

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0132

姬世保, 杜军凯, 仇亚琴, 等. 基于星地融合数据的黔桂喀斯特山地降水时空分布[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 28-36. JI S B, DU J K, QIU Y Q, et al. Spatiotemporal distribution of precipitation in Guizhou and Guangxi karst mountainous regions based on satellite earth fusion data[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 28-36. (in Chinese)

基于星地融合数据的黔桂喀斯特山地降水时空分布

姬世保, 杜军凯, 仇亚琴, 郝春洋, 刘海滢

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:山区是河川径流主产区,系统掌握山区降水的时空分可为水循环系统的精准解析和水资源开发利用策略的科学拟定提供重要的基础支撑。针对山区观测数据匮乏的情况,使用地理加权回归法和多元线性回归法,建立了黔桂喀斯特山地 TRMM 卫星降水产品的降尺度校正模型,分析了降尺度校正结果的精度及其在不同高程区间的效果,总结了山地降水的时空分布规律。研究结果表明:地理加权回归法的校正精度优于多元线性回归,在 $\alpha=0.01$ 的显著性水平下,地理加权回归法在高海拔地区的表现更好;研究区多年平均降水量呈现南高北低、东高西低的特征,年内分配不均,夏季(6—8月)降水量为 741 mm,占全年的 52%;地形变化和区域降水空间分布有密切联系,低海拔区域高程对降水的影响较大,高海拔区域坡度对降水的影响较大。

关键词:遥感降水;降尺度;喀斯特山地;时空分布

中图分类号:TV125;P468 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal distribution of precipitation in Guizhou and Guangxi karst mountainous regions based on satellite earth fusion data

Ji Shibao, Du Junkai, Qiu Yaqing, Hao Chunyang, Liu Haiying

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, Beijing 100038, China)

Abstract: Mountainous area is the main producing area of river runoff. Systematically grasping the spatial and temporal distribution pattern of precipitation in mountainous area can provide important basic support for precise analysis of water circulation system and scientific formulation of water resources development and utilization strategy. Aiming the lack of observation data in mountainous areas, this study developed a downscaling correction model for TRMM satellite precipitation data product in Guizhou and Guangxi karst mountainous region by using geographic weighted regression method and multiple linear regression method. The accuracy of downscaling correction results and their effects at different elevation intervals were analyzed, and summarized the temporal and spatial distribution of precipitation in the mountains. The results showed that: The correction accuracy of the geographic weighted regression method was better than the multiple linear regression method, and the geographic weighted regression method performed better in the high altitude area at a significance level of $\alpha=0.01$; The annual average precipitation in the study area showed high in the south, low in the north, high in the East and low in the west, characteristics and the annual distribution was uneven. Summer (June-August) precipitation was 740.8 mm, accounting for 52% of the whole

收稿日期:2019-01-28 修回日期:2019-06-15 网络出版时间:2019-07-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190710.1719.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405803;2016YFC0401301);国家重点基础研究发展计划(2015CB452701)

作者简介:姬世保(1994—),男,陕西靖边人,主要从事流域水循环模拟与调控方面研究。E-mail:ji_jsb@163.com

通信作者:杜军凯(1987—),男,河南禹州人,工程师,博士,主要从事流域水循环及其伴生过程模拟方面的研究。E-mail:du_djk@163.com

year; The spatial distribution of precipitation in the study area was closely related to the topography. The elevation of low-altitude areas had a greater impact on precipitation, and the slope of high-altitude areas had a greater impact on precipitation.

Key words: remote sensing precipitation; downscaling; Karst mountains; temporal and spatial distribution

降水是极为活跃的一项气象因子,系水循环过程总输入^[1]。山区是河川径流主产区,系统掌握山区降水的时空分布格局可为水资源开发利用策略的科学拟定提供重要的基础支撑。由于受大气环流、气候、地形等影响,山区降水时空异质性较强。开展相关研究面临的重大问题系高海拔区域测站较少,观测资料严重匮乏。遥感观测技术根据物体反射或辐射电磁波的特征实现信息反演和提取,可为地面观测体系提供重要的补充。近年来,卫星反演降水产品种类较多,如 TRMM^[2-4]、CMAP^[5]和 GPM^[6]等,其中 TRMM 系列数据应用广泛,如刘少华等^[7]对中国大陆流域分区 TRMM 降水进行了质量评价;唐国强等^[8]对 TRMM 数据在赣江流域的可替代性进行了研究;黄勇等^[9]和廖荣伟等^[10]采用降水栅格数据对 TRMM 3B42V7 在中国大陆区的精度进行评价。也有一些针对山区降水规律的研究,如:太行山降水的时空分布^[11]、天山西部降水垂直分布规律^[12]、祁连山最大降水高度带和降水直减率^[13]、西藏高原地形强迫对降水分布的影响机制^[14]等。

已有研究成果一方面表明黔桂喀斯特山区的针对性研究较少,缺乏降水时空分布在垂直方向的系统分析;另一方面,虽然已有研究表明 TRMM 降水产品具有覆盖面积广、适用性强以及时空分辨率相对较高等优势,但遥感降水产品在分辨率和精度上仍有一定的提升空间,在应用中仍要按需进行尺度转换与校正,常用校正方法有多元线性回归法^[15-17]、逐步订正法^[18-19]、地理加权回归法^[20-22]等。其中回归法能综合考虑多因素对降水的影响,具备一定的优势。本文将借助多元线性回归和地理加权回归对 TRMM 数据进行降尺度校正,分析校正方法在不同海拔区间的效果,在结果优选的基础上解析山区降水的时空分布格局,包括水平向、垂向和多时间尺度的分布特征。研究旨在较为精确的掌握黔桂喀斯特山区降水时空分布,为该地区水资源开发利用活动提供支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

黔桂喀斯特山区地理范围为 $20^{\circ}75' \sim 28^{\circ}0'N$,

$103^{\circ}75' \sim 110^{\circ}0'E$,面积约 17.70 万 km^2 ,海拔介于 44~1 914 m,平均海拔 1 100 m;纵跨 6 个地级市,2 个自治州,横穿左江、龙江、北盘江三个流域,是我国长江和珠江上游生态屏障的重要组成部分。山区地势西高东低(图 1)、岩溶作用强烈,可溶岩分布较广,分布有中高山、断陷盆地、峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶高原、峰林平原和溶丘洼地等^[23]地貌类型,其中峰林平原区主要以锥峰和塔峰为主,锥峰形似金字塔,上陡下缓,平均坡度大约为 30° ;塔峰的上部塔柱区坡度普遍大于 60° ,下部塔裙区的平均坡度约 30° 。山区属亚热带湿润季风气候,各分区年平均降水量在 1 200~1 500 mm,日照少、雾日多,多年平均气温 $15 \sim 18^{\circ}C$ 。植被较好,森林覆盖率超过 40%,包括山地季雨林、寒温性针叶林、常绿阔叶林、暖性针叶林等。

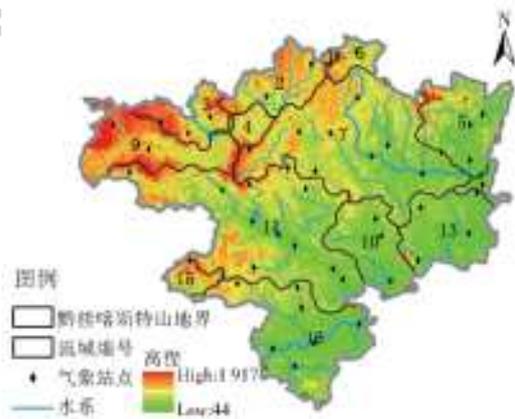


图 1 研究区范围及流域分区

Fig. 1 Location of study area and watershed division

1.2 数据资料

本文所使用的地形数据来自 NASA 和美国国家测绘局(NIMA)联合发布的 $90 m \times 90 m$ 空间分辨的数字高程(DEM)数据集。选用的 50 个气象站点逐日降水数据来自于国家气象中心整编的 2000—2011 年气象资料数据集,其中海拔 1 000 m 以下的测站 47 个,海拔 1 000~1 400 m 的共 3 个,高海拔地区站点稀少。2000 年至 2011 年逐月最大 MODIS 归一化植被指数 NDVI 数据来源于地理空间数据云,详见表 1。

1.3 研究方法

本文将 TRMM 降水从 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 降尺度到

表 1 研究所用数据及来源
Tab.1 Research data and sources

数据类型	时间序列	空间分辨率	时间间隔	来源
遥感降水(TRMM3B42.V7)	2001 年 1 月—2011 年 12 月	0.25°×0.25°	3 h	https://mirador.gsfc.nasa.gov/
DEM	2001 年 1 月—2011 年 12 月	90 m×90 m		https://srtm.csi.cgiar.org/
气象站降水	2001 年 1 月—2011 年 12 月		日	https://data.cam.cn/
NDVI	2001 年 1 月—2011 年 12 月	500 m	月	https://www.gscloud.cn

0.05°×0.05°,选取 NDVI、坡度、坡向、经度、纬度作为自变量,降水作为因变量建立地理加权回归法和多元线性回归法的降尺度校正模型,通过交叉验证法对校正结果进行优选,在此基础上分析该区域降水的时空分布特征,并采用列联表的卡方检验法检验了校正效果和区域的独立性。

校正结果精度评定所采用的方法是交叉验证法^[24],交叉验证法是依此减少一个样本点,然后使用其余的样本进行建模,再通过模型估算该样本点的降水量,最后选择决定系数、均方根误差以及平均相对偏差 3 个指标确定最优校正方法。其中决定系数(R²)、均方根误差(RMSE)和平均相对偏差(ARE)的计算方法以及最优方法选择准则计算公式为

$$R_j^2 = \frac{\sum_1^N (\hat{C}_i - \overline{P_{aut}})^2}{\sum_1^N (P_{aut_i} - \overline{P_{aut}})^2} \quad j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (P_{aut_i} - \hat{C}_i)^2} \quad j=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$ARE_j = \frac{\sum_1^N |P_{aut_i} - \hat{C}_i|}{N \times \overline{P_{aut}}} \quad j=1,2,\dots,N \quad (3)$$

$$\frac{1}{N} \sum_1^N R_j^2 \rightarrow \max; \sum_1^N RMSE_j \rightarrow \min; \frac{1}{N} \sum_1^N ARE_j \rightarrow \min \quad (4)$$

式中:*N* 表示实测站点个数;*P_{aut_i}* 表示第 *i* 个站点的实测降水量(mm); $\overline{P_{aut}}$ 表示所有实测站点的平均降水量(mm); \hat{C}_i 表示第 *i* 个站点的校正降水量(mm);*R_j²*、*RMSE_j*、*ARE_j* 分边表示第 *j* 次验证的决定系数、均方根误差和平均相对偏差。

检验校正效果和区域的独立性所采用的方法为列联表检验,该方法^[25]设 *x*₁、*x*₂、...、*x*_{*k*} 为 *n* 次独立观测的样本(描述性统计见表 2),统计变量 *Y* 满足

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \frac{(n_{ij} - n \times \frac{c_i}{n} \times \frac{d_j}{n})^2}{n \times \frac{c_i}{n} \times \frac{d_j}{n}}}{\chi^2[(s-1)(t-1)]} \quad (5)$$

式中:*s* 表示属性 *A* 的不同级别;*t* 表示属性 *B* 的不

同级别;*n_s* 表示不同属性下样本数量;*c_s* 表示具有属性 *s* 的所有样本数;*c_t* 表示具有属性 *t* 的所有样本个数,在自由度为 *n*,显著性水平为 α 的条件下,如果统计变量 $Y > \chi_\alpha^2(n)$,则拒绝原假设,即样本之间相互不独立。如果样本校正精度和区域之间独立,则校正效果和区域无关,反之,则相关,可以通过比较不同区域校正结果相对误差的大小来确定校正效果在不同区域的优劣。

表 2 样本的描述性统计
Tab.2 Descriptive statistics of the samples

A\B	1	2	...	<i>j</i>	...	<i>t</i>	行合计
1	<i>n</i> ₁₁	<i>n</i> ₁₂	...	<i>n</i> _{1<i>j</i>}	...	<i>t</i>	<i>c</i> ₁
2	<i>n</i> ₂₁	<i>n</i> ₂₂	...	<i>n</i> _{2<i>j</i>}	...	<i>n</i> _{2<i>t</i>}	<i>c</i> ₂
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
<i>i</i>	<i>n</i> _{<i>i</i>1}	<i>n</i> _{<i>i</i>2}	...	<i>n</i> _{<i>i</i><i>j</i>}	...	<i>n</i> _{<i>i</i><i>t</i>}	<i>c</i> _{<i>i</i>}
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
<i>s</i>	<i>n</i> _{<i>s</i>1}	<i>n</i> _{<i>s</i>2}	...	<i>n</i> _{<i>s</i><i>j</i>}	...	<i>n</i> _{<i>s</i><i>t</i>}	<i>c</i> _{<i>s</i>}
列合计	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	...	<i>d</i> _{<i>j</i>}	...	<i>d</i> _{<i>t</i>}	<i>n</i>

2 结果与分析

2.1 降尺度校正的精度评估

2.1.1 与实测数据的一致性

采用交叉验证法来判别两种校正方法的效果。选取 50 个实测站点作为样本点,利用降尺度结果与相关站点的实测值累积交叉验证 50 次,得到原始 TRMM 降水、地理加权回归和多元线性回归所得到的校正值与实测降水的月均决定系数分别为 0.72、0.90、0.50;均方根误差分别为 26、12、34 mm;平均相对偏差分别为 0.20、0.07、0.22。具体见图 2。

结合最优方法选择准则(式(1)至(5))可以看出地理加权回归法在研究区的适用性优于多元线性回归法,因此后续结果分析将建立在地理加权回归法所校正的结果之上。

2.1.2 不同高程区间的精度

选取平均海拔高度大于 1 000 m 的 2 号、3 号、4 号、9 号流域为高海拔代表区,选择平均海拔小于 500 m 的 10 号、13 号流域以及 16 号流域为低海拔

代表区,分析地理加权回归方法校正效果是否和区域有关。所选代表区及其相对误差统计结果见表3,采用列联表卡方检验验证校正效果和区域之间的

独立性,并以校正结果的相对误差大小来衡量校正效果的优劣。

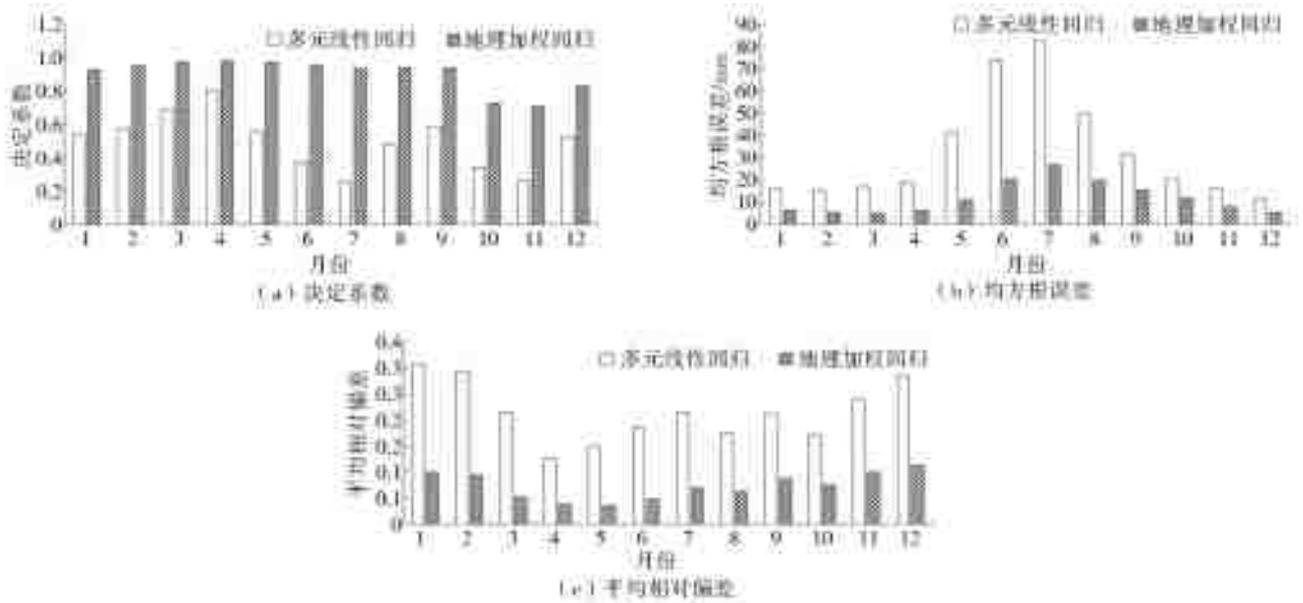


图2 两种校正方法的交叉验证结果

Fig. 2 Cross-validation results of two calibration methods

表3 不同属性样本的描述性统计

Tab. 3 Descriptive statistics of different attribute samples

代表区特征参数统计			
区域	相对误差介于0~0.05的样本个数	相对误差>0.05的样本个数	合计
高海拔地区	784	233	1 017
低海拔地区	913	387	1 300
合计	1 697	620	2 317

假设校正结果相对误差和研究区域相互独立,由卡方检验得到统计量 Y 为 13.70,自由度为 1,又 $\chi_{0.01}^2(1) = 6.635, P(\chi_1^2 > 13.70) < 0.01$,所以在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下,拒绝原假设,即校正结果相对误差和区域有关。统计得到高海拔区相对误差介于 0~0.05 的概率(77.1%)高于低海拔区域相对误差介于 0~0.05 的概率(70%),所以高海拔区域的校正效果优于低海拔区。

由于高海拔地区 NDVI、高程、坡度以及坡向较 低海拔地区变化更加显著,其与降水的相关性更好;同时,低海拔地区降水也可能受到其他复合因素影响,因此高海拔地区的降尺度校正效果更好。

2.2 降水的时间分布特征

从月尺度分析,研究区多年平均月降水最小的是 12 月份,该月平均降水量为 25 mm,多年平均月降水最大的是 6 月,该月平均降水量为 304 mm,是 12 月份降水的 12.03 倍,各月份降水比值的范围为

1.20~12.33,逐月降水的空间分布也各不相同,其中研究区多年平均月降水量的分布图见图 3,可以看出降水中心从 1 月起 到 12 月绕研究区中心呈顺时针方向移动。

从季尺度分析,研究区多年平均夏季降水最多,达到 741 mm,冬季(12 月一次年 2 月)降水最少,为 93 mm,夏季降水量为冬季的 7.93 倍;四季降水的空间分布也各不相同,春季降水呈现由西向东递增的趋势,西部地区部降水量不足 50 mm,而在东部地区则在 5 号流域附近形成一个高值中心,其降水量在 86~189 mm;夏季降水中心沿区域中心顺时针方向移动,高值中心的降水量在 300 mm 以上。

由于研究区山脉集中分布在西北部,西南风携带的水汽在山前已经形成降水,翻山后水汽含量随之降低。相对而言,研究区东南部地势低,有利于东南季风则长驱直入向西北部发展,受“东南-西北”这种喇叭口地形作用,夏季降水主要集中于东南地区。同时,夏季降水占全年的比例较大,进而决定了区域年降水量南高北低、东高西低的特点。

2.3 降水的空间分布特征

2.3.1 水平分布

地理加权回归法校正结果见图 4,不同流域分区多年平均降水量在 1 019~2 114 mm,多年平均降水量大于 1 400 mm 的区域大约占比 50%,全区的降水分布呈现由西部和北部向东部和南部递增的

趋势,东南部降水最多且空间差异较小,多年平均降水量普遍大于 1 400 mm,西部和北部降水量明显较低;存在多个多雨中心和一个少雨带,多雨中心集中在东部和南部,少雨带则位于西北部,其中面积最大的多雨中心出现在 5 号流域,其降水量 1 732~2 114 mm,少雨带集中于 9 号流域附近,多年平均

降水量仅为 1 019~1 224 mm。山区夏季受西南和东南季风影响,加之 5 号流域东北部高程变化剧烈,气流发生垂直运动,从而增加了气团间的对流强度,降水在地形和季风共同作用下明显增加,因此形成了一个多雨中心。西北部地区高程变化剧烈程度较小,未形成多雨中心。

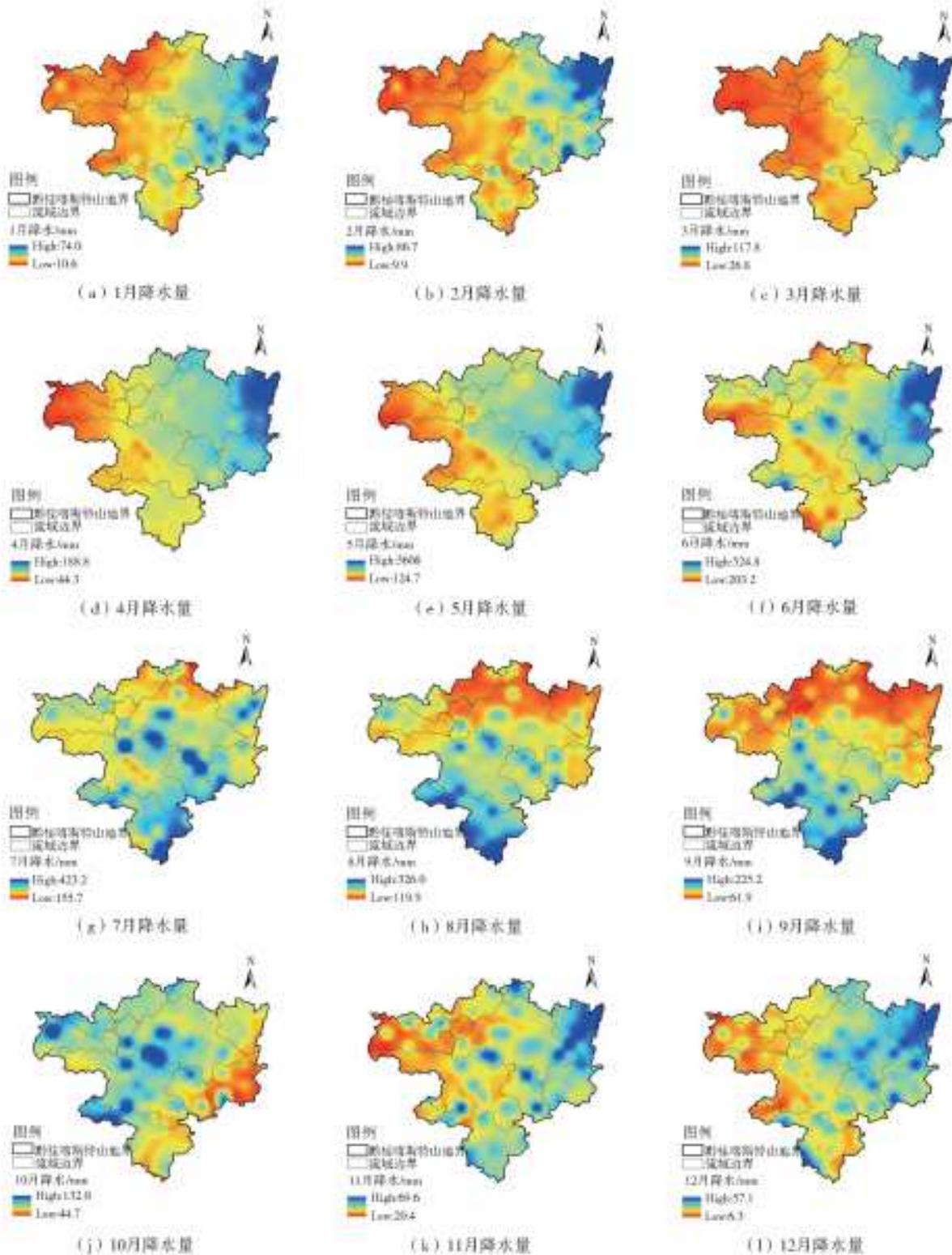


图 3 研究区逐月降水分布

Fig. 3 Monthly precipitation distribution in the study area

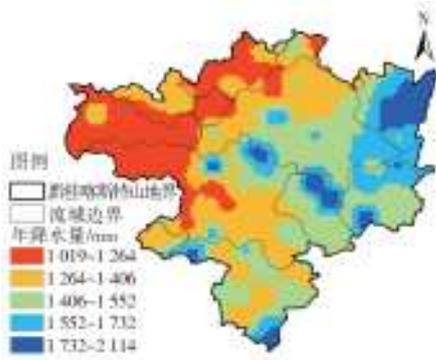


图4 研究区多年平均降水分布

Fig. 4 Mean Annual precipitation distribution in the study area

2.3.2 垂向分布

为研究黔桂喀斯特山地降水的垂向分布特征,本文分析了研究区降水沿坡度的变化率(坡度每增加 1° 时所对应降水量的变化量)和降水沿高程的变化率(海拔每升高100 m时所对应降水量的变化量)。

就研究区逐月降水沿坡度的变化率(图5)和相关性总体而言,高海拔地区降水和坡度之间的相关性强于低海拔地区,但在不同区域有一定的差异。春季:降水和坡度的相关性在东部地区的8号流域、6号流域以及13号流域呈负相关,在16号流域南

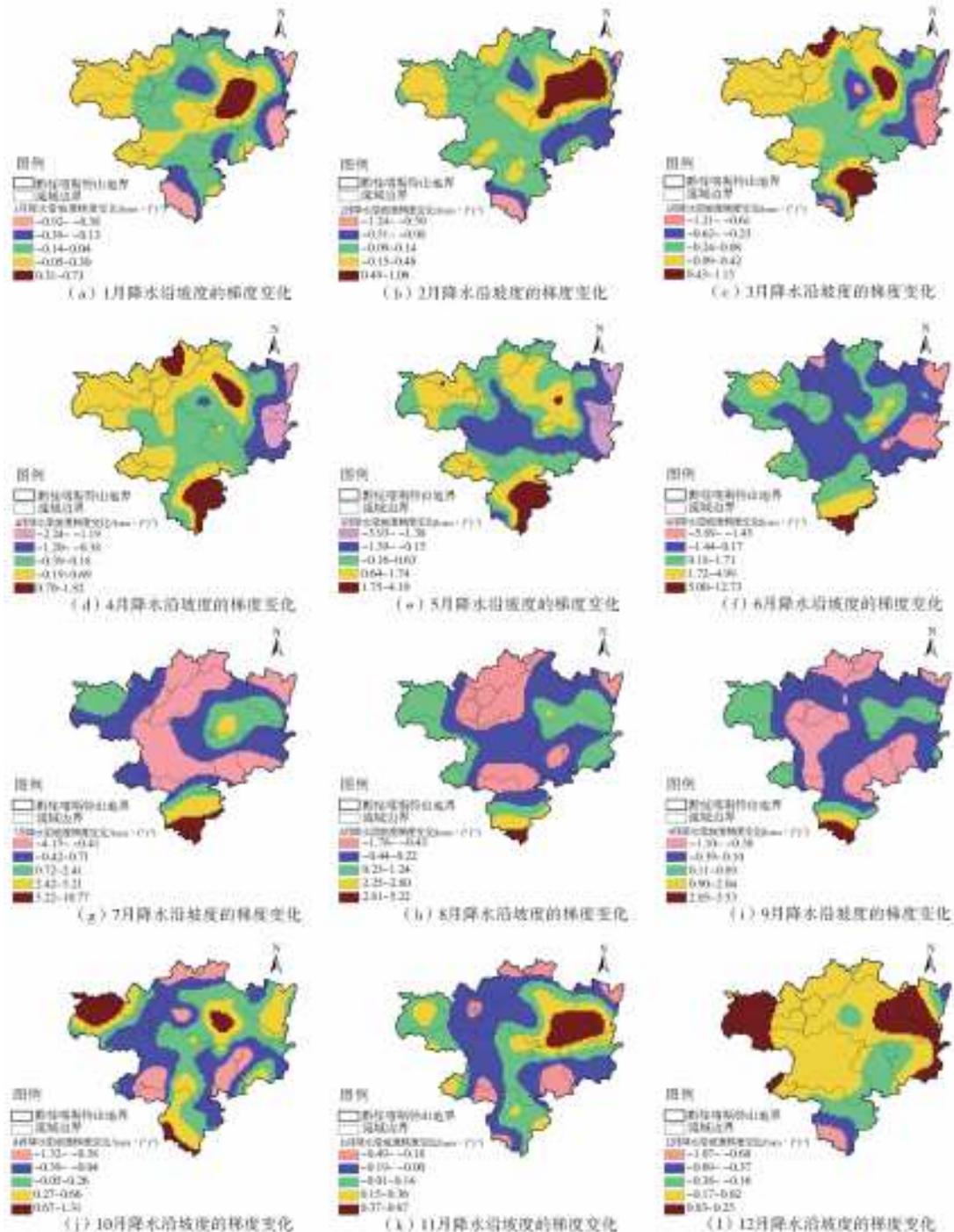


图5 降水沿坡度的变化率变化

Fig. 5 Change in precipitation rate along slope

部地区呈正相关,变化率范围分别为 $-3.30 \sim 0.60 \text{ mm}/(^{\circ})$ 、 $0.42 \sim 4.10 \text{ mm}/(^{\circ})$;夏季:在 16 号流域中部以及正南地区相关性为正,变化率范围为 $1.20 \sim 12.70 \text{ mm}/(^{\circ})$,夏季降水沿坡度的变化率高于其他季节,夏季中 6 月份变化率最大,变化率范围为 $-5.89 \sim 12.73 \text{ mm}/(^{\circ})$;冬季,在东北部的 5 号流域与 7 号流域相邻区域相关性为正,在 16 号流域

西南部呈负相关,变化率范围分别为 $0.02 \sim 1.10 \text{ mm}/(^{\circ})$ 、 $-1.20 \sim 0.51 \text{ mm}/(^{\circ})$,冬季中 11 月份最低,变化率范围为 $-0.49 \sim 0.67 \text{ mm}/(^{\circ})$ 。多年平均月降水沿坡度的变化率变化范围为 $-5.89 \sim 12.73 \text{ mm}/(^{\circ})$,平均变化率为 $1.55 \text{ mm}/(^{\circ})$,年内变化较大。

逐月降水沿高度的变化率(图 6)特征主要表现在局部地区的异质性。低海拔地区(5、7、10、

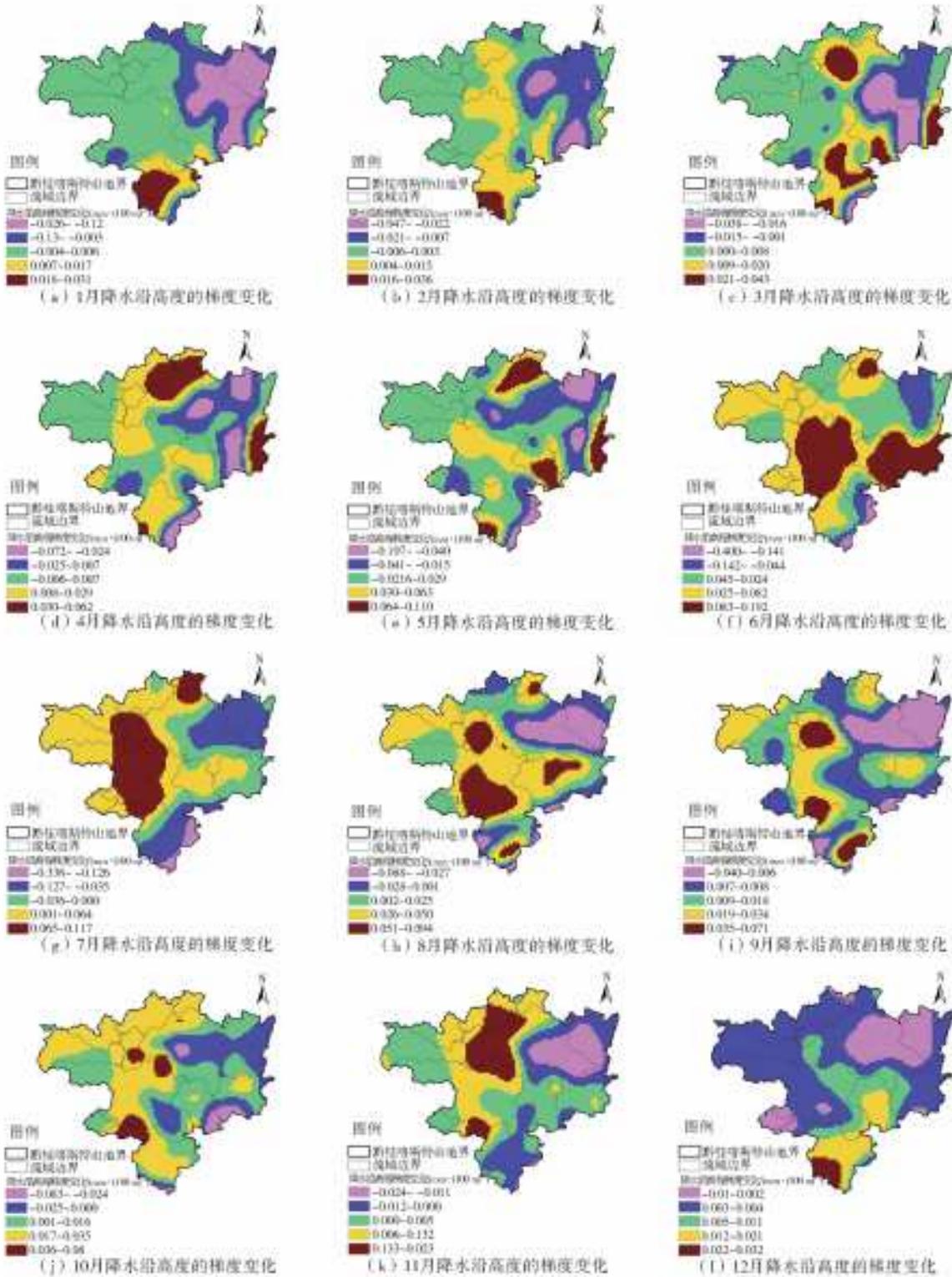


图 6 降水沿高度的梯度变化

Fig. 6 Change in precipitation rate along altitude

13、16号流域)降水随高程变化率大于高海拔地区(2、3、9号流域);春季变化率为正的区域主要集中在7号流域中部地区,夏季为正的地区主要集中在中部和西北部,6月份降水随高程的变化率波动最大,变化范围为 $-0.34\sim 0.19$ mm/(100 m),秋季为正的地区主要集中在中部地区,冬季为正区域位于正南部地区,12月份变化率最小,变化范围为 $-0.01\sim 0.03$ mm/(100 m)。

研究区地形起伏较大,不同坡度、不同海拔高度区间对水汽阻挡能力存在差异,这是造成降水垂向分布规律相对复杂主要原因之一。

3 结论

本文基于地理加权回归法和多元线性回归法所建立的卫星降水产品的降尺度校正模型,对研究区TRMM降水进行了降尺度校正,评估了结果与实测数据的一致性及其在不同高程区间的精度,总结了黔桂喀斯特山地降水时空分布规律,结论如下:

(1)研究区年降水量南高北低、东高西低,年内分配不均,主要集中于夏季,达741 mm,占全年的52%;存在多个多雨中心和一个少雨带,区域降水中心从1到12月绕区域中心呈顺时针方向移动,多雨中心集中在东部和南部,少雨带则位于西北部;

(2)研究区降水受地形影响较大,月均降水量沿坡度变化率为 $-5.89\sim 12.73$ mm/($^{\circ}$),沿高度变化变化率为 $-0.40\sim 0.20$ mm/(100 m);

(3)坡度和高程对降水在高海拔地区和低海拔地区的影响呈现出明显的差异性,在低海拔地区,高程对降水的影响较大,在高海拔地区,坡度对降水的影响较大;

(4)地理加权回归法校正后的降尺度降水数据与实测系列的决定系数为0.90,经列联表检验,在 $\alpha=0.01$ 的显著性水平下,地理加权回归法对高海拔地区降水的校正精度优于低海拔地区,其中高海拔区相对误差介于 $0\sim 0.05$ 的概率为77.1%,低海拔区域相对误差介于 $0\sim 0.05$ 的概率为70.0%。

参考文献(References):

[1] 刘奇,傅云飞. 基于TRMM/TMI的亚洲夏季降水研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2007,37(1):111-122. (LIU Q, FU Y F. Precipitation studies based on TRMM/TMI in Asia[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences),2007,37(1):111-122. (in Chinese))

[2] 李威,蒋平,赵卫权,等. TRMM卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水土保持研究,2016,23(1):97-102. (LI W, JIANG W P, ZHAO

W Q, et al. Analysis on applicability of TRMM precipitation data in Karst areas: A case study in Guizhou Province [J]. Study on Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 97-102. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2016. 01. 014.

[3] 周秋文,李芳. TRMM降雨数据在喀斯特地区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(2):76-83. (ZHOU Q W, LI F. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in Karst region: A case study in Guizhou Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2):76-83. (in Chinese))

[4] 吴建峰,林淑贞,李威,等. 贵州高原地带 TRMM3B42 卫星降水数据的精度评价[J]. 水文,2018,38(4):87-91. (WU J F, LIN S Z, LI W, et al. Evaluation of TRMM3B42 satellite precipitation data accuracy of Guizhou plateau[J]. Hydrology,2018,38(4):87-91. (in Chinese))

[5] XIE P, ARKIN P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions [J]. Journal of Climate, 1996, 9(4): 840-858. DOI: 10. 1175/1520-0442(1996)09<0840:O.CO>2.

[6] PRAKASH, SATYA, MITRA, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 865-876. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 01. 029.

[7] 刘少华,严登华,王浩,等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. 水科学进展,2016,27(5):639-651. (LIU S H, YAN D H, WANG H, et al. Evaluation of TRMM 3B42V7 at the basin scale over mainland China [J]. Advances in Water Science,2016,27(5):639-651. (in Chinese)) DOI:10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 05. 001.

[8] 唐国强,李哲,薛显武,等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. 水科学进展,2015,26(3):340-346. (TANG G Q, LI Z, XUE X W, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang river basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3):340-346. (in Chinese)) DOI:10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 03. 005.

[9] 廖荣伟,张冬斌,沈艳. 6种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J]. 气象,2015,41(8):970-979. (LIAO R W, ZHANG D B, SHEN Y. Validation of six satellite-derived rainfall estimates over China [J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(8): 970-979. (in Chinese))

[10] 任国玉,战云健,任玉玉,等. 中国大陆降水时空变异

- 规律— I 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 299-310. (REN G Y, ZHAN Y J, REN Y Y, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China; I. Climatology[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 299-310. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.001.
- [11] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于 TRMM 卫星降水的太行山区降水时空分布格局[J]. 水科学进展, 2019, 31(1): 1-14. (DU J K, JIA Y W, LI X X, et al. Study on the spatial-temporal distribution pattern of precipitation in the Taihang Mountain region using TRMM data[J]. Advances in Water Science, 2019, 31(1): 1-14. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.001.
- [12] 穆振侠, 姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水垂直分布规律的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 66-71. (MU Z X, JIANG H F. The vertical distribution law of precipitation in the western Tian shan Mountain based on TRMM/TMI [J]. Journal of Arid land Resources and Environment, 2010, 24(10): 66-71. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2010.10.005.
- [13] 王宁练, 贺建桥, 蒋熹, 等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 395-403. (WANG N L, HE J Q, JIANG X, et al. Study on the zone of maximum precipitation in northslope of the central Qilian Mountains[J]. Journal of the Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 395-403. (in Chinese))
- [14] 舒守娟, 王元, 李艳. 青藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 585-591. (SHU S J, WANG Y, L Y. Effect of topographic perturbation on the precipitation distribution Tibetan Plateau[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(5): 585-591. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.05.001.
- [15] 曲伟, 路京选, 宋文龙, 等. TRMM 遥感降水数据在伊洛瓦底江流域的精度检验和校正方法研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1262-1270. (QU W, LU J X, SONG W L, et al. Research on accuracy validation and calibration methods of TRMM remote sensing precipitation data in Irrawaddy basin [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1262-1270. (in Chinese))
- [16] 李净, 张晓. TRMM 降水数据的空间降尺度方法研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1164-1169. (LI J, ZHANG X. Downscaling method of TRMM satellite precipitation data [J]. Science of Geograph, 2015, 35(9): 1164-1169. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.09.013.
- [17] 樊东, 薛华柱, 董国涛, 等. 基于二次多项式回归模型的黑河流域 TRMM 数据降尺度研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 146-151. (FAN D, XUE H Z, Dong G T, et al. Downscaling study on TRMM 3B43 data of the Heihe River basin based on quadratic polynomial regression model [J]. Research of Soil and Water conservation, 2017, 24(2): 146-151. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.02.025.
- [18] CRESSMAN G W. An operational objective analysis system[J]. Mon. wea. Rev. 1959, 87(10): 367-374. DOI: 10.1175/1520-0493(087)<0367: AOOAS>2.0.CO;2.
- [19] BERGTHÖRSSON P, BRDS. Numerical weather map analysis[J]. Tellus, 1955, 7(3): 329-340. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1955.tb01170.x.
- [20] CHEN F, LIU Y, LIU Q, et al. Spatial downscaling of TRMM 3B43 precipitation considering spatial heterogeneity [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3074-3093. DOI: 10.1080/01431161.2014.902550.
- [21] LV AIFENG, ZHOU L. A rainfall model based on a geographically weighted regression algorithm for rainfall estimations over the Arid Qaidam basin in China [J]. Remote Sensing, 2016, 8(4): 311-328. DOI: 10.3390/rs8040311.
- [22] XU S, WU C, WANG L, et al. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 119-140. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.024.
- [23] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2433-2446. (LIU L M Z, ZHAN C S, HU S. Vegetation change and its topographic effects in the karst mountainous areas of Guizhou and Guangxi [J]. Geographical Research, 2018, 37(12): 2433-2446. (in Chinese))
- [24] TSAI C H, KOLIBAL J, MING L. The golden section search algorithm for finding a good shape parameter for meshless collocation methods [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2010, 34(8): 738-746. DOI: 10.1016/j.enganabound.2010.03.003.
- [25] 李伟明. 列联表和卡方检验[J]. 上海教育科研, 1985(6): 28-29, 31. (LI W M. Contingency table and chi-square test[J]. Educational and Scientific Research in Shanghai, 1985(6): 28-29, 31. (in Chinese)) DOI: 10.16194/j.cnki.31-1059/g4.1985.06.013.