每个观测站点,分别用其他所有站点插值生成该观测站点的日降水量,然后借助评价参数,结合观测站点的实际观测值评价插值结果。本文选取了两种评价参数,一种用于评价估计值与真实值的拟合程度,分别是相关系数(Pearson's correlation coefficient, CC)、平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)、相对偏差(Relative bias, RB)以及纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)(表4);一种用于评价估计值对降水事件的预报准确性,即综合性参数FSC(表5)。此外,为将结果与ERA5-Land及TRMM_3B42产品进行对比,本文试验了3种提取站点对应降水格网产品的方法,分别是提取最近点,提取周边4个点的均值和周边9个点的均值。与站点观测数据比对应后显示,提取最近点降水产品的结果与实际观测数据CC最大, RB最小,故其被选作最终的降水格网数据提取方法。

3 结果与分析

3.1 元江流域降水异质性特征

基于元江流域23个气象观测站点降水数据分析发现,该流域降水具有较显著的空间异质性。对比哀牢山脉及其南延东、西两侧共8个观测站点2000—2018年各年平均降水量统计箱图(图4)发现,位于哀牢山西南侧的4个站点年平均降水量的中位数由西北纬度高向东南纬度低的地区逐渐增大,北端站点56856与南端站点56978的年平均降水量中位数相差可达900 mm。对比纬度相近但分处哀牢山脉南延东、西两侧的观测站点年平均降水量中位数,位于西侧的站点56962年平均降水量中位数达到1250 mm,但位于东侧河谷底部的站点56966及56975降水量仅为750~1000 mm,体现出河谷区干旱的特征。此外,位于哀牢山以东,但不处于干旱河谷内的站点56862、站点56869的年平均降水量同样较小,表明干热空气自河谷较低一侧向东北方向散溢。

表4 日降水插值结果、产品验证评价指标
Tab. 4 Verification evaluation index of daily precipitation interpolation results and products

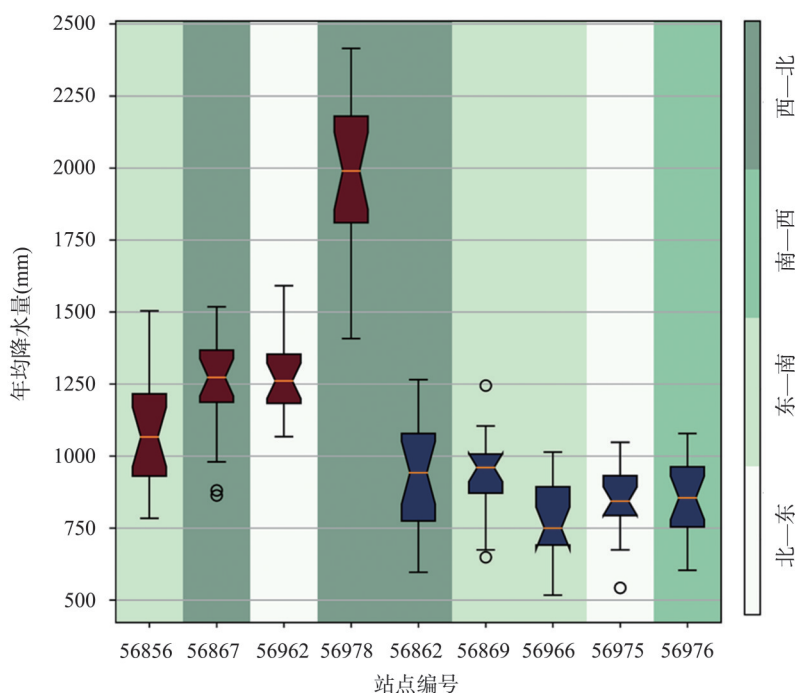
参数及计算公式	含义	推荐值
$CC = \frac{(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{(O_i - \bar{O})^2(S_i - \bar{S})^2}}$	降水实测值与估计值的线性相关系数	1
$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i - O_i $	估计值相对实测值的平均绝对误差	0
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	刻画估计值与实测值之差与实测值方差的相对值,值越大,误差占比越小,两者分布越贴合1:1线	1
$RB = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100\%$	估计值相对观测值的偏差	0

注: $S_i(i=1, 2, \cdots, N)$ 代表第*i*个估计值; \bar{S} 为估计值的平均值,代表第*i*个观测值; \bar{O} 为观测值均值。

表5 二值化日降水估计评价指标
Tab. 5 Evaluation index of binarized daily precipitation estimation

指标及公式	含义	推荐值
$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$	正确预测降水发生占降水事件的比	-
$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$	预测降水发生中准确的概率	-
$FSC = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$	以上两指标的综合	1

注: TP 代表观测与待验证数据均为降水; FP 代表观测数据显示当日无降水但待验证数据显示降水; FN 代表观测数据显示降水但待验证数据显示当日无降水; TN 代表观测数据与待验证数据均显示当日无降水;降水超过0.1 mm/d视为降水。



注: 图中位于哀牢山山脉西南侧的站点用红色标识, 位于东北侧的站点用蓝色标识。

图4 2000—2018年元江流域干热河谷区哀牢山两侧观测站点平均降水量对比

Fig. 4 Boxplot of average annual precipitation at meteorological observation stations on both sides of the Ailao Mountains in the dry hot valley area of the Yuanjiang River Basin from 2000 to 2018

3.2 基于MPRISMR算法的平均态日降水插值结果验证

本文计算并提取高程、坡向、大尺度地形起伏度、小尺度地形起伏度四个地形要素, 随后遍历待插值点, 根据权重计算公式对每一个待插值点形成观测站点权重集合。流域内23个站点上的综合权重赋值情况表明, 综合权重能够识别出站点在大尺度和小尺度地形起伏上的差异。例如, 当待插值点为位于河谷的站点56966时, 部分位于河谷区的站点权重较大, 证明综合权重具有区分不同站点所处小尺度地形起伏度的能力; 位于平原地区的站点权重较小, 证明综合权重具有区分不同站点所处大尺度地形起伏度的能力(图5)。基于综合权重集合, 研究首先采取“留一法”, 用MPRISMR算法计算了元江流域23个观测站点的平均态日降水, 并根据观测站点观测值计算得到观测站点“留一法”平均态日降水插值结果的CC、RB(图6)。其中, CC在整个流域均达到0.92以上, 但RB绝对值在下游处略大, 表明在下游存在30%左右的低估, 这是因为该流域下游一边为国界线, 而观测站点仅限国界线以内。总体而言, 具备高度可解释性的MPRISMR插值方法能够通过综合权重考虑复杂下垫面中的多种地形要素, 这是其相比于其他插值方法的优势。

3.3 基于MPRISMR算法的实际日降水插值结果验证

根据本文的MPRISMR算法流程, 得到平均态日降水插值结果后, 计算观测站点上实际日降水与平均态日降水插值结果的比值, 然后, 研究采用普通克里格方法对生成的比值再做空间插值, 最终, 研究采用插值后的平均态日降水与插值后的比值相乘, 得到实际日降水的高空间分辨率插值结果。本文采用“留一法”对生成的元江流域内23个观

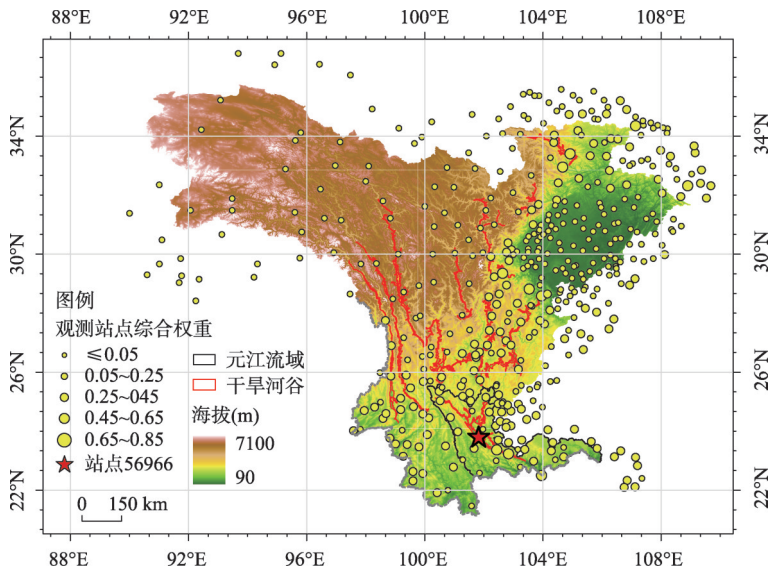


图5 元江流域待插值站点为位于河谷位置时(星型标注站点)其他观测站点综合权重赋值
Fig. 5 The assigned comprehensive weights of other observation stations when the station interpolation point (labelled with red star) to be interpolated is located in the valley in the Yuanjiang River Basin

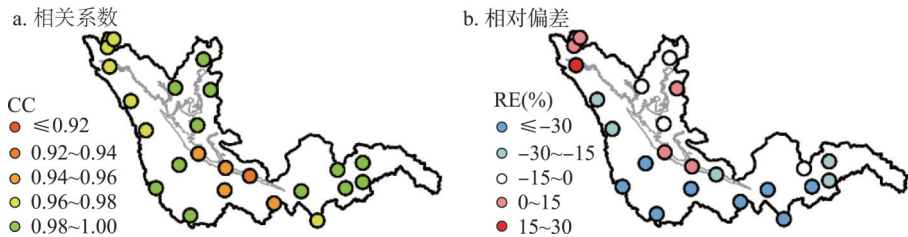


图6 基于MPRISMR算法的元江流域观测站点平均态日降水插值结果验证评价参数空间分布
Fig. 6 Spatial distributions of the verification evaluation index results of the mean daily precipitation interpolation results on observation stations in the Yuanjiang River Basin based on MPRISMR

测站点实际日降水结果进行验证，并与ERA5-Land、TRMM_3B42降水产品进行比对分析。结果表明，本文降水插值结果表现良好，其CC值在0.53到0.81之间，平均为0.71；RB绝对值的中位数为11%；NSE在12个站点上大于0.5，最低值为0.27；FSC平均值为0.78（表6）。Zhang等考虑坡向和高程改进角距加权算法，基于更密集的观测站点生成了1984—2012年黑河流域日降水插值数据，在验证阶段有11个站点的CC小于0.5（共33个站点）。相比之下，本文方法形成的降水插值结果在CC上更具稳定性^[3]。各数据产品及插值结果验证评价指标的平均值和中位数表明，本文的降水插值结果优于ERA5-Land和TRMM_3B42降水产品。其中，ERA5-Land表现最差，其CC平均值为0.58，RB最高达到98%，FSC平均为0.66（图7）。此外，通过箱图的分散程度表征的各站点之间评价指标数值上的差异也体现了数据精度的稳定性，ERA5-Land和TRMM_3B42两种全球降水产品在CC、MAE、RB上的最大最小值区间要小于本文的降水插值结果（图7），凸显了两种降水产品在大尺度稳定性上的优势，但其难以反应局部区域上的空间异质性。

此外，为探究本文实际日降水插值结果在不同时期的表现，进一步绘制了23个站点3种日降水产品在12个月、4个季节、干季（11月至次年4月）与湿季（5月至10月）的

表6 元江流域23个观测站点基于MPRISMR算法的“留一法”实际日降水插值结果及ERA5-Land、TRMM_3B42降水产品验证评价参数结果

Tab. 6 Result of evaluation and verification index of actual daily precipitation interpolation results based on MPRISMR and "leave-one-out" method, and precipitation products of ERA5-Land and TRMM_3B42 over 23 stations in the Yuanjiang River Basin

站点编号	CC				RB(100%)				MAE(mm)				NSE				FSC				
	MPRISMR		ERA5		TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	
	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM	MPRISMR	ERA5	TRMM
56755	0.81	0.64	0.69	0.05	0.34	0.23	1.35	2.27	2.05	0.66	0.36	0.27	0.78	0.63	0.72						
56756	0.78	0.56	0.69	0.03	0.23	0.18	1.46	2.69	2.09	0.61	0.34	0.29	0.75	0.63	0.69						
56777	0.75	0.58	0.72	-0.12	0.13	-0.08	1.78	2.75	2.02	0.55	0.29	0.50	0.77	0.61	0.72						
56851	0.74	0.60	0.66	0.29	0.69	0.26	1.75	3.29	2.09	0.52	0.17	0.13	0.73	0.71	0.69						
56856	0.68	0.62	0.69	-0.08	0.38	0.02	2.29	2.62	2.50	0.47	0.32	0.41	0.80	0.66	0.74						
56862	0.74	0.57	0.70	-0.02	0.21	0.03	1.89	4.17	2.13	0.55	0.36	0.41	0.76	0.70	0.70						
56867	0.67	0.59	0.65	-0.13	0.53	-0.06	2.67	2.88	2.85	0.44	0.17	0.36	0.79	0.63	0.77						
56869	0.74	0.57	0.65	0.08	0.37	0.05	1.94	2.77	2.29	0.53	0.23	0.30	0.77	0.60	0.73						
56870	0.74	0.58	0.67	0.02	0.47	0.10	1.62	4.11	1.99	0.54	0.24	0.35	0.75	0.69	0.72						
56961	0.71	0.56	0.58	0.08	0.40	-0.09	3.10	3.37	3.60	0.49	0.25	0.23	0.82	0.58	0.76						
56962	0.70	0.59	0.64	-0.12	0.48	-0.07	2.60	3.37	2.95	0.48	0.16	0.31	0.81	0.60	0.77						
56966	0.70	0.55	0.69	0.34	0.91	0.31	2.09	3.00	2.24	0.47	0.06	0.30	0.73	0.58	0.72						
56975	0.75	0.56	0.67	0.37	0.82	0.19	2.11	5.59	2.29	0.52	0.13	0.27	0.76	0.75	0.71						
56976	0.72	0.57	0.64	0.52	0.47	0.40	2.40	5.43	2.62	0.42	0.14	0.03	0.73	0.74	0.72						
56977	0.62	0.56	0.69	-0.33	0.08	-0.10	4.44	5.62	4.50	0.36	0.29	0.42	0.84	0.75	0.81						
56978	0.69	0.56	0.64	-0.35	0.20	-0.38	3.65	3.46	4.10	0.44	0.27	0.37	0.86	0.68	0.75						
56986	0.69	0.58	0.62	0.01	-0.14	0.05	3.23	2.79	3.93	0.46	0.29	0.14	0.81	0.63	0.66						
56987	0.65	0.60	0.63	-0.38	-0.05	-0.28	4.56	3.73	4.82	0.38	0.30	0.35	0.84	0.69	0.74						
56989	0.53	0.55	0.60	-0.18	0.14	0.10	4.40	3.96	4.66	0.27	0.24	0.23	0.73	0.76	0.71						
56992	0.72	0.62	0.61	-0.07	0.14	0.01	2.38	2.16	3.10	0.52	0.27	0.22	0.80	0.63	0.64						
56994	0.75	0.58	0.61	0.14	0.12	0.19	2.08	4.45	2.86	0.56	0.29	0.07	0.76	0.71	0.68						
56995	0.71	0.51	0.61	-0.05	0.24	0.03	2.56	5.36	3.38	0.51	0.26	0.19	0.80	0.66	0.64						
56996	0.76	0.59	0.66	0.27	0.58	0.34	2.31	3.69	2.95	0.52	0.11	0.05	0.77	0.63	0.68						
最大值	0.81	0.64	0.72	0.52	0.91	0.40	4.56	5.62	4.82	0.66	0.36	0.50	0.86	0.76	0.81						
最小值	0.53	0.51	0.58	-0.38	-0.14	-0.38	1.35	2.16	1.99	0.27	0.06	0.03	0.73	0.58	0.64						
平均值	0.71	0.58	0.65	0.02	0.34	0.06	2.55	3.63	2.96	0.49	0.24	0.27	0.78	0.66	0.72						

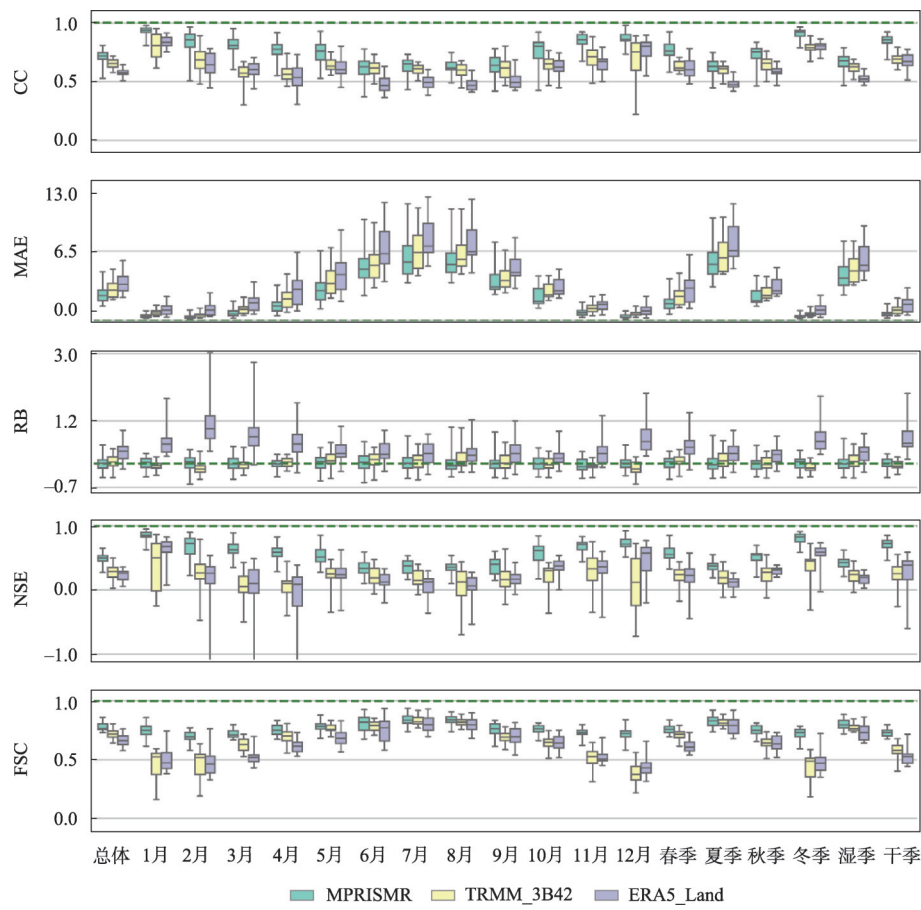


图7 元江流域23个站点基于MPRISM算法的“留一法”实际日降水插值结果验证评价参数结果与ERA5-Land、TRMM_3B42降水产品验证评价参数结果的不同时期统计箱图

Fig. 7 Statistical boxplots of evaluation and verification index results of actual daily precipitation interpolation results based on MPRISM and "leave-one-out" method, and precipitation products of ERA5-Land and TRMM_3B42 by month and season over 23 stations in the Yuanjiang River Basin

评价指标统计箱图。结果表明，本文实际日降水插值结果的验证评价指标中位数在所有时间段上均优于其他两种产品；箱图的箱体长度即上下四分位数范围，除5—6月份的CC指标外，MPRISM日降水插值结果的箱体长度最小，表明插值结果的评价指标在至少半数站点上分布区间较TRMM_3B42产品更集中，插值结果精度随空间变化更小，更为稳定；在箱图分散程度上，TRMM_3B42在CC、MAE及RB的表现较插值结果略优，表明考虑所有站点时，插值结果的这3种评价指标存在一定极端值；3种产品中，ERA5-Land在各时期综合表现均为最差。具体而言，3种产品在各评价指标上均显示出不同程度的时间性，其中，在CC、MAE、NSE指标上能观察到明显的伴随降水增多而精度减小的现象。MPRISM插值结果的CC、NSE平均值在各月间范围分别为0.63（6月）~0.93（1月）、0.35（6月）~0.85（1月），在各季节间范围分别为0.62（夏季）~0.9（冬季）、0.34（夏季）~0.8（冬季），相较而言，MPRISM插值结果的精度随时间变化的变幅最小，更为稳定；MPRISM日降水插值结果的RB随时间变化不明显，但在降水较多的时段RB值箱图分散程度也相对较大，表明随着降水增多，方法准确性在各站点间的差异均

更为显著;与CC、MAE、NSE相反,FSC指标随降水量增多而增大,3种产品正确预测降水事件发生的频率升高;同时,在降水较少的冬季(11月至次年1月),MPRISMR插值方法的优势尤为显著,FSC平均为0.72,而ERA5-Land和TRMM_3B42仅有0.47和0.43。

3.4 元江流域高分辨率格网数据

用“留一法”交叉验证对MPRISMR插值方法进行检验后,本文基于2000—2018年干旱河谷区所在流域内及周边458个气象观测站点日尺度降水观测数据,插值生成了覆盖元江流域的2000—2018年日降水格网数据,其空间分辨率约为3 km (0.027°)。基于该套空间插值数据产品,进一步制备了2000—2018年4个季节平均降水量及多年平均降水量的栅格数据(图8)。从插值结果来看,本文提出的MPRISMR插值方法很好地保留了观测数据的准确性。从时间规律上看,元江流域降水集中于夏季,秋季次之。从空间特征上看,元江流域降水量整体上自上游向下游递减,自山脊向河谷递减,干热空气在河谷中的局部环流及其在河谷东北侧的散溢使哀牢山东北侧降水与西南侧形成明显差

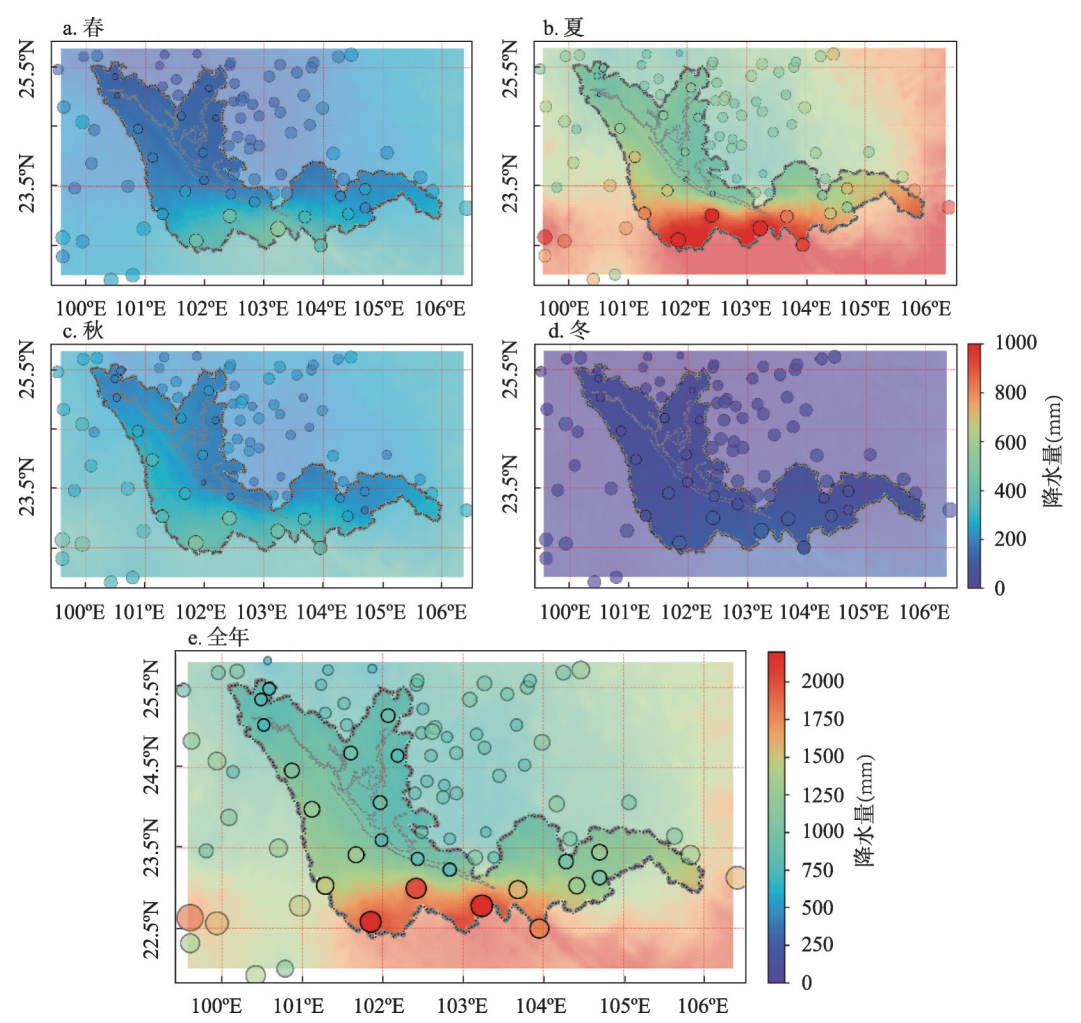


图8 基于MPRISMR算法生成的2000—2018年元江流域春、夏、秋、冬及年降水量空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of spring, summer, autumn, winter and annual average precipitation that generated based on MPRISMR in the Yuanjiang River Basin from 2000 to 2018

异,夏秋季节降水量由哀牢山西南向东北方递减。此外,本文生成的数据产品较好的反映了干热河谷西南侧的哀牢山顶部降水大的特征,与前人研究相符^[44],而其他两个数据产品难以捕捉,进一步表明本文方法生成的高分辨率降水信息的可靠性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

复杂地形山区占据中国陆域面积的65%以上。作为流域淡水的重要来源,其水资源的可持续管理对流域水文安全、生态建设、经济发展等关键环节有着重要意义。陆面过程模型是辅助研究水资源组分演变、农业灾害等重要问题的主要工具,降水作为气候及水循环系统的重要组成部分,是陆面过程模型最重要驱动参数之一^[45-46]。降水数据的精度和分辨率直接影响模型模拟结果,进而影响科学决策。中国西南干热河谷区作为复杂地形地区的典型代表,其降水分配存在明显的空间异质性,这种异质性也影响了该地的植被覆盖、河川径流、人口分布等重要自然与人文要素分布^[25, 28, 40, 47]。缺乏能够捕捉到降水空间特征及时间规律的降水产品的背景下,该地区高空间分辨率降水资料的制备成为开展陆表过程模拟,进而实现科学管理决策工作的基础。本文通过解析和提取影响复杂地形降水分布的地形要素,对PRISM算法进行了改进。改进前的PRISM算法使用有效地形高度同时表征两种尺度的地形起伏度,且在提取时需要对备选半径数集进行逐一的测试,并通过主观判断确定所选半径的合理性。这在一定程度上可能由于参数选取不恰当导致基于PRISM算法的降水插值结果相对较差。因此,本文未对改进前与改进后PRISM算法中的观测站点的权重分配进行比较,而将结果验证的重点转向插值结果与观测资料替代性栅格数据产品的对比上。此外,对PRISM的应用更应该将其作为一个方法框架而非固定的模型,应在充分了解研究区影响降水规律与地形特征的基础上,适当选取地形要素和自定义参数。因此,本文针对地形要素提取时的搜索半径在流域尺度上可以通过先验知识进行判断这一点,对原PRISM进行了相应改进,改进后的方法更适用于流域尺度的高分辨率降水插值,而在更大尺度上很难用一套固定的参数描述复杂地形地貌特征。

近年来,随着降水空间观测任务的深入和气候模型的发展,基于观测站点校正遥感、大气再分析降水空间栅格产品成为降水数据研究的热点。多数研究以机器学习为主要工具,其中基于时间循环神经网络,如长短时记忆网络的深度学习框架能够一定程度上模拟出降水偏差的时序变化规律^[48]。但是,当面对流域尺度模型的应用需求,机器学习方法耗时长、过程复杂,对计算设备、人员专业性上都有着较高的要求,生成数据的空间分辨率也受制于输入产品,在使用便捷性、过程可解释性、方法适用范围上都不如插值方法。与之存在类似问题的还有基于模式模型的数值模拟,该类方法借助于全球或局部气候模式模拟及预报天气情况,具有分辨率可变、能够充分考虑降水形成物理机制等优点,但是对于对降水产品的需求仅限于简单应用的跨学科研究人员来说,使用的学习成本要远高于插值方法。

4.2 结论

本文通过将地形要素提取环节改进后的PRISM算法嵌入到“平均态日降水—比值”插值框架,整体形成了MPRISM算法。在复杂地形影响下降水空间分布呈现异质性的典型地区——元江干热河谷所在的元江流域上,用“留一法”结合相应位置的大气再分析和遥感降水资料验证了MPRISM算法进行降水插值的可靠性,并最终制备生成了2000—2018年元江流域约3 km分辨率的日降水栅格数据产品。“留一法”验证

MPRISM算法的精度结果显示, 本文结果优于ERA5-Land和TRMM_3B42日降水产品, 与元江流域23个气象站点观测的实际日降水量的相关系数、相对偏差、平均绝对误差与纳什效率系数的中位数分别为0.72、0.98%、2.31mm、0.51; 在对降水事件发生的预报上, 采用的综合性验证评价指标FSC中位数为0.77。MPRISM实际日降水插值结果的验证评价指标中位数在所有时间段上均优于其他两种产品, 且精度随时间变化的变幅最小, 更为稳定。3种数据在湿季的插值精度均要差于干季, 因此在日后的降水产品校正等相关研究中应该重点关注降水量大的时间段的数据分析。基于MPRISM算法生成的覆盖元江流域的日降水栅格数据计算的2000—2018年季节及年平均产品能够保留观测数据的准确性, 同时能够捕捉到低分辨率产品无法识别的降水局部变化特征, 进一步表明其可行性及生成的数据产品的准确性。本文提出的MPRISM插值算法在原PRISM的基础上提升了对中小尺度地貌的刻画能力以及对具有随机噪声的日尺度降水数据的处理能力, 适用于观测站点稀疏且地表起伏剧烈地区的流域降水数据空间插值工作。研究为元江干热河谷区提供了高分辨率日降水数据, 能够服务于国际河流上游水资源综合管理, 协助缓解和预防极端气候条件下旱涝灾害风险, 提升流域可持续管理决策分析能力。

参考文献(References)

- [1] Jia Yangwen, Hao Chunfeng, Niu Cunwen, et al. Spatio-temporal variations of precipitation and runoff and analyses of water-heat-human-land matching characteristics in typical mountainous areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2288-2302. [贾仰文, 郝春沣, 牛存稳, 等. 典型山地降水径流时空演变及“水—热—人—地”匹配性分析. *地理学报*, 2019, 74(11): 2288-2302.]
- [2] Alsafadi K, Mohammed S, Mokhtar A, et al. Fine-resolution precipitation mapping over Syria using local regression and spatial interpolation. *Atmospheric Research*, 2021, 256: 105524. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105524.
- [3] Zhang G X, Su X L, Ayantobo O O, et al. Spatial interpolation of daily precipitation based on modified ADW method for gauge-scarce mountainous regions: A case study in the Shiyang River Basin. *Atmospheric Research*, 2021, 247: 105167. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105167.
- [4] Duan Z, Tuo Y, Liu J Z, et al. Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 612-626.
- [5] Rivera J A, Marianetti G, Hinrichs S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 437-449.
- [6] Funk C C, Peterson P J, Landsfeld M F, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015, 2(1): 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.
- [7] Kruizinga S, Yperlaan G J. Spatial interpolation of daily totals of rainfall. *Journal of Hydrology*, 1978, 36(1): 65-73.
- [8] Thiessen A H. Precipitation average for large areas. *Monthly Weather Review*, 1911, 39(7): 1082-1089.
- [9] Marquínez J, Lastra J, García P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: The use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1/2): 1-11.
- [10] Phillips D L, Dolph J, Marks D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 58(1/2): 119-141.
- [11] Hevesi J A, Istok J D, Flint A L. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics (Part I): Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1992, 31(7): 661-676.
- [12] Cornes R C, Van Der Schrier G, Van Den Besselaar E J M, et al. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(17): 9391-9409.
- [13] Newman A J, Clark M P. TIER version 1.0: An open-source Topographically InformEd Regression (TIER) model to estimate spatial meteorological fields. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(4): 1827-1843.
- [14] Daly C, Neilson R P, Phillips D L. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1994, 33(2): 140-158.
- [15] Daly C. Variable influence of terrain on precipitation patterns: Delineation and use of effective terrain height in PRISM [D]. Oregon State University, 2002.
- [16] Daly C, Halbleib M, Smith J I, et al. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and

- precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(15): 2031-2064.
- [17] Zhu Haonan, Liu Xiaoran, Li Yonghua, et al. Evaluation of terrain-considered spatial interpolation methods on temperature and precipitation in complex underlying surface region. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(5): 655-665. [朱浩楠, 刘晓冉, 李永华, 等. 考虑地形的空间插值算法在复杂下垫面地区气温和降水精细化插值的评估. *气象*, 2020, 46(5): 655-665.]
- [18] Zandi O, Zahraie B, Nasser M, et al. Stacking machine learning models versus a locally weighted linear model to generate high-resolution monthly precipitation over a topographically complex area. *Atmospheric Research*, 2022, 272: 106-159.
- [19] Zhu Huazhong, Luo Tianxiang, Daly C, et al. Validation of simulated grid data sets of China's temperature and precipitation with high spatial resolution. *Geographical Research*, 2003, 22(3): 349-359. [朱华忠, 罗天祥, Daly C, 等. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证. *地理研究*, 2003, 22(3): 349-359.]
- [20] Zhang Rongzu. *The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region*. Beijing: Science Press, 1992. [张荣祖. 横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [21] Bevacqua E, Zappa G, Lehner F, et al. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events. *Nature Climate Change*, 2022, 12(4): 350-355.
- [22] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [23] Outhwaite C L, McCann P, Newbold T. Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature*, 2022, 605(7908): 97-102.
- [24] Du Fangjuan, Zhou Yue, Zhuang Shurong, et al. Geographical studies of Southwest China based on articles published in *Acta Geographica Sinica* from 1934 to 2018. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2243-2259. [杜芳娟, 周越, 庄淑蓉, 等. 基于《地理学报》创刊85年载文的中国西南地区之地理研究. *地理学报*, 2019, 74(11): 2243-2259.]
- [25] You Weihong, He Daming, Duan Changchun. Climate change of the longitudinal range-gorge in Yunnan and its influence on the river flow. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 95-105. [尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷地区气候变化对河流径流量的影响. *地理学报*, 2005, 60(1): 95-105.]
- [26] Li Zongxing, He Yuanqing, Xin Huijuan, et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan region during 1960-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 563-579. [李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区1960—2008年气温和降水时空变化特征. *地理学报*, 2010, 65(5): 563-579.]
- [27] Hu Jinming, He Daming, Wu Shaohong, et al. Regional variation of annual precipitation along the tropic of cancer in longitudinal range-gorge region. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 281-292. [胡金明, 何大明, 吴绍洪, 等. 纵向岭谷区北回归线一带年降水区域分异特征. *地理学报*, 2010, 65(3): 281-292.]
- [28] Gu Shixiang, He Daming, Cui Yuanlai, et al. Variations of agricultural water requirements in Lancang river basin in last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1355-1362. [顾世祥, 何大明, 崔远来, 等. 近50多年来澜沧江流域农业灌溉需水的时空变化. *地理学报*, 2010, 65(11): 1355-1362.]
- [29] Fan Jianrong, Yang Chao, Bao Weikai, et al. Distribution scope and district statistical analysis of dry valleys in southwest China. *Mountain Research*, 2020, 38(2): 303-313. [范建容, 杨超, 包维楷, 等. 西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析. *山地学报*, 2020, 38(2): 303-313.]
- [30] Muñoz-Sabater J. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019.
- [31] Muñoz-Sabater J. ERA5-Land hourly data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2021.
- [32] Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree \times 0.25 degree V7. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2022.
- [33] Mission T R M. TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree \times 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2011.
- [34] Xu X Y, Frey S K, Ma D. Hydrological performance of ERA5 and MERRA-2 precipitation products over the Great Lakes basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 39: 100982. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100982.
- [35] Wanzala M A, Ficchi A, Cloke H L, et al. Assessment of global reanalysis precipitation for hydrological modelling in data-scarce regions: A case study of Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41: 101105. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101105.

- [36] Yuan F, Zhang L M, Win K W W, et al. Assessment of GPM and TRMM multi-satellite precipitation products in streamflow simulations in a data-sparse mountainous watershed in Myanmar. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 302. DOI: 10.3390/rs9030302.
- [37] Yuan F, Zhang L M, Soe K M W, et al. Applications of TRMM-and GPM-era multiple-satellite precipitation products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Myanmar. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 140. DOI: 10.3390/rs11020140.
- [38] New M, Hulme M, Jones P J J O C. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, 2000, 13(13): 2217-2238.
- [39] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao. New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(1): 99-104. [明庆忠, 史正涛. 三江并流区干热河谷成因新探析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 99-104.]
- [40] Wu Shaohong, Pan Tao, Cao Jie, et al. Barrier-corridor effect of longitudinal range-gorge terrain on monsoons in Southwest China. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 1-13. [吴绍洪, 潘韬, 曹杰, 等. 西南纵向岭谷地形对季风的“通道—阻隔”作用. *地理研究*, 2012, 31(1): 1-13.]
- [41] Kim M K, Kim S, Kim J, et al. Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 52(2): 79-89.
- [42] Jeong H G, Ahn J B, Lee J, et al. Improvement of daily precipitation estimations using PRISM with inverse-distance weighting. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 139(3): 923-934.
- [43] Wang Y H, Yang H B, Yang D W, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in a high mountainous watershed based on gauge observations and a regional climate model simulation. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(3): 845-862.
- [44] Zhang Keying, Zhang Yiping, Liu Yuhong, et al. Vertical distribution characteristics of rainfall in the AiLao Mountain. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, 14(2): 144-151, 199. [张克映, 张一平, 刘玉洪, 等. 哀牢山降水垂直分布特征. *地理科学*, 1994, 14(2): 144-151, 199.]
- [45] Ni Ningqi, Xie Jiaxin, Liu Xiaomang, et al. Multi-source data quality assessment based on the index of runoff sensitivity to climate change. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2280-2291. [倪宁淇, 谢佳鑫, 刘小莽, 等. 基于径流对气候变化敏感性指标的多源数据质量评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2280-2291.]
- [46] Wu Haijiang, Su Xiaoling, Zhang Gengxi. Prediction of agricultural drought in China based on Meta-Gaussian model. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 525-538. [吴海江, 粟晓玲, 张更喜. 基于 Meta-Gaussian 模型的中国农业干旱预测研究. *地理学报*, 2021, 76(3): 525-538.]
- [47] Pan Tao, Wu Shaohong, He Daming, et al. Ecological effects of longitudinal range-gorge land surface pattern and its regional differentiation. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 13-26. [潘韬, 吴绍洪, 何大明, 等. 纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异. *地理学报*, 2012, 67(1): 13-26.]
- [48] Yang X Y, Shuai Y S, Mou L T, et al. Correcting the bias of daily satellite precipitation estimates in tropical regions using deep neural network. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127656. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127656.

Spatial interpolation of high-resolution daily precipitation over complex terrains

LANG Lichen^{1,2,3}, TANG Cheng¹, GAO Xing², LI Zhihui², WU Feng²

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, Shandong, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Significant spatial heterogeneity of precipitation distribution can be observed over complex terrains. As a result, the spatial representativeness of ground-based precipitation observations, the applicability of remote sensing and reanalysis products, and the reliability of traditional interpolation methods are largely limited. PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) has been widely used for precipitation interpolation. It interpolates the precipitation observation data by extracting and weighting topographic elements, and further introducing them into the regression of precipitation-elevation relationships through the weighted least square method. However, traditional PRISM is not capable of reflecting relatively small-scale topographic features. Thus, based on the analysis of impact mechanism of topographic factors on precipitation patterns over complex terrains, this study aimed to improve the calculation and weighting process of PRISM topographic elements, and integrate the modified PRISM into the "climatological-ratio" interpolation framework considering the random noise in actual daily precipitation observations and finally propose an interpolation framework, MPRISMR. Taking the Yuanjiang River Basin with typical complex terrains as an example, we verified the feasibility and reliability of MPRISMR for daily precipitation interpolation based on the "leave-one-out" cross-validation and by comparing with the ERA5-Land and TRMM_3B42 precipitation products. The results showed that over 23 observation stations in the Yuanjiang River Basin, the performances of daily precipitation interpolation results based on MPPRISMR were better than those on the basis of both ERA5-Land and TRMM_3B42 precipitation products. Specifically, the verification evaluation index results showed that the medians of the Pearson's correlation coefficient and relative bias of the MPRISMR results were 0.72、0.98%, respectively. Besides, compared with ERA5-Land and TRMM 3B42 precipitation products, the accuracy of MPRISMR precipitation interpolation results changed less with time and therefore it was more stable. Thus, the applicability of the MPRISMR for high-resolution daily precipitation interpolation and the feasibility of using the result data as the input of relevant models were demonstrated. Finally, daily precipitation grid data covering the study area from 2000 to 2018 with a spatial resolution of about 3 km were generated based on MPRISMR. The developed MPRISMR algorithm can provide foundational precipitation data for land surface, hydrology, and water quality models, and support scientific management and policy-making decisions over complex terrains.

Keywords: PRISM; complex terrains; precipitation interpolation; high-resolution precipitation products; dry hot valleys; Yuanjiang River Basin