
研究
简报

基于 GIS 的岷江流域降雨侵蚀力时空特征研究

史展^{1,2}, 陶和平¹, 刘斌涛¹, 郭兵^{1,2}, 宋春风^{1,2}

(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)

摘要: 利用岷江及周边流域 124 个气象水文站 1981—2010 年的日降雨资料计算了该区域的降雨侵蚀力。通过克吕格插值法生成降雨侵蚀力的空间分布图, 采用泰森多边形和 K—Means 聚类法将其划分为 3 个等级并得到各等级的空间分布格局。根据离差系数、趋势系数和倾向率指标分析了站点年际变化特征及不同等级的时空变化格局。结果显示: (1) 年均降雨侵蚀力表现出东南部高, 向西迅速降低的特征, 且呈现以雅安—乐山为中心向东北、西南递减缓慢, 向西北递减迅速的环状空间分布格局; (2) 岷江流域降雨侵蚀力聚类为侵蚀低、中、高值区, 其聚类中心分别为 1 054.73, 4 594.50 和 7 153.75 MJ·mm/(hm²·h·a), 其中侵蚀低值区主要分布在岷江流域上游和大渡河支流流域, 中值区主要分布在岷江中下游流域, 高值区集中分布在岷江中游的雅安、乐山、眉山和都江堰地区; (3) 降雨侵蚀力年际变化呈南北分异特征, 以都江堰—汶川—小金—丹巴为界, 北部变化大于南部, 变化趋势呈东西分异特征, 以茂县—理县—汶川—宝兴—天全—汉源—峨边—沐川—宜宾一线以东呈下降趋势, 以西呈上升趋势。不同地区的降雨侵蚀力变化趋势的显著程度也不同。

关键词: 降雨侵蚀力; 岷江流域; 空间分布; 变化趋势

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0097-05

中图分类号: P954

Spatial and Temporal Characteristics of Rainfall Erosivity in Minjiang River Basin

SHI Zhan^{1,2}, TAO He-ping¹, LIU Bin-tao¹, GUO Bing^{1,2}, SONG Chun-feng^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to analyze the spatial distribution and temporal change of rainfall erosivity in Minjiang River Basin, rainfall erosivity was calculated using daily data from 124 stations during 1981—2010. Its spatial distribution map was created by Kriging interpolation. Based on Thiessen polygons theory and K—Means cluster method, we divided the rainfall erosivity into three classes and analyzed the deviation coefficient, tendency coefficient and trend rate of each class. The results showed that annual rainfall erosivity was high in southeast and lowered rapidly towards west. The rainfall erosivity was divided into three classes with cluster center of 1 054.73, 4 594.50 and 7 153.75 MJ·mm/(hm²·h·a) respectively. The area of low values was mainly located in the upstream of the basin and its branch Dadu River basin, the area of intermediate values was mainly located in middle and lower reaches, and the high value area was found mainly in the regions of Ya'an, Leshan, Meishan and Dujiang weirs. The inter-annual variability differed spatially; more variations were found in northern area than in southern area, as divided by the transect of Dujiangyan—Wenchuan—Xiaojin—Danba. Increasing inter-annual variability was found in the western part, whereas decreasing variability in the eastern part. The significance levels of changing trends differed spatially.

Keywords: rainfall erosivity; Minjiang River Basin; spatial distribution; change tendency

降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因素之一, 雨滴击溅和径流剥蚀地表成为其主要的表现形式。降雨侵蚀力反映了降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, 是导致水土流失最重要的外部驱动力, 也是目前应用广泛的通

用土壤流失方程(USLE)中的一个基本因子^[1]。因此准确评估降雨侵蚀力, 对土壤侵蚀调查与评估、定量预报土壤侵蚀和制定水土保持措施具有重要意义。降雨侵蚀力的计算由 Wischmeier^[2-3] 在 1958 年首次提出,

收稿日期: 2012-05-12

修回日期: 2012-06-04

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目“青藏高原生态安全屏障监测评估方法与技术研究”(KZCX2-XB3-08); 第一次全国水利普查水土保持情况普查项目“冻融侵蚀强度计算分析与制图”

作者简介: 史展(1987—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀和土地利用的研究。E-mail: shizhanlxz@163.com。

通信作者: 陶和平(1953—), 男(汉族), 江苏省镇江市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事山地环境与地图学研究。Email: thp@imde.ac.cn。

以次降雨总动能 E 与 30 min 最大雨强 I_{30} 乘积衡量,但次降雨过程资料的获取难度较大,因此国内研究者建立了多种降雨侵蚀力的简易算法,其中基于日降雨资料的降雨侵蚀力模型是目前较精确的模型^[3-7]。

西南山区是我国水土流失最严重的区域之一,水土流失面积达 $4.72 \times 10^5 \text{ km}^2$,水土流失率高达 41.94%^[8];而岷江流域作为西南山区典型区,其水土流失问题也不容忽视。作为岷江流域土壤侵蚀的主要动力因素,降雨和降雨侵蚀力的研究具有至关重要的作用。宁雨丹^[9]等利用日降雨量资料计算了西南山区南宁市、贵阳市、重庆市、昆明市和成都市 5 地的降雨侵蚀力,证明 5 个地区的降雨侵蚀力年内分配不均匀,主要集中在夏季。张明珠等^[10]对松潘、成都、雅安和乐山地区 50 a 来日降水变化特征分析结果表明,该区降水集中在汛期 4—9 月,且年际变化趋势不明显。周大杰等^[11]利用岷江流域 15 个站点 46 a 日降水资料分析汛期降水特征,表明了该区降水呈下降趋势。目前,关于岷江流域降雨侵蚀力的研究还较少,对于该区域的研究多基于站点资料的分析,其空间格局和变化趋势的空间分布特征研究比较缺乏,而岷江流域又是地震重灾区,降雨和降雨侵蚀力的系统研究对其震后重建具有十分重要的意义。因此本研究以 1981—2010 年日雨量资料为基础通过对岷江流域近 30 a 来降雨侵蚀力进行分析,旨在揭示岷江流域降雨侵蚀力时空变化趋势,为岷江流域的水土保持研究和生态环境建设提供参考。

1 研究区概况

岷江发源于四川省与甘肃省交界处的岷山南麓,是长江上游的一级支流,由北向南流经汶川县、都江堰市、乐山市到宜宾市后注入长江,全长 735 km,流域面积 $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$,岷江全段落差 3 560 m。流域内有大小支流 90 余条,其中最大的一条支流为大渡河,全长 1 150 km,比岷江正流长 415 km。都江堰市以上为岷江上游流域,其源头为松潘高原,海拔 3 000~4 000 m,地形坦缓;经松潘西宁关进入峡谷,河谷深切,河宽仅 50~100 m,滩多流急;流至都江堰市,进入成都平原。都江堰至乐山区间为岷江中游流域,乐山到宜宾区间为下游流域,由宜宾汇入长江,岷江流域的中下游分布在成都平原,是四川省人口密度最大,大、中城市最集中的地区,也是四川省城市化水平最高和经济最发达的地区。该区降水差异显著,降水集中在汛期,四川盆地西南部降水量较高,多在 1 000 mm 以上,向西迅速减少。该区东南部降水年内分配呈单峰型,7—8 月降水量最多;西北部降水多呈双峰型,6—9 月降水量最多^[11]。

2 资料与方法

日雨量是目前气象站公开发布的最详细雨量整编资料,以 1981—2010 年岷江流域及周边地区 124 个气象水文站点逐日降雨资料为基础,采用日雨量模型估算降雨侵蚀力,并分析其时空变化特征。

2.1 基于日雨量的月降雨侵蚀力计算

采用由章文波等^[1-2]修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型来计算岷江流域的降雨侵蚀力:

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha \sum_{j=1}^M P_{d_{ikj}}^\beta) \quad (1)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967} \quad (2)$$

$$\beta = 0.6243 + \frac{27.346}{P_{d_0}} \quad (3)$$

$$P_{d_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^M P_{d_{ikj}} \quad (4)$$

$$R = \sum_{k=1}^{12} R_k \quad (5)$$

式中: R_k ——第 k 个月的降雨侵蚀力 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); N ——计算数据序列长度(本研究为 30 a); M ——第 i 年第 k 个月侵蚀性降雨的日数; $P_{d_{ikj}}$ ——第 i 年第 k 个月第 j 次侵蚀性降雨量 (mm); α, β ——模型参数; P_{d_0} ——侵蚀性降雨的多年平均值 (mm); R ——多年平均降雨侵蚀力 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$)。在 R 值计算时,以日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 界定^[12-15]为侵蚀性降雨。

2.2 降雨侵蚀力的年际变化分析

对岷江流域年际变化特征分析采用离差系数^[5-7],趋势系数^[16]和倾向率^[12,16]进行描述。离差系数(C_v)表示年降雨侵蚀力数据偏离平均值的程度,该值越大说明在研究年限内年降雨侵蚀力变幅越明显。其计算方法为:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \quad (6)$$

趋势系数表示降雨侵蚀力长期趋势变化的方向和程度,其算法为 n 时刻的降雨侵蚀力与自然数列 1, 2, 3, ... 的相关系数。

$$r_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (7)$$

式中: n ——年份序号; x_i ——第 i 年的降雨侵蚀力; \bar{x} ——其样本均值; $\bar{t} = (n+1)/2$ 。趋势系数 r_{st} 为正值,表示降雨侵蚀力在所计算的时段内有线性增加的趋势,反之则有线性减少的趋势。

倾向率相当于以时间为自变量的气候要素一元回归方程中斜率的 10 倍,即:

$$\hat{p}_t = a_0 + a_1 t \tag{8}$$

$$\frac{d\hat{p}_t}{dt} = a_1 \tag{9}$$

式中: \hat{p}_t ——气候要素的拟合值; t ——第 t 年, $t=1, 2, \dots, n$; a_0, a_1 ——拟合方程系数。 $a_1 \cdot 10$ 为气候倾向率, 单位为某要素单位/10a。根据线性回归理论得:

$$a_1 = r_{xt} \frac{\sigma_x}{\sigma_t} \tag{10}$$

式中: σ_x ——要素 x 的均方差; σ_t ——数列 $1, 2, \dots, n$ 的均方差, 这样就可以从趋势系数 r_{xt} 计算出倾向率。

3 降雨侵蚀力的时空分布特征

3.1 降雨侵蚀力空间分布特征

采用克吕格空间插值方法对岷江流域站点降雨侵蚀力数据进行插值, 得到岷江流域多年平均降雨侵蚀力的空间分布图(图 1)。由于该区域的气象站点分布不均(东南部密集、西北部稀疏), 对插值精度造成一定的影响, 但插值结果能够很好的反映降雨侵蚀力的空间分布特征, 能够支持完成降雨侵蚀力的时空分布研究。从图 1 可以看出, 年均降雨侵蚀力表现出东南部高, 向西迅速减少的特征, 且呈现以雅安—乐山为中心向东北、西南递减缓慢, 向西北递减迅速的环状空间分布格局。降雨侵蚀力最高值出现在以雅安为中心的四川盆地西南部, 其中雅安站的年均降雨侵蚀力为 10 594. 63 MJ · mm/(hm² · h · a); 最低值出现在川青结合部, 降雨侵蚀力在 400 ~ 600 MJ · mm/(hm² · h · a), 其中阿坝站年均降雨侵蚀力仅为 463. 97 MJ · mm/(hm² · h · a)。

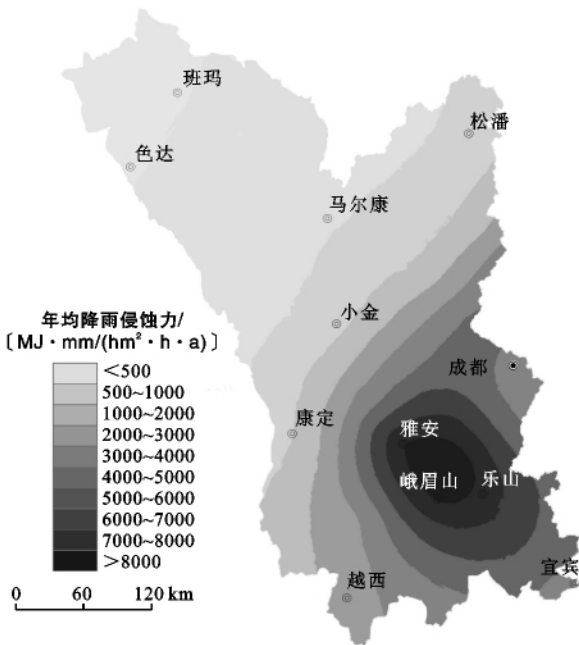


图 1 岷江流域降雨侵蚀力空间分布

根据 Thiessen 思想可知单个多边形内任何一点到该多边形内站点的距离都小于到其它站点的距离, 因此一个多边形表示多边形内点的最大影响范围。采用泰森多边形法结合 K—Means 聚类法进行分析, 以岷江及周边流域 124 个气象观测站为基准生成 124 个泰森多边形, 利用 K—Means 聚类方法将年均降雨侵蚀力分为高、中、低值 3 类(图 2)。低值区主要分布在岷江流域上游和大渡河支流流域, 平均降雨侵蚀力为 1 054. 73 MJ · mm/(hm² · h · a); 中值区主要分布在岷江中下游流域, 平均降雨侵蚀力为 4 594. 5 MJ · mm/(hm² · h · a); 高值区则集中分布在岷江中游的雅安、乐山、眉山和都江堰地区, 平均降雨侵蚀力为 7 153. 75 MJ · mm/(hm² · h · a)。

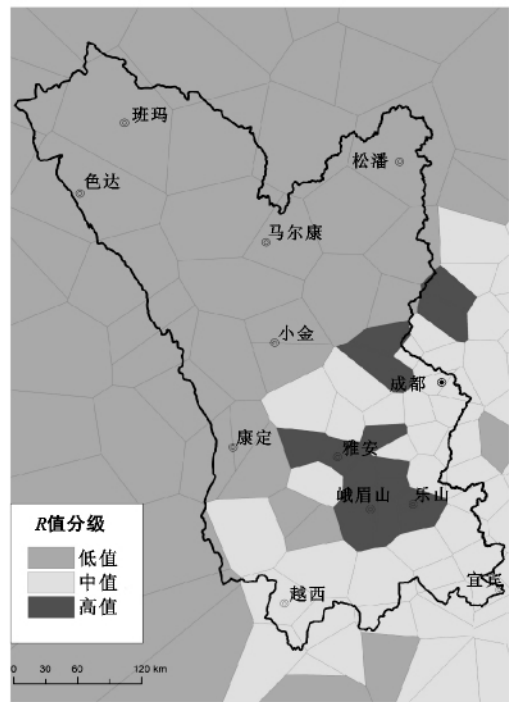


图 2 岷江流域 R 值 K—Means 聚类

3.2 降雨侵蚀力年际变化特征

采用克吕格插值法将离差系数、趋势系数和倾向率进行空间插值并做出相应的等值线(图 3)。年际离差系数(图 3a)呈现以都江堰—汶川—小金—丹巴为界, 北部高于南部的分布特征, 即以北地区多大于 0. 40, 南部多小于 0. 40; 但北部金川、马尔康交界处存在一个低值中心, 离差小于 0. 40, 南部汉源存在一个相对高值中心, 离差大于 0. 40。而岷江流域上游地区和阿坝县年际变化最大, 离差系数达到 0. 50 以上。利用泰森多边形统计各等级离差系数, 低、中、高值区离差系数分别为 0. 47, 0. 39 和 0. 36, 说明侵蚀高值区 30 a 降雨侵蚀力相对稳定些, 而低值区年际变化相对较大。

趋势系数可以反映区域降雨侵蚀力的变化趋势,

该值为正,说明呈现上升趋势,值为负说明呈下降趋势,值的大小表示趋势变化的快慢程度。岷江流域整体趋势系数为-0.039,说明该区总体呈下降趋势,但下降十分缓慢。图 3b 显示了岷江流域降雨侵蚀力的变化趋势,该区存在明显的东西差异,大致沿茂县—理县—汶川—宝兴—天全—汉源—峨边—沐川—宜宾一线以东呈下降趋势,以西呈上升趋势。区内存在以成都地区为中心的下降区,趋势系数小于-0.2,说明该区 30 a 内降雨侵蚀力呈较快速的下降趋势;岷江上游地区存在一条缓慢上升带,其趋势系数约在 0.1;川西地区则表现出快速上升趋势,趋势系数达到约 0.2。将趋势系数与泰森多边形叠加分析,发现侵蚀高值区呈现快速下降趋势,趋势系数为-0.19;中值区基本无变化,趋势系数仅为-0.06;低值区差异

较大,存在一个快速上升区和一个缓慢下降区,但整体呈缓慢上升趋势,趋势系数为 0.11。

倾向率也可以反映区域降雨侵蚀力变化趋势,其拟合一次方程相关系数可以表明趋势变化显著程度。该区域倾向率为-13.78,说明区域整体呈下降趋势;根据 0 值线位置可以看出该区大部分区域位于 0 值以下,仅西部班玛、色达、壤塘、金川和丹巴位于 0 值以上(图 3c)。倾向率等值线呈现显著的环状分布特征,其中心位于雅安、乐山带;该环状格局与趋势系数和成都平原边界均较一致,即-20 MJ·mm/(hm²·h·a)/10 a 等值线与趋势系数 0 值线和成都平原边界较吻合。不同侵蚀强度区的倾向率差异较大,高、中、低值区降雨侵蚀力倾向率分别为-47.80,-21.00和 1.93 MJ·mm/(hm²·h·a)/10 a。

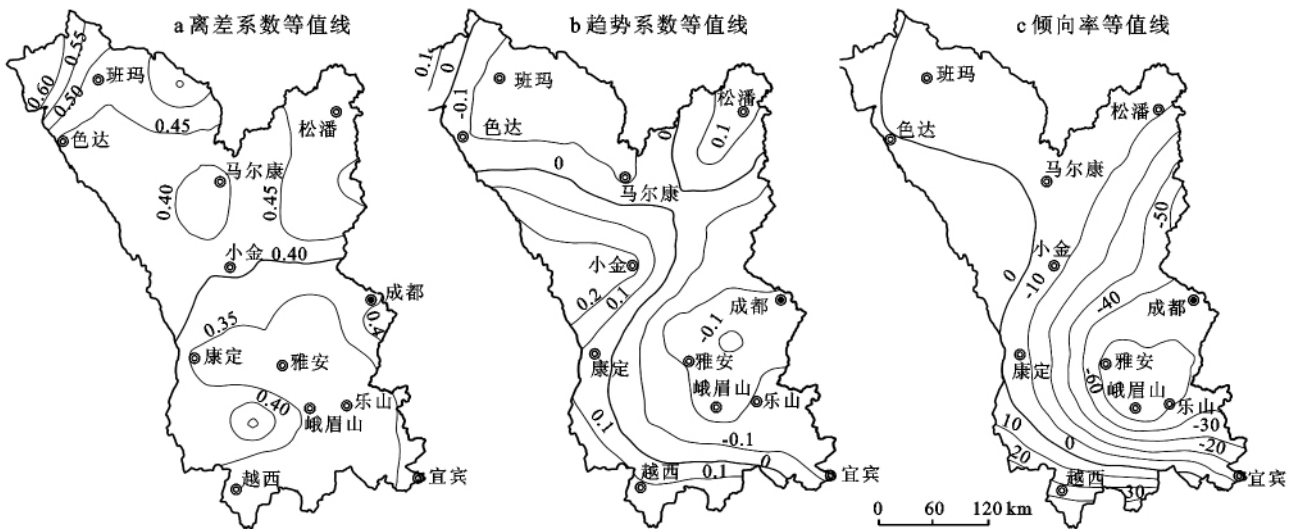


图 3 研究区离差系数、趋势系数和倾向率等值线

3.3 典型站点降雨侵蚀力变化趋势

针对低中高值区分别选择两个典型站点分析其变化趋势(表 1)。

岷江流域内共 55 个站点,其中 42 个站点呈下降趋势,占总数的 76.36%,13 个站点存在上升趋势,占 23.64%。6 点典型站点中只有小金站呈上升趋势,

其他站均呈下降趋势;从趋势变化的显著性看,6 个站点表现为不同显著程度的变化,其中宜宾站下降趋势显著,倾向率为-73.35 MJ·mm/(hm²·h·a)/10 a,决定系数达到 0.12;小金站显著上升,倾向率为 17.45 MJ·mm/(hm²·h·a)/10 a,决定系数达到 0.21;其他站则表现为不显著下降。

表 1 典型站点降雨侵蚀力变化趋势

站点名称	分区	年均降雨侵蚀力	趋势系数	倾向率	决定系数	显著性($\alpha=-0.05$)	变化趋势
马尔康	低值区	891.59	-0.28	-9.94	0.08	不显著	下降
小金	低值区	604.74	0.46	17.45	0.21	显著	上升
成都	中值区	3 710.66	-0.15	-20.34	0.02	不显著	下降
宜宾	中值区	4 549.52	-0.34	-73.35	0.12	显著	下降
雅安	高值区	10 594.63	-0.21	-63.21	0.04	不显著	下降
峨眉山	高值区	9 535.64	-0.23	-87.34	0.05	不显著	下降

注:年均降雨侵蚀力单位为 MJ·mm/(hm²·h·a);倾向率单位为 MJ·mm/(hm²·h·a)/10 a。

4 结论

(1) 岷江流域年均降雨侵蚀力表现出东南部高,向西迅速减少的特征,且呈现以雅安—乐山一带为中心向东北、西南递减缓慢,向西北递减迅速的环状空间分布格局。降雨侵蚀力最高值出现在以雅安为中心的四川盆地西南部,其中雅安站的年均降雨侵蚀力为 $10\,594.63 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;最低值出现在川青结合部,降雨侵蚀力在 $400 \sim 600 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,其中阿坝站年均降雨侵蚀力仅为 $463.97 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

(2) 根据聚类分析将岷江流域降雨侵蚀力划分 3 个等级:低、中、高度侵蚀区。低值区主要分布在岷江流域上游和大渡河支流流域,平均降雨侵蚀力为 $1\,054.73 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;中值区主要分布在岷江中下游流域,平均降雨侵蚀力为 $4\,594.5 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;高值区则集中分布在岷江中游的雅安、乐山、眉山一带和都江堰地区,平均降雨侵蚀力为 $7\,153.75 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

(3) 区内降雨侵蚀力年际变化呈现北部大于南部的特征,以都江堰—汶川—小金—丹巴为南北变化分界线,岷江流域上游地区和阿坝县年际变化最大,离差系数达到 0.50 以上。低、中、高值区离差系数分别为 0.47, 0.39 和 0.36,表明侵蚀高值区 30 a 来降雨侵蚀力相对稳定些,而低值区年际变化相对较大。

(4) 从变化趋势看,该区整体呈不显著的下降趋势,并呈现显著的东部下降、西部上升的变化趋势,即沿茂县—理县—汶川—宝兴—天全—汉源—峨边—沐川—宜宾一线以东呈下降趋势,以西呈上升趋势。此外,岷江流域不同地区其变化趋势差异较大,高值区呈快速下降趋势,趋势系数为 -0.19 ;中值区基本无变化,趋势系数仅为 -0.06 ;低值区差异较大,存在一个快速上升区和一个缓慢下降区,但总体呈缓慢上升趋势,趋势系数为 0.11。从典型站点倾向率和决定

系数分析发现西部小金站呈显著上升趋势,东部宜宾站则呈显著下降区。

[参 考 文 献]

- [1] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [2] 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.
- [3] 袁宏,母成波,李娜. 降雨侵蚀力时间变异规律与模型研究[J]. 东北水利水电, 2011, 1(2): 54-56.
- [4] 刘平,吴志峰,匡耀球,等. 基于日降雨数据的广东省降雨侵蚀力初步分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(5): 555-560.
- [5] 何锡君,吕振平,杨轩,等. 浙江省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 31-34.
- [6] 吴昌广,林德生,肖文发,等. 三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 151-158.
- [7] 朱明勇,党海山,谭淑端,等. 湖北丹江口水库库区降雨侵蚀力特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 837-842.
- [8] 柴宗新. 西南地区水土流失区划[J]. 山地研究, 1995, 13(2): 121-127.
- [9] 宁丽丹,石辉. 利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 183-186.
- [10] 张明珠,俞烜,宋新山,等. 岷江中上游及青衣江流域近 50 年来降水变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(3): 46-48.
- [11] 周大杰,张明珠,俞烜,等. 岷江流域汛期降水时空特征研究[J]. 水文, 2009, 29(4): 26-29.
- [12] 吴明作,申冲,杨喜田,等. 河南省降雨侵蚀力时空变异与不同算法比较研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 10-13.
- [13] 刘春利,杨勤科,谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 850-857.
- [14] 刘滨辉,刘燕玲. 黑龙江省降雨侵蚀力空间分布规律[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 63-68.
- [15] 李良冬,高鹏,穆兴民,等. 辽河流域降雨侵蚀力的时空变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 69-73.
- [16] 刘燕玲,刘滨辉,王力刚,等. 黑龙江省降雨侵蚀力的变化规律[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 24-29.