基于 TRMM 数据的巴基斯坦降雨侵蚀力估算及空间降尺度模拟

彭 洁[1,2], 李爱农[1], 雷光斌[1], 南 希[1], 边金虎[1], 赵 伟[1]

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,数字山地与遥感应用中心,成都 610041;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 中巴经济走廊是"一带一路"建设的旗舰项目。降雨侵蚀力是反映区域资源环境承载能力的重要指标,开展境外高精度降雨侵蚀力遥感估算研究对中巴经济走廊建设具有重要意义。基于 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星 3B42 降雨数据估算了巴基斯坦的降雨侵蚀力,并结合气象、植被、地形等因子构建了空间降尺度模型,将降雨侵蚀力的空间分辨率提高到 1 km。结果表明:(1)空间降尺度模型模拟的降雨侵蚀力与 TRMM 3B42 降雨数据估算的降雨侵蚀力显著相关($R^2=0.94$),降雨侵蚀力的空间降尺度结果能更加详细地刻画巴基斯坦降雨侵蚀力的空间分布格局,尤其是地形起伏较剧烈的北部山区和俾路支东缘;(2)巴基斯坦境内 2010 年的年降雨侵蚀力平均值为 524.15 (MJ·mm)/(hm²·h·a),分布范围为 0.58～5 929.85 (MJ·mm)/(hm²·h·a),整体上呈现出东部高西部低的空间格局,且高值区主要分布在伊斯兰堡、门盖拉镇、锡亚尔科特－拉合尔－萨希瓦尔沿线,以及卡拉奇等城镇附近区域。

关键词: 降雨侵蚀力; 空间降尺度; TRMM; 回归建模; 巴基斯坦

中图分类号:S157.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-2242(2017)03-0010-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.002

Estimation and Spatial Downscaling of Rainfall Erosivity Using TRMM Precipitation Data in Pakistan

PENG Jie[1,2], LI Ainong[1], LEI Guangbin[1], NAN Xi[1], BIAN Jinhu[1], ZHAO Wei[1]

(1. *Research Center for Digital Mountain and Remote Sensing Application, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu* 610041; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract: The China-Pakistan Economic Corridor is the flagship project of the Belt and Road Initiative. Rainfall erosivity is an important indicator to evaluate the carrying capacity of regional resources and environment. Estimation of the overseas high spatial resolution rainfall erosivity is significant to the construction of the China-Pakistan Economic Corridor. In this paper, rainfall erosivity of Pakistan in 2010 was estimated with TRMM 3B42 data, and a spatial downscaling algorithm based on the relationships between rainfall erosivity and relevant environmental factors such as meteorology, topography and vegetation was proposed. By applying the spatial downscaling algorithm, the spatial resolution of rainfall erosivity was improved to 1 km. The results were as follows: (1) The rainfall erosivity simulated by the spatial downscaling algorithm displayed a significant correlation with the rainfall erosivity estimated from TRMM 3B42 data ($R^2=0.94$), suggesting that the simulated rainfall erosivity by spatial downscaling algorithm could reflect the spatial distribution of rainfall erosivity effectively, especially in the northern mountains and east edge of the Baluchistan Plateau. (2) The rainfall erosivity of Pakistan in 2010 varied from 0.58 (MJ·mm)/(hm²·h·a) to 5 929.85 (MJ·mm)/(hm²·h·a), and the average value was 524.15 (MJ·mm)/(hm²·h·a). The spatial distribution of rainfall erosivity was high in the east and low in the west, and the areas with high values of rainfall erosivity were mainly located in the vicinity of Islamabad, Mankera, Sialkot-Lahore-Sahiwal and Karachi.

Keywords: rainfall erosivity; spatial downscaling; TRMM; regression modeling; Pakistan

降雨侵蚀力是指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力[1]。它是通用土壤流失方程 USLE 中首要的基础因子,其大小与降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨动能等参数有关[2]。降雨侵蚀力的估算方法按数据源可分为站点实测法和遥感估算法 2 类。站点实测法采用站点观测的连续降雨过程资料或统计资料来估

收稿日期:2016-12-13

资助项目:中国科学院对外合作重点项目(GJHZ201320);国家自然科学基金项目(41631180);国家重点研发计划(2016YFA0600103,2016YFC0500201-06)

第一作者:彭洁(1991—),女,硕士研究生,从事生态系统遥感评估研究。E-mail:pengjie0226@163.com

通信作者:李爱农(1974—),男,博士,研究员,从事山地定量遥感及其综合应用研究。E-mail:ainongli@imde.ac.cn

算降雨侵蚀力[2]。该方法能准确反映站点周边区域的降雨侵蚀力状况,但由于部分区域的站点稀少、分布不均匀和降雨资料缺失等原因,难以获取大区域尺度的降雨侵蚀力空间分布格局。遥感估算法则采用空间上连续分布的卫星降雨资料[3-4],可以弥补站点实测法难以实现空间全覆盖的不足。

TRMM 卫星反演降雨数据质量总体可靠,在中纬度地区(50° S—50° N)具有较强的可用性,且数据精度随时间尺度的扩大而大幅度提高[5-6]。与 GSMaP、CMORPH、PERSIANN 等降雨资料相比,TRMM 3B42 降雨资料的时空分布规律更接近地面实测资料[7-8],是用于大范围、长时间序列降水时空特征分析的重要数据源。目前,利用 TRMM 3B42 数据结合 RUSLE 模型估算降雨侵蚀力,在如非洲、中国等国家或地区已有研究[3,9],且估算结果能准确反映大尺度空间范围内降雨侵蚀力的空间分布格局及动态变化趋势。然而,TRMM 数据的空间分辨率仍然无法满足小区域尺度降雨侵蚀力估算的需求,需要进一步空间降尺度处理。在关于 TRMM 数据的降尺度研究中,应用较多的是统计降尺度法[10-11]。该方法根据一定的函数关系把地表形态特征(地形、植被等)融入到降尺度过程中[12],常用于机理不明确的遥感信息尺度转换[13]。目前,较多的研究关注 TRMM 卫星产品的空间降尺度,却还少见对降雨侵蚀力的空间降尺度研究。

中巴经济走廊作为"一带一路"建设的旗舰项目,起点在喀什,终点在巴基斯坦瓜达尔港,是一条包括公路、铁路、油气管道和光缆通道的贸易走廊。巴基斯坦是中巴经济走廊经过的主要国家,其生态环境状况对中巴经济走廊建设具有重要意义。作为南亚地区水土流失最严重的国家之一,巴基斯坦全境受水蚀的影响面积达到 130 500 km^2[14]。开展巴基斯坦降雨侵蚀力估算及空间降尺度模拟研究,以获取详细的降雨侵蚀力空间分布信息,能够为中巴经济走廊区域资源环境承载能力评估提供重要数据支撑。

本文利用 TRMM 3B42 降雨数据结合 RUSLE 模型估算 2010 年巴基斯坦的降雨侵蚀力,根据降雨侵蚀力与气象、地形、植被等因子之间的关系构建空间降尺度模型,将降雨侵蚀力的空间分辨率从 0.25° 提高到 1 km;在对空间降尺度模型进行精度评价及误差分析的基础上,定量分析了巴基斯坦降雨侵蚀力现状及其空间格局。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

巴基斯坦位于南亚次大陆西北部的印度河流域,地处 23°30′—36°45′ N,61°—75°31′ E 之间,国土面积约为 881 913 km^2(含巴控克什米尔地区)。地形复杂,包含北部高山区、西部低山区、俾路支高原、波特瓦尔高原、旁遮普平原、信德平原等大的地貌单元。研究区地处热带季风区西缘,大部分区域属热带干旱和半干旱气候类型。年累计降雨量为 50～1 000 mm,具有明显的时空分异特征,其中北部山区的年累计降雨量超过 2 000 mm,干旱地区通常在 125 mm 以下。通常情况下,约有 50%～75%的夏季降雨与季风有关,而西风扰动则是造成冬季降雨的主要原因[15]。研究区水土流失严重,最高记录曾达到 150～165 t/(hm^2 · a)。据估计,印度河 1990 年的输沙量为 4.49 t/h,位列世界第 5。印度河每天向塔贝拉水库倾注的泥沙量达 500 000 t,导致塔贝拉水库的使用寿命和储蓄能力分别下降 22%和 16%[14]。

1.2　数据来源

本研究采用的数据主要包括 2010 年的 TRMM 3B42 降雨数据、站点降雨量数据、归一化植被指数(NDVI)数据、高程数据和土地利用/土地覆盖变化(LUCC)数据。TRMM 3B42 产品来源于 NASA(http://trmm.gsfc.nasa.gov/),是采用 3B－42 算法得到的准全球降雨估量(mm/h),空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为 3 h。站点降雨量数据来源于美国国家气候数据中心(http://www.ncdc.noaa.gov/),经薄盘样条法[16]插值得到的空间年降雨量数据用于线性回归模型的构建。NDVI 数据采用 2010 年的 MODIS 13A3 产品,空间分辨率为 1 km,经最大值合成得到年均最大 NDVI。高程数据采用了 90 m 分辨率的 SRTM DEM 数据。LUCC 数据采用了全球 30 m 土地覆被产品 GlobeLand30－2010。

1.3　指标计算

1.3.1　*降雨侵蚀力估算*　USLE/RUSLE 模型是目前应用最广泛的土壤侵蚀模型。该模型采用 30 min 最大降雨强度 I_{30} 与降雨动能 E 的乘积 EI_{30} 作为衡量降雨侵蚀力的指标,预报多年平均土壤流失量。在本研究中,降雨侵蚀力的估算采用朱强等[3]对 R 因子的改进算法,计算公式为:

$$R_e=[0.29-0.2088\exp(-0.082i_{avr})]\times\Delta V\times I_{180} \quad (1)$$

式中:R_e 为次降雨侵蚀力因子((MJ · mm)/(hm^2 · h));i_{avr} 为 TRMM 3B42 资料中次降雨过程的平均降雨强度(mm/h);ΔV 为次降雨过程的降雨量(mm);I_{180} 为 TRMM 3B42 降雨数据中的次降雨过程的最大 3 h 降雨强度(mm/h)。年尺度降雨侵蚀力((MJ · mm)/(hm^2 · h · a))的估算根据全年的次降雨侵蚀力累加获得。

1.3.2　*空间降尺度*　本研究利用 0.25°分辨率的年

降雨侵蚀力结合高程(X_1)、坡度(X_2)、纬度(X_3)、经度(X_4)、LUCC(X_5)、年均 NDVI(X_6)和年降雨量(X_7)等因子,构建巴基斯坦 2010 年降雨侵蚀力多元线性回归模型,并结合回归预测的残差值,得到空间降尺度后的降雨侵蚀力空间数据。具体步骤如下:

首先将 7 个因子分别重采样到 0.25°和 1 km 分辨率上,其中 LR(低空间分辨率)为 0.25°,HR(高空间分辨率)为 1 km。

(1)为了消除各因子之间量纲的差异,采用极差标准化法对 7 个因子进行标准化处理;

(2)在 0.25°尺度上建立多元线性回归方程;

$$Y_{LR}=a+b_1\times X_1+b_2\times X_2+b_3\times X_3+b_4\times X_4+b_5\times X_5+b_6\times X_6+b_7\times X_7 \quad (2)$$

式中:Y_{LR}为 0.25°尺度上回归模型预测的降雨侵蚀力;a,b_1,b_2,b_3,b_4,b_5,b_6,b_7 为线性回归模型拟合系数。

(3)在 0.25°尺度上,计算 TRMM 3B42 降雨侵蚀力 Y_{3B42} 与预测值 Y_{LR} 的残差 $\Delta T_{\mathrm{TRMM}_{LR}}$;

$$\Delta T_{\mathrm{TRMM}_{LR}}=Y_{3B42}-Y_{LR} \quad (3)$$

(4)将 0.25°尺度的回归模型系数代入到 1 km 尺度的回归模型中,得到 1 km 尺度上回归模型预估的降雨侵蚀力 Y_{HR};

(5)采用样条插值法将残差 $\Delta T_{\mathrm{TRMM}_{LR}}$ 插值到 1 km 尺度上得到 $\Delta T_{\mathrm{TRMM}_{HR}}$。将 1 km 尺度上的残差与预测值叠加得到 1 km 尺度上的降雨侵蚀力数据 Y_{RE}。

$$Y_{RE}=Y_{HR}+\Delta T_{\mathrm{TRMM}_{HR}} \quad (4)$$

1.3.3 精度验证

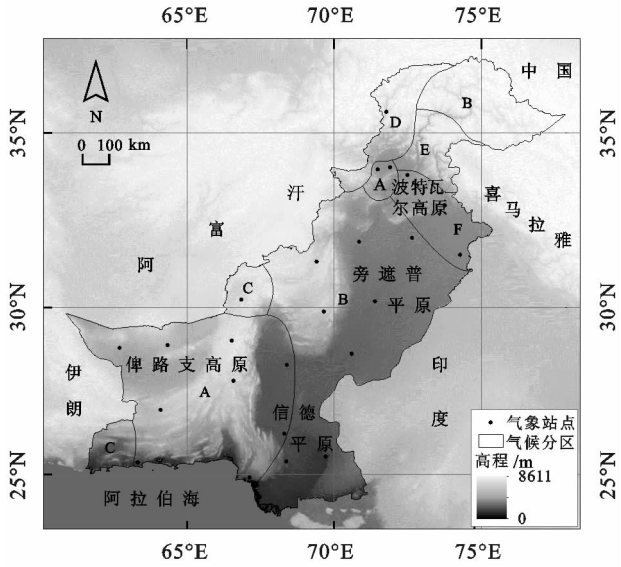
(1)回归模型的精度验证。回归模型的精度验证采用交叉验证的方法,即 2/3 的样本用于多元线性回归模型的构建,其余 1/3 的样本用于回归模型的精度检验。样本的选取规则如下:在研究区范围内将 0.25°空间分辨率的 TRMM 影像像元按从左到右从上到下的顺序排列,每 3 个像元视为一组,提取每组中第 1 个和第 3 个像元用于模型的构建,第 2 个像元用作模型精度的检验。

(2)降尺度模型模拟结果的精度验证。本研究采用 Hussain 等[17]完成的巴基斯坦气候分区图(图 1),计算不同气候区中降尺度模型模拟的降雨侵蚀力与 TRMM 3B42 数据估算的降雨侵蚀力的相关系数(R^2)、偏差(Bias)和均方根误差(RMSE),以此来检验降雨侵蚀力降尺度结果的精度。

2 结果与分析

2.1 0.25°尺度上的年降雨侵蚀力

由图 2 可知,巴基斯坦 2010 年的降雨侵蚀力整体上比较弱,平均值仅为 524.15 (MJ · mm)/(hm² · h · a),比我国西北内陆的西藏、青海等省区的降雨侵蚀力略高[18-19];巴基斯坦 2010 年的降雨侵蚀力范围从 0.58～5 929.85 (MJ · mm)/(hm² · h · a),与我国干旱地区、半干旱地区及半湿润地区的年均降雨侵蚀力变化范围相似[19-20]。巴基斯坦 2010 年的降雨侵蚀力空间分布差异大,呈现出东部高西部低的空间分布格局。降雨侵蚀力与当年降雨的空间分布格局大致相同,但存在一定的差异。其中,降雨侵蚀力的高值区域主要集中在波特瓦尔高原上的伊斯兰堡附近区域、印度河平原上游的门盖拉镇附近区域、锡亚尔科特—拉合尔—萨希瓦尔沿线区域,以及沿海城市卡拉奇附近地区。这些地区 2010 年的年累计降雨量在 700～1 500 mm 之间,虽然不是降雨量最高的地区,但降雨集中,降雨强度大。降雨侵蚀力次一级的地区主要分布在降雨侵蚀力高值区周围以及瓜达尔等地,前者降雨侵蚀力较高主要是因为该地区夏季降雨较丰富;后者降雨侵蚀力较高除夏季降雨因素外,还受到冬季降雨的影响。



注:气候 A 区为俾路支高原及沿海地区;气候 B 区为巴基斯坦中部、南部沙漠及小喜马拉雅山脉地区;气候 C 区为俾路支高原西北部和莫克兰沿海地区;气候 D 区为西北山区;气候 E 区为比尔本贾尔岭和穆里山区;气候 F 区为印度平原上游和波特尔高原地区。

图 1 研究区概况

可见,降雨是产生降雨侵蚀力的主要原因。造成 2010 年巴基斯坦境内降雨侵蚀力空间分布格局的原因主要有以下 2 点:(1)夏季季节性降雨的空间分布,巴基斯坦的雨季集中在 7 月和 8 月,来自印度洋的暖湿气流向北推进,在巴基斯坦北部与自北而来的冷空气相遇,形成强烈降雨[21-22]。(2)大气环流持续异常活动,2010 年 7 月,东欧平原上空形成的暖高压向北伸展导致高压东侧的偏北气流不断引导极地的干冷气流南下进入巴基斯坦,干冷气流在巴基斯坦至阿富汗中南部与季风暖湿气流不断交汇,最终导致该地区出现持续强降雨[22]。

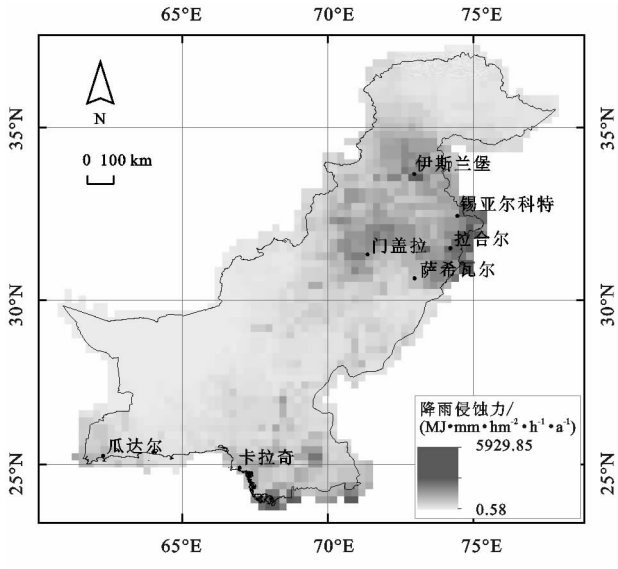


图 2　0.25°尺度上的降雨侵蚀力空间分布

2.2　1 km 尺度上的年降雨侵蚀力

2.2.1　空间降尺度模拟结果　基于 TRMM 3B42 降雨侵蚀力(Y_0)与 7 个选定因子构建了多元线性回归模型,如下:

$$Y_1 = 0.76 + 0.48X_1 + 0.21X_2 + 0.34X_3 - 0.37X_4 + 0.04X_5 - 0.21X_6 - 1.25X_7$$

式中:Y_1 为回归模型预测的年降雨侵蚀力;X_1 为高程;X_2 为坡度;X_3 为纬度;X_4 为经度;X_5 为 LUCC;X_6 为 NDVI;X_7 为降雨量。

上述模型经过指数函数修正后,模型的模拟精度和独立验证精度如图 3 所示。

图 4 展示了 TRMM 3B42 降雨数据估算的降雨侵蚀力从 0.25°空间分辨率提高到 1 km 空间分辨率的过程。由图 4a 和图 4b 可知,2 种分辨率上回归模型模拟的降雨侵蚀力的变化范围基本一致,且具有相似的空间分布格局。由图 4c 和图 4d 可知,大部分地区的残差值在(−200)～200 (MJ • mm)/(hm² • h • a)之间。个别地区的数值差异较大,如伊斯兰堡附近地区的残差值较低,锡亚尔科特—拉合尔—萨希瓦尔沿线和卡拉奇附近的残差值较高。

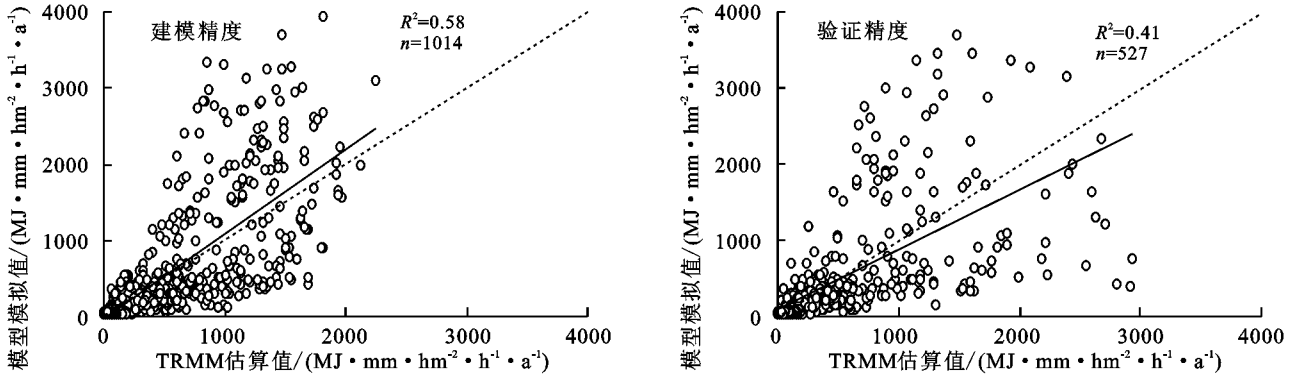


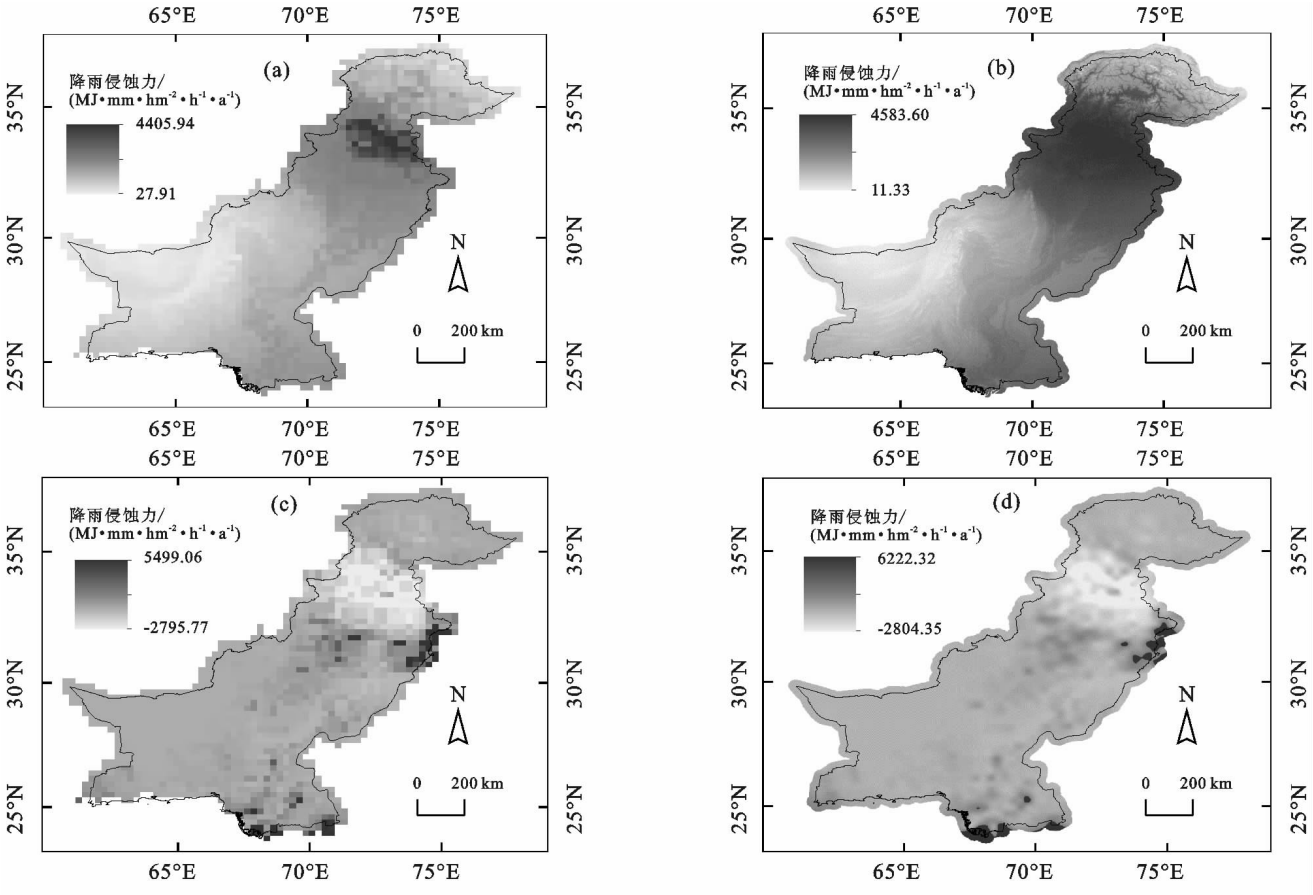
图 3　回归模型的建模精度及验证精度

2.2.2　降尺度结果的精度评估　利用巴基斯坦气候分区数据,分别计算 6 个气候区及巴基斯坦全境的降雨侵蚀力平均值、相关系数(R^2)、偏差值(Bias)及均方根误差(RMSE)。由表 1 可知,6 个气候区的 R^2 处于 0.78～0.95 之间。其中,B 区和 C 区拟合效果最好(R^2=0.95),E 区相对较差(R^2=0.78)。6 个气候区的降尺度结果都出现了高估现象(Bias>0)。此外,RMSE 范围为 5.46～15.93 (MJ • mm)/(hm² • h • a),各气候区的 RMSE 均低于其对应降雨侵蚀力平均值的 3.52%。就巴基斯坦而言,模拟的降雨侵蚀力数据与 TRMM 3B42 降雨数据估算的降雨侵蚀力数据显著相关(R^2=0.94),降尺度结果存在普遍高估现象(Bias=0.15),RMSE 结果远远低于降雨侵蚀力平均值(RMSE=8.77 (MJ • mm)/(hm² • h • a))。

综上所述,空间降尺度模型模拟的降雨侵蚀力的空间分辨率明显提高,且降尺度结果能够更加全面地反映巴基斯坦境内降雨侵蚀力的空间分布格局,说明本文利用气象、地形、植被等因素建立的降雨侵蚀力空间降尺度模型是可行的。

2.2.3　巴基斯坦年降雨侵蚀力空间分布

由图 5 可知,巴基斯坦境内降雨侵蚀力平均值为 604.71 (MJ • mm)/(hm² • h • a),最大值为 6 391.76 (MJ • mm)/(hm² • h • a)。巴基斯坦的降雨侵蚀力降尺度结果与 TRMM 估算结果(图 2)的空间格局一致。降雨侵蚀力高值区均集中在伊斯兰堡、门盖拉镇、锡亚尔科特—拉合尔—萨希瓦尔沿线,以及卡拉奇等城镇附近地区。这 4 个地区的年降雨侵蚀力均达到 1 600 (MJ • mm)/(hm² • h • a),占总面积的 9.54%。与图 2 相比,图 5 包含了更丰富的细节信息,特别是地形变化较剧烈的地区,如北部山区和俾路支高原东缘。这些地区位于夏季强对流团中心地带之外,降雨量较小,集中降雨情况少,对地形等因素的响应更为强烈,细节特征也更为丰富。



注:(a)为 0.25°尺度上回归模型模拟值;(b)为 1 km 尺度上回归模型模拟值;(c)为 0.25°尺度上残差分布;(d)为 1 km 尺度上残差插值分布。

图 4 降尺度过程

表 1 巴基斯坦各区域年降雨侵蚀力降尺度结果的验证

区域	降雨侵蚀力平均值/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1})	R^2	Bias	RMSE/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1})
A 区	275.65	0.93	0.11	5.46
B 区	181.40	0.95	0.22	6.39
C 区	635.98	0.95	0.11	8.27
D 区	1535.00	0.80	0.13	14.20
E 区	517.44	0.78	0.36	13.67
F 区	1059.91	0.83	0.24	15.93
巴基斯坦	524.15	0.94	0.15	8.77

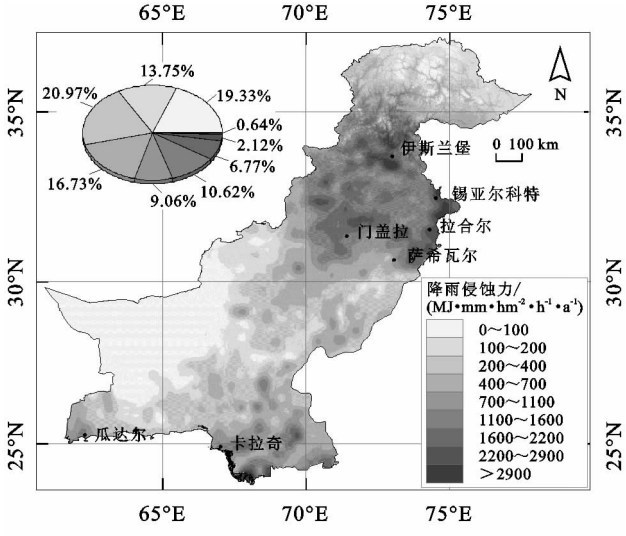


图 5 1 km 尺度上的降雨侵蚀力空间分布

3 讨 论

本研究针对地面气象站点的数量与降雨资料不足导致高空间分辨率降雨侵蚀力估算方面存在的问题,以巴基斯坦为例,利用 TRMM 3B42 数据估算了 2010 年巴基斯坦的年降雨侵蚀力,并结合气象、地形、植被等因子构建了降雨侵蚀力空间降尺度模型,将降雨侵蚀力数据的空间分辨率从 0.25°提升到 1 km;在对空间降尺度模型进行精度评价及误差分析基础上,分析了巴基斯坦降雨侵蚀力现状及空间格局。

本文构建的降雨侵蚀力空间降尺度模型还存在一些误差,可以从以下 4 个方面加以改进:其一,根据气象站点降雨量数据与 TRMM 3B42 降雨数据之间的线性关系,考虑对 TRMM 3B42 降雨数据进行订正,在此基础上估算降雨侵蚀力,以减少 TRMM

3B42 降雨数据本身带来的误差;其二,参与线性回归模型构建的各因子之间相互影响,但在回归模型中以独立的形式参与建模,从而降低了模型的可靠性;另外,本文选择的建模因子多与气象、地形、植被等因素有关,还需进一步考虑岩性、土壤等下垫面的影响;其三,在构建回归模型时,可根据各因子与降雨侵蚀力之间、以及各因子之间存在的函数关系,尝试多元线性回归以外的其他方法;最后,本文仅针对空间分辨率开展了降雨侵蚀力降尺度研究,主要侧重于年降雨侵蚀力,尚需进一步考虑时间方面(尤其是季、月及日时间尺度上)的降尺度研究,以得到更高时空分辨率的降雨侵蚀力数据。

4　结 论

(1)空间降尺度模型模拟的降雨侵蚀力与 TRMM 3B42 估算的降雨侵蚀力显著相关(R^2 = 0.94)。巴基斯坦年降雨侵蚀力的空间分辨率明显提高,细节特征明显增强。尤其是北部山区和俾路支高原东缘等地形变化较剧烈的地区,这些地区位于夏季强对流团中心地带之外,降雨量较小,集中降雨情况少,对地形等因素的响应更为强烈。

(2)巴基斯坦 2010 年的降雨侵蚀力平均值仅为 524.15 (MJ·mm)/(hm²·h·a),分布范围为 0.58 ~5 929.85 (MJ·mm)/(hm²·h·a);空间分布差异大,整体上呈现出东部高西部低的空间格局,高值区(降雨侵蚀力大于 1 600 (MJ·mm)/(hm²·h·a)的地区)主要集中在伊斯兰堡、门盖拉镇、锡亚尔科特—拉合尔—萨希瓦尔沿线,以及卡拉奇等城镇附近区域,主要与夏季季风性强降雨有关。

参考文献:

[1] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.

[2] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等.中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J].中国农学通报,2011,27(4):1-5.

[3] 朱强,陈秀万,樊启祥,等.基于 TRMM 的降雨侵蚀力计算方法[J].中国科学:技术科学,2011,41(11):1483-1492.

[4] Fan J R, Chen Y, Yan D, et al. Characteristics of rainfall erosivity based on tropical rainfall measuring mission data in Tibet, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(6): 1008-1017.

[5] Ouma Y O, Owiti T, Kipkorir E, et al. Multitemporal comparative analysis of TRMM-3B42 satellite-estimated rainfall with surface gauge data at basin scales: daily, decadal and monthly evaluations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(24): 7662-7684.

[6] 沈彬,李新功.塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估[J].干旱区地理,2015,38(4):703-712.

[7] Qin Y X, Chen Z Q, Shen Y, et al. Evaluation of satellite rainfall estimates over the Chinese mainland[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11649-11672.

[8] 张蒙,黄安宁,计晓龙,等.卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性分析[J].高原气象,2016,35(1):34-42.

[9] Vrieling A, Hoedjes J C B, Velde M V D. Towards large-scale monitoring of soil erosion in Africa: Accounting for the dynamics of rainfall erosivity[J]. Global and Planetary Change, 2014, 115(4): 33-43.

[10] Jia S F, Zhu W B, Lu A F, et al. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3069-3079.

[11] 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.

[12] Fang J, Du J, Xu W, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area[J]. Advances in Water Resources, 2013, 61(11): 42-50.

[13] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等.气象资料的统计降尺度方法综述[J].地球科学进展,2011,26(8):837-847.

[14] Shah Z U H, Arshad M. Land degradation in Pakistan: A serious threat to environments and economic sustainability[EB/OL]. [2016-08-15]. http://ecoweb.com/edi/060715.html.

[15] Hussain M S, Lee S. The regional and the seasonal variability of extreme precipitation trends in Pakistan [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 49(4): 421-441.

[16] 姜晓剑,刘小军,黄芬,等.逐日气象要素空间插值方法的比较[J].应用生态学报,2010,21(3):624-630.

[17] Hussain M S, Lee S. A classification of rainfall regions in Pakistan[J]. Journal of the Korean Geographical Society, 2009, 44(5): 605-623.

[18] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.

[19] Yang F B, Lu C H. Spatiotemporal variation and trends in rainfall erosivity in China's dryland region during 1961 - 2012[J]. Catena, 2015, 133(10): 362-372.

[20] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.

[21] Salma S, Rehman S, Shah M A. Rainfall trends in different climate zones of Pakistan[J]. Pakistan Journal of Meteorology, 2012, 9(17): 37-47.

[22] 张慧媛.大气环流异常是巴基斯坦严重洪灾的主因[EB/OL].[2016-09-03]. http://www.weather.com.cn/index/gjtq/08/947092.shtml.