金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征

彭玉芝[1,2]，范建容[1]，于 江[3]，朱 昕[3]

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国三峡建设管理有限公司，四川 成都 610041)

摘 要：[目的] 分析金沙江流域降雨侵蚀力的时空分布的变化特征，为优化流域土壤流失定量评估及水土保持规划编制工作提供支持。[方法] 利用气象台站降水资料验证了 TRMM 降水数据估算降雨侵蚀力在金沙江流域内的适用性，并结合气象站、TRMM 和 DEM 数据，在 Arc/Info 软件提供的地图代数运算功能支持下，利用日雨量模型估算降雨侵蚀力开展分析和研究。[结果] 1998—2015 年 TRMM 3B42 降水数据和气象站降水数据估算金沙江流域多年平均的总体精度达到了 82%，说明二者估算降雨侵蚀力的结果在合理误差范围内，金沙江流域降雨侵蚀力大体呈由东南向西北递减的趋势，地区差异大。总体上，高程越小的地区，降雨侵蚀力越大。流域年际变化同样存在空间分异，整体上呈现降低的趋势。[结论] 将 TRMM 3B42 降水数据应用于气象站点稀疏的金沙江流域的多年平均降雨侵蚀力估算是可行的。但是各个站点估算结果的一致性高低程度不同，且某些年份的适用性程度受极端气候的影响。

关键词：降雨侵蚀力；时空分布；TRMM；金沙江流域

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)02-0008-06 **中图分类号**：S157.1，TP79

文献参数：彭玉芝，范建容，于江，等. 金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 水土保持通报，2018，38(2)：8-13. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.002. Peng Yuzhi，Fan Jianrong，Yu Jiang，et al. Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Jinsha River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(2)：8-13.

Spatial and Temporal Distribution of Rainfall Erosivity in Jinsha River Basin

PENG Yuzhi[1,2]，FAN Jianrong[1]，YU Jiang[3]，ZHU Xin[3]

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment，Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy，Chengdu，Sichuan* 610041，*China*；2. *University of Chinese Academy of Sciences，Beijing* 100049，*China*；3. *China Three Projects Development Co.，Ltd.，Chengdu，Sichuan* 610041，*China*)

Abstract：[Objective] The spatial and temporal distribution of rainfall erosion in the Jinsha river basin from 1998 to 2015 were analyzed，to provide references for optimizing the quantitative prediction of soil loss in watershed and the planning of soil and water conservation. [Methods] The rainfall data of the meteorological stations were used to verify the applicability of TRMM precipitation data. Upon which，the rainfall erosion force in Jinsha river basin was estimated using daily precipitation model. The estimation was conducted by combining with weather stations data，TRMM and DEM data，and in the support of Arc/Info software's map algebra operation function. [Results] The TRMM 3B42 rainfall data and weather station precipitation data were used to estimate the rainfall erosion force in Jinsha river basin for many years，and the average overall accuracy reached 82%，illustrating that the estimation of rainfall erosion by the two sourced data was within the reasonable range of error. The estimated rainfall erosion force had regional difference and elevation difference，from the southeast to the northwest，it had a general diminishing trend；the smaller the elevation was，the greater the rainfall erosion. The inter annual change in the basin also had spatial differentiation，and the overall temporal trend was decreasing. [Conclusion] It is feasible to apply TRMM 3B42 precipitation

收稿日期：2017-07-26 **修回日期**：2017-11-16

资助项目：中国三峡建设管理有限公司科研项目“陆生生态评价中的 3S 应用技术研究”(JG/17024 B)

第一作者：彭玉芝(1992—)，女(汉族)，四川省绵阳市人，硕士研究生，从事水利水电工程生态环境研究及地理信息系统和遥感研究。E-mail：yuzhibeauty@qq.com。

通讯作者：范建容(1969—)，女(汉族)，四川省井研县人，博士，研究员，主要从事山地生态与灾害遥感研究。E-mail：fjrong@imde.ac.cn。

data to the annual mean rainfall erosion force estimation in the Jinsha River basin. However, the consistency of each site's estimation results was different, and the applicability of certain years was influenced by extreme weather.

Keywords: rainfall erosivity; space-time distribution; TRMM; Jinsha River basin

降雨侵蚀力(rainfall erosivity)是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力[1],是土壤流失方程中首要的基础因子,其与降雨强度、降雨量、降雨历时等降雨参数有关[2]。我国学者对近百年来中国区域的降雨侵蚀力也给予了密切关注。刘斌涛等[3]分析了近 50 a 我国降雨侵蚀力变化特征,发现我国年均降雨侵蚀力与年均降水量空间分布基本一致,呈由东南向西北递减的趋势,但年际变化趋势不显著,存在四个明显的上升区域和两个明显的下降区域,预示着长江、黄河源头土壤侵蚀可能加剧的风险。汪言在等[4]对三峡库区(重庆段)季节降雨侵蚀力变化的研究发现,1955—2010 年仅夏季降雨侵蚀力显著增大,因此在夏季可提前做好防治措施。由此可见,对降雨侵蚀力的研究是及其重要的。

虽然现有气象台站观测降雨数据精度较高,但仍存在站点分布稀疏和观测范围小等局限性,尚不能满足大流域降雨观测的需求,TRMM(tropical rainfall measuring mission satellite,热带测雨任务卫星)至今已经积累了全球 50°S—50°N 范围内海量的高时空分辨率降水数据,数据格点分布均匀,可有效弥补气象站点的短板来刻画流域长时间序列降水及降雨侵蚀力的空间分布[5]。

金沙江流域降水空间分异大[6],且土壤侵蚀较严重,目前可用来加密的水文卫星数据仅有 GRACE 和 TRMM,TRMM 精度较高,因此本文拟分析金沙江流域各个气象站点降水数据和 TRMM 降水数据估算降雨侵蚀力的一致性程度。并在二者估算结果在合理误差范围内的基础上,结合 DEM 数据来分析 1998—2015 年金沙江流域降雨侵蚀力变化的时空特征,为流域水土流失影响做出可靠评估,为优化流域土壤流失定量评估及水土保持规划编制工作提供支持。

1　研究数据和方法

1.1　研究数据

本文所用数据包括:地面气象站点实测降水数据、TRMM 3B42 降水数据和 DEM 数据。①实测降水数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/user/toLogin.html),本文采用金沙江雅砻江流域及周边 37 个国家标准气象站 1998 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的逐日降水量。②TRMM 3B42 的 1998 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的逐日数据,分辨率 0.25°×0.25°,从 https://pmm.nasa.gov/TRMM 免费下载。③DEMASTERGDEM,其空间分辨率为 30 m,从地理空间数据云官网获取,http://www.gscloud.cn/。流域高程及气象站点位置如图 2 所示。

1.2　降雨侵蚀力计算

USLE 中用次降雨总动能与 30 min 最大雨强 I_{30} 的乘积 EI_{30} 来计算降雨侵蚀力,但次降雨过程观测资料很难获取,因此一般采用简易算法模型来计算降雨侵蚀力。章文波等[7]的研究表明,相比较月、逐年、年平均和月平均模型,以日雨量模型计算侵蚀力的精度最高,且在雨量丰富的南方地区,日雨量模型表现更稳定,精度较高。本文采用以半月时段为步长的简易算法模型:

$$M_i=\alpha\sum_{j=1}^{k}(D_j)^{\beta} \tag{1}$$

式中:M_i——第 i 个半月时段的侵蚀力值〔MJ·mm/(km²·h·a)〕;k——该半月时段内的天数;D_j——半月时段内第 j 天的侵蚀性日雨量,要求日雨量≥12 mm,否则以 0 计算,阈值 12 mm 与中国侵蚀性降雨标准一致[8];α 和 β 为模型待定参数,利用日降雨特征指标来估计参数 α 和 β 的公式为:

$$\beta=0.8363+18.177/P_{d12}+24.455/P_{y12} \tag{2}$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{3}$$

式中:P_{d12}——雨量≥12mm 的日平均雨量(mm);P_{y12}——日雨量≥12 mm 的年平均雨量(mm)。

1.3　TRMM 降水数据适用性验证

将 1988—2015 年 32 个气象站的实测降水量估算的降雨侵蚀力作为"真"值来对由 TRMM 降水数据估算的降雨侵蚀力进行基于相关系数和相对误差(公式 4—5)的一致性分析[9](表 1)。

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{4}$$

$$\mathrm{Bias}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-x_i)/\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{5}$$

式中:$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$,$\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i$;$n$——样本容量;$x_i$,$y_i$——气象站点降水数据和 TRMM 3B42 降水数据。R 取值范围[0,1],越接近于 1,数据一致性越好。Bias反映了 TRMM 与站点实测数据估算的降雨侵蚀力在数值上的偏离程度,越接近 0,数据越精确(下文

提到的|Bias(%)|表示的是绝对误差,是 Bias 的绝对值,也能反映 TRMM 与站点实测数据估算的降雨侵蚀力在数值上的偏离程度)。

由表 1 可知:①用相同模型估算年降雨侵蚀力,TRMM 降水数据估算结果普遍高于气象站实测数据的估算结果,符合了卫星降水数据存在一定程度上的高估的结论[10]。②对由 1998—2015 年 32 个站点的多年平均相对误差分析来看,有 2/3 的站点绝对误差小于 20%。四川省稻城、盐源和木里地区、云南省昭通地区、青海省托托河等地误差最大,云南省会泽和元谋地区、四川省理塘等地误差最小。且章文波等[4]也指出,在年平均降雨量较少的区域,模型稳定性较差。本文使用的模型在年平均降雨量小于 500 mm 的地区,稳定性较差,计算多年平均降雨侵蚀力的相对误差变化范围较大[11],但由于总体精度达到了 82%,说明二者估算的结果在合理误差范围内。

表 1 TRMM 和气象站点降水数据估算年均降雨侵蚀力的比较

气象站名称	省份	气象站点估算年平均降雨侵蚀力/〔MJ·mm/(km²·h·a)〕	TRMM 估算年平均降雨侵蚀力/〔MJ·mm/(km²·h·a)〕	相对误差/%	相关系数	TRMM 探测能力(及比例)	时段偏差等级	站点个数
巴 塘	四川	885.48	1 032.37	−17	0.944			
西 昌	四川	5 020.66	5 939.29	−18	0.605			
攀枝花	四川	4 317.54	4 782.57	−11	0.731			
新 龙	四川	1 069.92	1 184.86	−11	0.918		−20%～−10%	7
清水河	青海	540.45	604.17	−12	0.885			
伍道梁	青海	446.45	516.35	−16	0.839			
中 甸	云南	1 620.61	1 815.58	−12	0.624			
昭 觉	四川	3 773.2	4 668.52	−24	0.781			
甘 孜	四川	731.54	899.66	−23	0.740		−30%～−20%	3
石 渠	四川	669.12	808.1	−21	0.649	高估(63%)		
德 格	四川	681.41	1 017.18	−49	0.532			
色 达	四川	784.41	1 111.15	−42	0.673			
曲麻莱	青海	483.82	683.82	−41	0.626		−50%～−30%	5
玉 树	青海	436.93	607.56	−39	0.795			
九 龙	四川	1 878.15	2 497.49	−33	0.579			
稻 城	四川	1 286.71	2 001.83	−56	0.782			
盐 源	四川	2 156.72	3 705.71	−62	0.558			
木 里	四川	2 319.01	3 671.06	−58	0.768		<−50%	5
昭 通	云南	1 770.61	2 679.81	−51	0.881			
托托河	青海	341.48	587.32	−59	0.588			
雷 波	四川	3 561.86	3 655.32	−3	0.807			
丽 江	云南	3 313.26	3 442.95	−4	0.662		−10%～0	4
威 宁	贵州	3 188.24	3 288.01	−3	0.786			
道 孚	四川	972.59	1 066.95	−10	0.665			
理 塘	四川	1 398.91	1 373.25	2	0.620	近似(28%)		
会 理	四川	6 015.31	5 427.5	10	0.691			
会 泽	云南	2 825.86	2 779.45	2	0.723		0%～10%	5
元 谋	云南	3 087.94	3 084.82	0	0.879			
楚 雄	云南	3 381.19	3 223.86	5	0.808			
华 坪	云南	6 876.09	5 520.94	20	0.780		10%～20%	2
沾 益	云南	3 607.52	2 890.78	20	0.575	低估(9%)		
昆 明	云南	4 578.81	2 766.6	40	0.852		30%～50%	1

注:多年平均绝对误差(|Bias|)为 24%;多年平均相对误差(|Bias|)为−18%;总体精度为 82%。

由表 2 可知:①气象站点和 TRMM 降水数据估算降雨侵蚀力的误差年际差异较大,在 2%～46%范围内,超过 75%的精度高于 80%,进一步说明利用 TRMM 降水数据估算金沙江流域的年降雨侵蚀力是可行的。②在 18 a 中,仅 2011 年的相对误差大于 0。2011 年全国平均降水量为近 60 a 最少,全国平均气

温是 9.3 ℃,比常年偏高 0.5 ℃,极端高温事件多发,阶段性区域性气象灾害频繁发生,且雾霾天气增多。说明受这种极端气候的影响,TRMM 估算降雨侵蚀力偏低。

表 2　研究区 1998—2015 年 32 个气象站点和 TRMM 降水数据估算每年降雨侵蚀力的比较

年份	相关系数 R	相对误差/%	年份	相关系数 R	相对误差/%	年份	相关系数 R	相对误差/%
1998	0.892 436	−6	2004	0.818 850	−21	2010	0.748 613	−25
1999	0.826 889	−3	2005	0.890 491	−4	2011	0.641 659	10
2000	0.895 586	−15	2006	0.859 567	−2	2012	0.791 537	−14
2001	0.886 111	−23	2007	0.883 448	−9	2013	0.906 891	−7
2002	0.799 484	−5	2008	0.847 221	−26	2014	0.854 911	−4
2003	0.722 227	−14	2009	0.757 413	−46	2015	0.826 891	−15

2　结果与分析

2.1　降雨侵蚀力空间分布

丽江—木里—越西一线的下游地区,是流域降雨侵蚀最强的地区;而上游大部分地区,年平均降雨在 500 mm 以下,是流域降雨侵蚀最弱的地区。流域多年平均降雨侵蚀力分布如图 1 所示。从图 1 可知:①流域降雨侵蚀力的地域差异十分显著,多年平均降雨侵蚀力在 170～6 792 MJ・mm/(km²・h・a)之间,降雨侵蚀力的空间分布总体上呈自东南向西北逐渐递减的趋势。②源头的五道梁、沱沱河一带降雨侵蚀力最小,一般低于 500 MJ・mm/(km²・h・a)。中游玉树至丽江区间流域狭窄,为金沙江纵向河谷少雨区[11],降雨侵蚀力大部分在 500～1 000 MJ・mm/(km²・h・a)之间。流域降雨侵蚀力最大的位于华坪—会理—西昌一带,大部分在 4 500 MJ・mm/(km²・h・a)以上,并分别向两侧递减,其中会理站的年降雨侵蚀力最大。③流域年降雨侵蚀力与年降雨量(图 2)的空间分布大体相同,但局部受雨强的影响有所不同,这是由于降雨侵蚀力由降雨量和强度 2 个因素共同决定[12]。

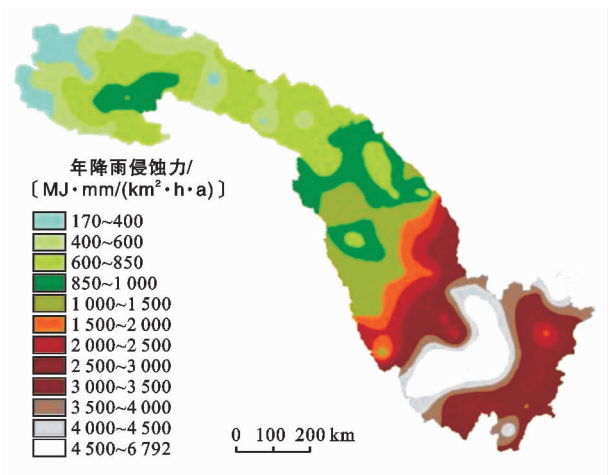


图 1　金沙江流域降雨侵蚀力空间分布图

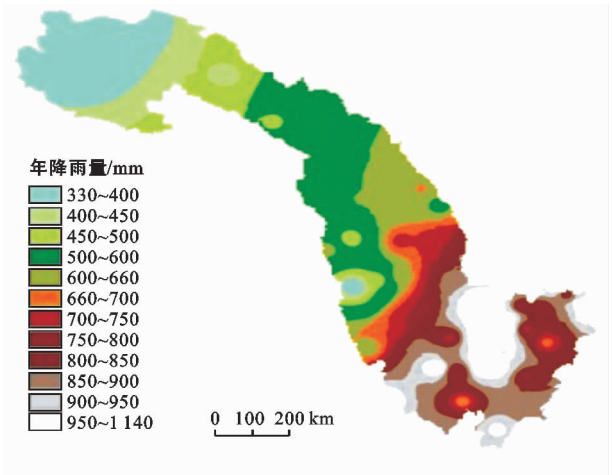


图 2　金沙江流域年降雨量分布图

2.2　降雨侵蚀力年际变化的空间特征

年际变化是指某一地理事物的量在年与年之间的变化,由 1998—2015 年的年降雨侵蚀力年际变化(图 3)可知,2001 年降雨侵蚀力最大,为 3 207.7 MJ・mm/(km²・h・a),1998—2011 年呈下降趋势,2011 年降至最小为 1 329.22 MJ・mm/(km²・h・a),之后几年降雨侵蚀力呈增加趋势,18 a 间总体呈现先减后增的趋势,这与该流域降雨量年际变化趋势相一致[13]。1998 年发生洪灾时,金沙江流域多数地区的降水总量达到近 40 a 来的最大值,降雨侵蚀力也达到最大,2011 年以后降雨侵蚀力的显著增加趋势也可以为今后侵蚀和洪灾灾害起到预测预警的作用。

在 ArcGIS 中利用地图代数功能分析年际变化,得到 1998—2015 年降雨侵蚀力年际变化量分布图(图 4)。由图 4 可以看出,金沙江流域降雨侵蚀力在 1998—2015 年整体上变化不算剧烈,总体平稳。其中流域中上游和下游东部部分地区主要为上升趋势,下游地区多呈现下降趋势,总体呈西北部增加和东南部减少的趋势,整个区域年降雨侵蚀力平均变化量为 −9.41 MJ・mm/(km²・h・a)。其中年平均增加量最大的位于青海省杂多县西北部,年平均增加量可达

77.64 MJ·mm/(km²·h·a),其中年平均减少量最大的位于云南省华坪县西北部,年平均减少量可达-177.18 MJ·mm/(km²·h·a)。经过分区统计,金沙江流域和雅砻江流域降雨侵蚀力年际变化均呈现减少趋势,金沙江流域变化最大,降雨侵蚀力呈现增加趋势的主要集中在降雨侵蚀力偏小的通天河区域。这也和高海拔地区降水量呈显著增加趋势的结论一致[14]。

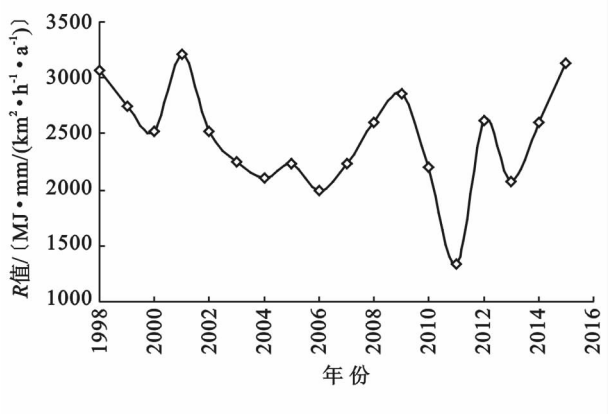


图 3 金沙江流域 1998-2015 年降雨侵蚀力年际变化

2.3 不同地形降雨侵蚀力变化时空分析

由图 1 可以看出,金沙江流域降雨侵蚀力总体上呈随高程的增加而减小的明显趋势。高程在 3 500 m 以下的丽江—木里—越西地区,河谷腹地海拔最低,高程落差较大,为降雨侵蚀力最强的区域;高程在 2 500~5 500 m 的流域中段地处横断山脉区,地形极为复杂,众多高山深谷相间并列,峰谷高差可达 1 000~3 000 m,流域内气候不仅时空变化大,而且十分显著,因此,流域内的降雨侵蚀力变幅较大,为 800~3 000 MJ·mm/(km²·h·a),且变化复杂,局地出现了高程和降雨侵蚀双高双低的情况。高程在 5 500 m 以上的青藏高原东部地区,降雨侵蚀力最低。

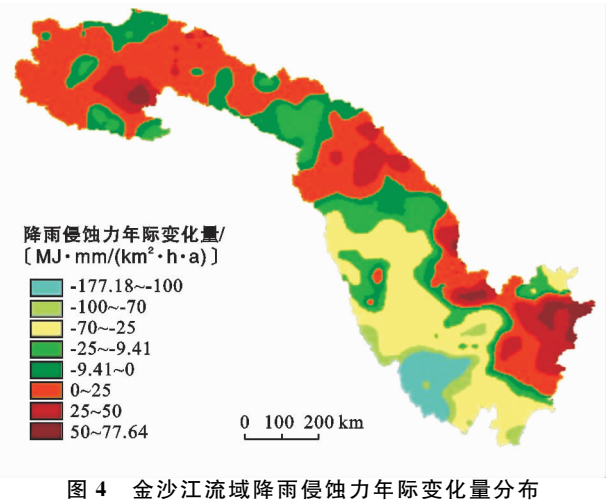


图 4 金沙江流域降雨侵蚀力年际变化量分布

金沙江流域正处于中国高原地区与东部平原地区的过渡地带,受到高原季风、热带季风与亚热带季风的综合作用,气象条件极其复杂、气候也十分多变[15],相关研究表明,该流域地形差异导致其降水差异也极为显著[16]。以气象站所在位置的高程为自变量,分别以 TRMM 3B42 数据与地面气象站点实测数据之间的相关系数 R 和和绝对误差|Bias(%)|为因变量,进行三次多项式回归分析,高程与相关系数和绝对误差的 R^2 仅为 0.180 9 和 0.114 1,且均未通过 $\alpha=0.05$ 置信度检验,不显著相关。由图 5 可以看出,高程在3 000 m以下时,随着海拔的升高,相关系数缓慢增大,绝对误差也逐渐增大,可能是海拔低于 3 000 m 的站点位于流域下游的云贵川地区,干旱、暴雨以及洪涝等极端天气现象发生的频率较高,同时由于 TRMM 卫星的不连续测量,易导致难以完全准确获取极端气候现象的降水数据,因而两者之间的偏差较大[9]。而高程在大于 3 000 m 时,随着海拔的升高,相关系数减小,绝对误差不断增大。海拔大于 3 000 m的站点由于与周边高程落差较大,水汽输送受地形阻碍,使得误差增大。

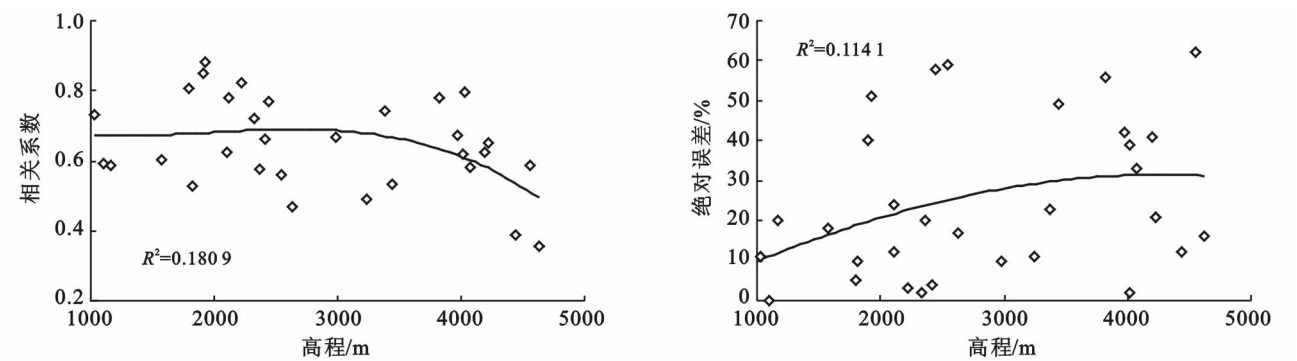


图 5 金沙江流域气象站所在位置高程与相关系数 R、绝对误差|Bias(%)|的散点图

3 结 论

(1) 利用 TRMM 3B42 降水数据和气象站降水数据估算金沙江流域多年平均降雨侵蚀力的总体精度达到了 82%,说明估算的结果在合理误差范围内,将其应用于气象站点稀疏的金沙江流域的多年平均降雨侵蚀力估算是可行的。但是各个站点估算结果的一致性高低程度不同,应用时可根据表 1 来权衡选择。

(2) 金沙江流域年降雨侵蚀力与年降雨量的空间分布大体相同,总体上呈自东南向西北逐渐递减的趋势。流域降雨侵蚀力的地域差异大,源头的五道梁、沱沱河一带降雨侵蚀力最小,下游的会理一带最大。流域降雨侵蚀力年际变化分布与降雨侵蚀力空间分布却相反,侵蚀越高的地区年际变化越小,反之越大,但流域总体年际变化不大。其中,1998 年、2011 年为 2 个典型年份,1998 年连降暴雨引发特大洪水,为研究年份中降雨侵蚀力最高的;2011 年全国平均降水量为近 60 a 最少,为研究年份中降雨侵蚀力最低的。

(3) 除局部地区地形复杂气候变化大以外,金沙江流域降雨侵蚀力总体上是呈现随高程的增加而减小的明显趋势。高程与气象站数据和 TRMM 降水数据估算的降雨侵蚀力相关系数和绝对误差不显著相关。

[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] 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.

[4] 汪言在,苟诗薇,张述林.三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力变化趋势及突变分析[J].水土保持研究,2012,19(3):1-6.

[5] Hirose M, Nnkamura K. Spatiotemporal variation of the vertical gradient of rainfall rate observed by the TRMM precipitation radar[J]. Journal of Climate, 2004, 17(17):3378-3397.

[6] 潘桂棠,徐强,等.西南"三江"多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M].北京:地质出版社,2003.

[7] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.

[8] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].土壤侵蚀与水土保持学,2000,14(4):6-21.

[9] 嵇涛,杨华,刘睿,等.TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J].地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.

[10] 王凯,陈璐,马金辉,等.TRMM 降水数据在中国降雨侵蚀力计算中的应用[J].干旱区地理,2015,38(5):948-959.

[11] 严冬,范建容,郭芬芬,等.西藏地区降水侵蚀力时空分布研究[J].水土保持通报,2010,30(4):17-21.

[12] 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.

[13] 史雯雨,张智涌,李增永.金沙江流域近 55 a 降水时空分布特征及变化趋势[J].人民长江,2016,47(18):39-43.

[14] 刘晓婉,许继军,韩志明.金沙江流域降水空间分布特征及变化趋势分析[J].人民长江,2016,47(15):36-44.

[15] 廖宇,倪长健.金沙江流域近 47 年降水特征分析[J].人民长江,2011,42(5):55-58.

[16] 张莉莉,陈进.长江上游水沙变化分析[J].长江科学院院报,2007,24(6):34-37.