

云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究

陈正发^{1,2} 史东梅¹ 何伟² 夏建荣² 金慧芳¹ 娄义宝¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 由于生态环境演变及人类活动的影响,云南地区生态环境极度脆弱,土壤侵蚀强度大,侵蚀程度严重。降雨侵蚀力(R)是采用 USLE/RUSLE 模型进行土壤侵蚀评估的重要参数,但目前针对云南地区 R 值的计算模型及适宜性方面的研究较少。本研究采用昆明气象站 1951—2010 年共 60 a 逐日降雨数据,对中国南方地区常用的 5 种 R 计算模型在云南地区的适宜性进行分析,筛选出适宜云南地区的 R 计算模型,并基于均匀分布于云南省的 36 个国家基本气象站 1951—2012 年降雨观测数据,分析云南省降雨侵蚀力时空分布与演变特征。研究表明:在 5 种降雨侵蚀力计算模型中,模型 B 具有较好的稳定性,且有效系数(E_f)最大,相对偏差系数(E_r)最小,在云南地区有较好的适宜性。云南地区多年平均降雨量为 1 106.84 mm,7 个分区多年平均降雨量分布在 745.83 ~ 1 533.33 mm 之间,不同地区降雨量分布不均匀,季节分布集中在夏季,降雨空间分布呈现出自西南向东北递减的趋势。云南地区多年平均 R 为 2 719.31 MJ·mm/(hm²·h),7 个分区多年平均 R 分布在 1 837.23 ~ 3 949.12 MJ·mm/(hm²·h)之间,季节分布集中在夏季,空间分布也表现出自西南向东北递减的趋势。7 个分区降雨侵蚀力趋势系数分布在 -0.34 ~ -0.02 之间,各分区近 60 a 来降雨侵蚀力均呈现出减小趋势。本研究可为云南水土生态环境建设和土壤侵蚀模型构建提供借鉴和参考。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空分布; 土壤侵蚀; 侵蚀危害性评价; 云南

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0209-11

Spatial-temporal Distribution and Trend of Rainfall Erosivity in Yunnan Province

CHEN Zhengfa^{1,2} SHI Dongmei¹ HE Wei² XIA Jianrong² JIN Huifang¹ LOU Yibao¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Kunming Engineering Corporation Limited, POWERCHINA, Kunming 650051, China)

Abstract: Due to ecological changes and human activities, the ecological environment has become extremely fragile with the soil seriously eroded. Rainfall erosivity (R) is an important parameter for forecasting soil erosion by using the USLE/RUSLE. However, there were few studies focusing on the suitability of simple R calculation models for Yunnan Province. Using the daily rainfall data from 1951 to 2010 in Kunming, a suitable calculation model of R for Yunnan Province were selected according to suitability analysis on five models which were commonly used in the southern parts of China, and the temporal and spatial distribution characteristics of rainfall and rainfall erosivity were also analyzed according to rainfall data collected by 36 meteorological stations distributed evenly in Yunnan Province. Through the suitability analysis, in the five kinds of rainfall erosivity calculation models, model B was the most suitable ones for Yunnan Province because of its better stability, the largest effective coefficient (E_f) and the smallest relative deviation (E_r). Yunnan Province recorded an average annual rainfall of 1 106.84 mm, and the average annual rainfall of seven regions changed between 745.8 mm and 1 533.3 mm. The distribution of rainfall in different seasons was not uniform, and the rainfall was mainly concentrated in summer which accounted for 53.97% of annual rainfall. Rainfall was unevenly distributed in different regions, which showed a decreasing trend from southwest to northeast in Yunnan Province. The average

收稿日期: 2017-06-05 修回日期: 2017-08-08

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503119-01-01)

作者简介: 陈正发(1985—),男,博士生,中国电建集团工程师,主要从事水土生态工程研究,E-mail: chenzhengfa2013@163.com

通信作者: 史东梅(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域治理研究,E-mail: shidm_1970@126.com

annual rainfall erosivity of Yunnan Province was $2\,719.31\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$, and the average annual rainfall erosivity of seven regions ranged between $1\,837.23\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ and $3\,949.12\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$. The seasonal distribution of rainfall erosivity was uneven. Rainfall erosivity was concentrated in summer which accounted for 67.06% of annual rainfall erosivity. There was also a significant difference in the spatial distribution of rainfall erosivity, and it also showed a decreasing trend from southwest to northeast. The trend index of rainfall erosivity varied from -0.34 to -0.02 , which showed a decreasing tendency in nearly 60 years in different regions. This paper could provide some references for improving soil and water ecological environment and developing soil erosion models of Yunnan Province.

Key words: rainfall erosivity; spatial-temporal distribution; soil erosion; soil erosion harmfulness evaluation; Yunnan

引言

土壤侵蚀是一个全球性的环境问题,是当今全球气候变化研究的重要组成部分^[1-2]。降雨是坡面水蚀的最根本动力来源,降雨的强度、持续时间、雨滴特征等对坡面侵蚀过程有重要影响^[3]。降雨是西南地区土壤侵蚀的主要动力,对土壤侵蚀的监测、评估、预测与控制具有重要意义^[4]。很多土壤侵蚀研究集中在土壤侵蚀预测模型上。20世纪50年代末 WISCHMEIER 等^[5-6]首次提出了通用土壤流失方程(USLE),该方程包含降雨侵蚀力(R)在内的六大因子。降雨侵蚀力与侵蚀过程存在密切关系^[7],是采用 USLE/RUSLE 模型进行土壤侵蚀评估的重要参数。在 USLE 模型中, WISCHMEIER 等根据美国的资料,提出以降雨总动能与最大 30 min 雨强的乘积 EI_{30} 作为降雨侵蚀力指标,为降雨侵蚀力 R 的经典算法^[8]。由于资料来源的限制、基础数据整编困难等原因,各国对基于该模型的降雨侵蚀力研究主要集中在降雨侵蚀力的简易计算模型、时空分布特征等方面。在国内,很多研究人员对降雨侵蚀力简易计算模型进行了研究。王万忠等^[9]最早对中国降雨侵蚀力计算方法进行了研究,章文波等^[10]提出了全国基于日降雨量计算降雨侵蚀力的简易算法,史志华等^[11]在对武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究的基础上,提出了适应于武汉地区的降雨侵蚀力计算模型。卢喜平^[12]、史东梅等^[13]采用人工模拟降雨试验的方法,建立了重庆地区降雨侵蚀力计算的简易公式。尽管很多模型在特定区域计算结果的精度得到了验证,但模型是否适宜于其他区域则有待进一步研究。从云南省研究情况来看,杨子生^[14]最早对云南省滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力计算模型进行了研究,提出了 R 计算模型。近年来,有研究人员对云南滇西北地区降雨侵蚀力变化特征^[15]、云南省降雨侵蚀力时空分布^[16]、降雨侵蚀力计算模型^[17]等进行了研究。这些研究选用

的降雨侵蚀力计算模型大多直接引用其他学者研究成果,并未对模型的地区适宜性进行深入评估,或已有研究仅适用于局部区域,降雨侵蚀力计算结果难以满足预测要求。

此外,气候变化可能引起降雨特征发生变化,这必将导致土壤侵蚀环境发生深刻改变^[18]。在气候变化对降雨侵蚀力的影响方面,国内外研究主要借助于参数化或非参数化的长时间序列分析进行,采用的分析方法主要有小波分析法、趋势系数法、线性倾向估计法、累积距平、Mann-Kendall 参数或非参数检验分析法等^[16-17]。目前,针对于云南地区全球气候变化背景下侵蚀环境发生的演变方面所开展的研究较少。

根据 2013 年 5 月第一次全国水利普查水土保持公报,云南省土壤侵蚀以水力侵蚀为主,侵蚀严重程度居全国第二。本文在前人研究基础上,对中国南方地区常用的 5 种降雨侵蚀力计算模型在云南地区的适宜性进行分析,筛选出适宜于云南省降雨侵蚀力计算的模型,并采用均匀分布于云南省的 36 个国家基本气象站 1951—2012 年间降雨数据,基于 GIS 空间插值技术,分析云南省降雨侵蚀力时空分布特征,讨论气候变化背景下云南省降雨侵蚀力的演变特征,以期对云南省水土生态环境建设和土壤侵蚀模型构建、坡耕地水土流失综合治理提供借鉴和参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

云南地处中国西南边陲,面积 39 万 km^2 ,处于东亚季风和南亚季风交汇区,其中 84% 为山区、高原,丘陵仅占总面积 10%,地形由山地向喀斯特地貌逐渐演变。由于生态环境演变及人类活动的共同影响,中度生态脆弱性的类型区面积占了总面积的 32.02%,强度和极强脆弱的类型区面积占了总面积的 53.63%^[19-20]。云南省降雨充沛,但在时空上分

布严重不均。此外,由于独特的气候和地貌特征,泥石流、山体滑坡等侵蚀形式也较为普遍,在一些地区和时段成为土壤侵蚀的主要形式,甚至造成极为严重的自然灾害。

1.2 研究方法数据来源

1.2.1 研究方法

(1)降雨侵蚀力计算模型

中国南方地区常用的降雨侵蚀力计算模型主要有以下 5 种:

模型 A:WISCHMEIER 等^[6]建立的基于月降雨量的降雨侵蚀力模型

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.51\lg\left(\frac{P_i^2}{P} - 0.8188\right)} \tag{1}$$

式中 R ——年降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h)

P ——年降雨,mm

P_i ——第 i 月降雨量,mm

模型 B:卢喜平^[12]、史东梅等^[13]采用人工模拟降雨手段,建立了重庆地区降雨侵蚀力计算的月雨量模型

$$R = 5.249 \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \right)^{1.205} \tag{2}$$

设 $F_i = \frac{P_i^2}{P}$, $A = \left(\sum_{i=1}^{12} F_i \right)^{\gamma-1}$, $\gamma = 1.205$, 则每个月的降雨侵蚀力为

$$R_i = 5.249 A F_i \tag{3}$$

式中 R_i ——第 i 月降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h)

模型 C:史志华等^[11]建立的修正日雨量模型为

$$R_j = 0.429 \left[1 + 0.328 \sin \left(\frac{\pi}{12} (j-1) \right) \right] \sum_{k=1}^n P_k^{1.47} \tag{4}$$

式中 R_j ——第 j 月的降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h)

P_k ——第 j 月第 k 天的日降雨量,mm

模型日侵蚀性降雨标准为 12 mm。

模型 D:CREAMS 模型^[21]为

$$R = 1.03 P_t^{1.51} \tag{5}$$

式中 P_t ——第 t 日的日降雨量,mm

模型日侵蚀性降雨标准为 12.7 mm。

模型 E:章文波等^[10]利用日降雨量计算降雨侵蚀力模型为

$$R_L = \alpha \sum_{j=1}^l P_j^\beta \tag{6}$$

其中
$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{7}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{8}$$

式中 R_L ——半月时段降雨侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h)

l ——半月时段内的天数

P_j ——半月时段内第 j 天的侵蚀性日雨量,须日雨量大于等于 12 mm,否则以 0 计

α, β ——模型待定参数

P_{d12} ——日雨量 12 mm 以上(包括等于 12 mm)的日平均雨量,mm

P_{y12} ——日雨量 12 mm 以上年平均雨量,mm

半月时段的划分以每月 15 日为界,前 15 天作为一个半月时段,该月剩余部分作为另一个半月时段,这样将全年依次划分为 24 个时段。

(2)模型适宜性评价方法

为评价降雨侵蚀力计算模型的适宜性,本研究采用 NASH 等^[22]于 1970 年提出的模型有效系数(E_f)和相对偏差系数(E_r)来评价 5 个降雨侵蚀力模型计算结果的精度,计算公式为

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_{obs} - R_{oal})^2}{\sum (R_{obs} - R_{oalm})^2} \tag{9}$$

$$E_r = \frac{|R_{obsn} - R_{oalm}|}{R_{oalm}} \tag{10}$$

式中 R_{obs} ——模型计算的年降雨侵蚀力

R_{oal} ——基准年降雨侵蚀力

R_{oalm} ——基准年降雨侵蚀力的平均值

R_{obsn} ——模型计算的多年平均降雨侵蚀力

参照文献[23]的方法,将 5 个模型计算得到的年降雨侵蚀力平均值作为该年度的基准降雨侵蚀力值,将 5 个模型计算得到的多年(60 a)降雨侵蚀力平均值作为年基准降雨侵蚀力的平均值。模型有效系数 E_f 越接近于 1,表示模型计算结果与基准值非常接近,模型计算精度较高。相对偏差系数(E_r)越接近于 0,表明模型计算值相对于基准值的偏差越小,模型计算的结果越精确。

(3)趋势变化分析方法

采用离差系数 C_v 和趋势系数 r 两项指标来描述降雨侵蚀力年际变化特征,计算公式为

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \tag{11}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \tag{12}$$

其中
$$t = \frac{n+1}{2} \tag{13}$$

式中 n ——年份序号

x_i ——第 i 年的降雨侵蚀力

$\bar{x}$ ——多年降雨侵蚀力的样本平均值

离差系数 C_v 越大,说明年降雨侵蚀力波动幅度

越明显;趋势系数 r 为正时,表示降雨侵蚀力在研究时段内有线性增加的趋势,反之亦然, r 绝对值的大小反映变化的快慢程度。

(4) 季节和分区划分

根据云南省气候、地理特点,季节划分为:3、4、5 月为春季,6、7、8 月为夏季,9、10、11 月为秋季,12、1、2 月为冬季。在人为加速侵蚀中,坡耕地土壤侵蚀是侵蚀泥沙的主要来源。为使云南地区降雨侵蚀力时空分布的研究与区域农业生产活动特征保持一致,本研究按照云南省综合农业区划^[24],将云南划分为 7 个分区,7 个分区范围如表 1 所示。

表 1 云南省综合农业区划分区范围
Tab.1 Scope of comprehensive agricultural zoning in Yunnan Province

序号	分区	所属地区	降雨观测	简称
1	滇中高原湖盆地粮、油、烟、经济林区	昆明、楚雄、曲靖(部分)、玉溪(部分)	昆明、玉溪、宜良、泸西、元谋、楚雄、沾益	滇中区
2	滇西中山盆地粮、蔗、烟、林、牧区	大理、保山	大理、保山、腾冲、华坪	滇西区
3	滇东南岩溶丘原粮、蔗、林、牧区	红河、文山	蒙自、砚山、文山、广南、屏边	滇南区
4	滇西南中山宽谷茶、紫胶、蔗、林、牧区	临沧(部分)、玉溪(部分)、红河(部分)、普洱(部分)	临沧、普洱、景东、元江	滇西南区
5	南部边缘中、低山宽谷盆地、热林、热作、蔗、茶区	德宏、临沧(部分)、西双版纳、普洱(部分)	澜沧、勐腊、瑞丽、江城、耿马、景洪、孟定	南部区
6	滇东北山原牧、经济林、旱粮、油、烟区	昭通、曲靖(部分)	昭通、会泽	滇东北区
7	滇西北高山峡谷林、牧、药材区	迪庆、丽江(部分)、怒江	丽江、六库、香格里拉、维西、泸水、贡山、德钦	滇西北区

(5) 空间插值分析方法

空间插值分析基于 ESRI ArcGIS 10.2 软件的地统计模块下进行。常用的插值法有反距离权重插值法(IDW)、多项式插值法(Spline)和克里金(Cokriging)插值法。采用交叉验证法评价 3 种方法的插值效果,其中,克里金插值法的平均相对误差(MRE)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)最小,说明克里金插值法精度最高。因此,本研究采用克里金插值法进行空间插值分析。

1.2.2 数据来源

昆明位于云南中部地区,其水文、气象、土壤、地

貌、植被等自然环境特征在云南省具有较好的代表性。本研究采用昆明气象站 1951—2010 年 60 a 逐日观测降雨数据作为降雨侵蚀力计算模型适宜性分析的基础数据。在云南省降雨侵蚀力时空分布演变研究部分,采用分布于云南省的 36 个国家基本气象站 1951—2012 年间的降雨观测资料进行分析。36 个国家基本气象站分布如图 1 所示。由图 1 可看出,36 个国家基本气象站较均匀地分布于云南省境内。

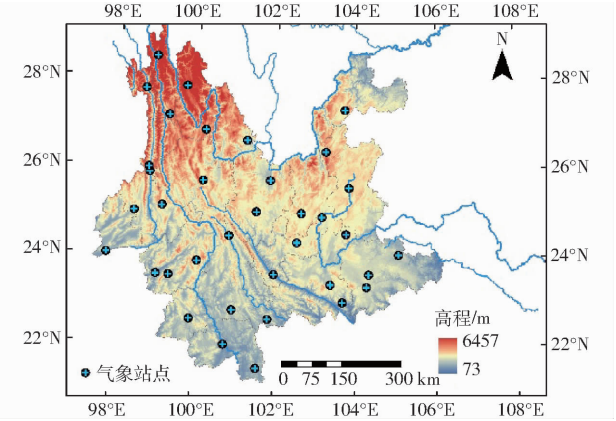


图 1 云南省地形起伏状况及气象站点分布
Fig.1 Terrain and rainfall observation stations in Yunnan Province

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力 R 指标计算模型适宜性分析

2.1.1 不同计算模型的降雨侵蚀力结果比较

以昆明站 1951—2010 年 60 a 逐日观测降雨数据为基础,分别采用 5 种模型计算降雨侵蚀力。图 2 是不同降雨侵蚀力模型计算得到的 R 在 1951—2010 年的变化趋势。由图 2 可看出,不同降雨侵蚀力计算模型的年降雨侵蚀力变化幅度较大,计算的降雨侵蚀力分布在 $1\ 050 \sim 4\ 175\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 之间。总体上,5 种降雨侵蚀力计算模型得到的 R 均随着降雨量的增大而表现出增加趋势;除模型 A 计算的 R 存在一定的不规则波动外,其余模型 R 均呈现出一致的变化趋势。模型 A 计算的 R 存在一定的不规则波动,说明其计算的 R 对不同月份降雨量较为敏感。不同模型计算得到的 R 由大到小为模型 E、模型 D、模型 B、模型 A、模型 C。其中,模型 D 和模型 E 计算得到的 R 差异较小,变化趋势也接近一致,考虑到模型 E 的计算过程较为繁琐,采用日雨量计算降雨侵蚀力时,可近似用模型 D 替代模型 E。

2.1.2 不同计算模型适宜性分析

在上述分析基础上,计算不同侵蚀力模型的降雨侵蚀力均值、标准差、离差系数(C_v)、有效系数

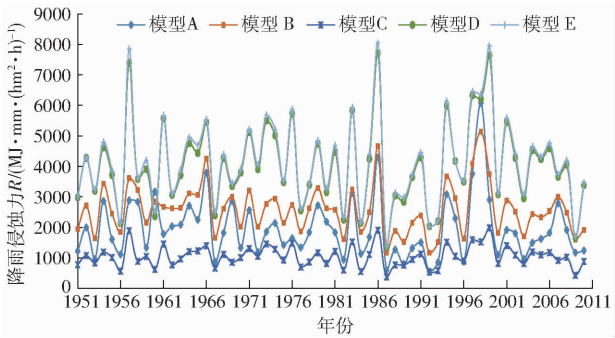


图 2 昆明气象站不同降雨侵蚀力 R 计算模型
时间序列 (1951—2010 年) 分布

Fig. 2 Time series (1951—2010) of R calculated by
different R models in Kunming

(E_f)、相对偏差系数(E_r)等参数,如表 2 所示。由表 2 中可看出,在 5 种模型中,模型 E 计算得到的昆明地区多年平均降雨侵蚀力最大,达到了 $4\,175\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$;最小值为模型 C,多年平均

降雨侵蚀力值为 $1\,050\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$;5 种模型计算的降雨侵蚀力均值为 $2\,762\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 。5 种模型最小值和最大值相差了近 4 倍,说明各模型计算的降雨侵蚀力差异较大。也进一步说明在选用降雨侵蚀力简易算法时,须对计算模型进行地区适宜性分析,否则计算结果可能存在较大误差。从计算的标准差来看,5 种模型中,计算结果离散度最大的是模型 E,最小的是模型 C。从计算的离差系数(C_v)来看,计算结果波动幅度最大的是模型 A,波动幅度最小的是模型 B,说明模型 B 计算的降雨侵蚀力值具有较好的稳定性。模型 B 的有效系数(E_f)达到 0.83,为 5 种模型中的最大值,而相对偏差系数(E_r)为 0.07,为 5 种模型中最小值,说明模型 B 的精确度是 5 种模型中最高的。同时,模型 B 计算结果的偏差较小,说明模型 B 在云南地区有较好的适宜性。因此,本研究采用模型 B 来计算降雨侵蚀力。

表 2 不同降雨侵蚀力 R 指标计算模型适宜性评价结果

Tab. 2 Evaluation on suitability of different R calculation models

参数	降雨侵蚀力计算模型				
	模型 A	模型 B	模型 C	模型 D	模型 E
多年平均降雨侵蚀力/ $(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{h})^{-1})$	1 953	2 575	1 050	4 057	4 175
标准差	1 002. 19	820. 56	356. 08	1 424. 31	1 485. 57
离差系数 C_v	0. 51	0. 32	0. 34	0. 35	0. 36
有效系数 E_f	-0. 06	0. 83	-2. 69	-1. 20	-1. 64
相对偏差系数 E_r	0. 29	0. 07	0. 62	0. 47	0. 51

2.2 降雨的时空变化特征

2.2.1 降雨的季节分布

分布在云南省的 36 个站点多年平均降雨量为 $1\,106.84\text{ mm}$,多年平均降雨量分布在 $632.47\sim2\,234.10\text{ mm}$ 之间,最大值和最小值差异显著,不同地区降雨分布不均匀。降雨量最大值出现在江城,最小值则出现在元谋。从降雨的季节分布来看,各站点降雨季节分布也不均匀。冬季降雨占全年降雨比重最小,仅为全年降雨量的 4.87% ;其次为春季,仅占全年降雨的 11.95% ;夏季降雨占全年降雨量比重最大,占到全年降雨量的 53.97% ,说明云南省降雨主要集中在夏季。这种降雨年际分布特征与云南省夏季频繁发生洪涝、泥石流、山体滑坡等灾害有着密切关系,同时也与春季、冬季干旱现象频发有关。此外,不同站点降雨量季节分布差异也较大。例如,春季降雨量比重分布在 $1.83\%\sim39.32\%$ 之间,不同站点春季降雨量比例差异较大。

表 3 为不同分区降雨季节分布特征。从表 3 可看出,不同分区多年平均降雨量差异较大,降雨量分布在 $745.83\sim1\,533.33\text{ mm}$ 之间,不同分区多年平均降雨量由大到小依次为南部区、滇西区、滇西南

区、滇东南区、滇西北区、滇中区、滇东北区。此外,各分区的降雨季节分布也较不均匀,年内降雨主要集中在夏季,占比均超过了 49.85% ;春季和秋季降雨量分布差异相对较小,占比在 $13\%\sim31\%$ 之间;7 个分区冬季降雨量占比最小,比重均小于 6.60% 。云南省不同分区年降雨量和降雨的季节性分布差异较大,这也与云南省生态环境多样性和景观格局的特征有着十分紧密的联系,对地区水土生态环境的影响作用更是显著。

2.2.2 降雨的年际变化

表 4 为不同分区降雨的标准差、离差系数等降雨特征参数。在 7 个分区中,标准差分布在 $127.08\sim199.54$ 之间,其中最大值出现在滇西区,最小值出现在滇东北区,说明滇西区降雨年际差异最大,而滇东北区降雨年际差异最小。离差系数 C_v 反映数据系列波动的大小特征,从表 4 中看出, C_v 由大到小依次为滇中区、滇西区、滇东北区、滇西北区、滇西南区、滇东南区、南部区,说明滇中地区降雨的年际波动最大,南部区的降雨年际波动最小。

2.2.3 降雨空间变化特征

图 3 为云南省多年平均降雨量大小的空间分

表 3 云南省不同分区降雨季节分布特征

Tab.3 Seasonal distribution of rainfall in different zoning of Yunnan Province										
序号	分区	多年平均	春季		夏季		秋季		冬季	
		降雨量/ mm	平均降雨 量/mm	占比/%	平均降雨 量/mm	占比/%	平均降雨 量/mm	占比/%	平均降雨 量/mm	占比/%
1	滇中区	875.55	124.67	14.09	498.04	56.99	213.60	24.55	39.24	4.37
2	滇西区	1 141.51	153.26	13.07	633.58	55.60	306.48	27.12	48.19	4.21
3	滇东南区	1 073.95	256.86	22.77	559.66	52.59	193.70	18.98	63.73	5.66
4	滇西南区	1 131.79	173.02	15.69	620.32	54.18	290.75	25.74	47.69	4.39
5	南部区	1 533.33	253.97	16.64	862.49	56.02	359.62	23.65	57.25	3.69
6	滇东北区	745.83	220.99	30.71	382.22	50.58	106.65	13.79	35.96	4.92
7	滇西北区	1 005.31	232.77	21.71	478.12	49.85	219.45	21.85	74.97	6.60

表 4 不同分区降雨特征参数
Tab.4 Rainfall parameters in different zoning

序号	分区	标准差	C_v
1	滇中区	167.63	0.191
2	滇西区	199.54	0.178
3	滇东南区	153.86	0.146
4	滇西南区	171.67	0.157
5	南部区	199.00	0.133
6	滇东北区	127.08	0.170
7	滇西北区	166.27	0.169

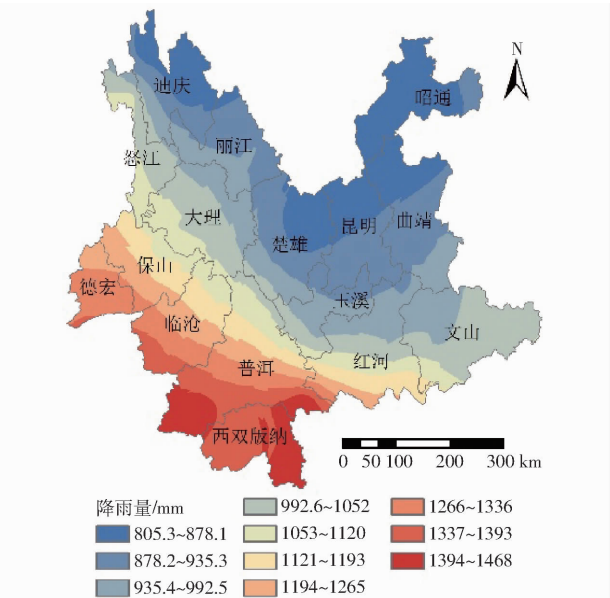


图 3 云南省多年平均降雨量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of average annual rainfall in Yunnan Province

布。从图 3 中可看出,南部区、滇西南区年降雨量最高,滇东北区、滇西北区的降雨量最小,降雨总体表现出从西南向东北方向递减的趋势。位于云南省南部的西双版纳、普洱等地区年降雨量最大,多年平均降雨量超过了 1 400 mm,部分地区超过了 2 000 mm,全年降雨量较为丰沛。位于西南部的临沧、德宏部分地区的年降雨量也较大,多年平均降雨量超过了 1 100 mm,集中分布在 1 200 ~ 1 300 mm 之间。昆

明、楚雄、迪庆、昭通等地区的多年平均降雨量最小,集中分布在 800 ~ 900 mm 之间,这些地区年降雨量普遍偏小,从季节分布上看主要集中在夏季,在春季和冬季极易形成干旱灾害。

图 4 为云南省春、夏、秋、冬 4 个季节多年平均降雨量空间分布。从图 4 中可看出,不同季节降雨空间分布存在显著差异。在春季,除个别地区降雨量超过 250 mm 外,大多数地区的降雨量均在 200 mm 以下,其中最为显著的特征是滇中区的降雨量最小,集中分布在 150 mm 以下。冬季降雨量在全年比重最小,各地区冬季的降雨量均少于 140 mm,集中分布在 60 mm 以下,且冬季的降雨分布除南部区和滇西北区外,降雨分布趋近于春季,仍然表现为滇中区的降雨量最小。这一特征也进一步解释了滇中区在春季和冬季易发干旱灾害的原因。夏季和秋季降雨量在全年比重相对较大,降雨分布均呈现从西南向东北递减的趋势。

2.3 降雨侵蚀力 R 时空分布特征

2.3.1 降雨侵蚀力季节分布

分布于云南不同地区的 36 个站点多年平均降雨侵蚀力为 2 719.31 MJ·mm/(hm²·h),多年平均降雨侵蚀力分布在 1 319.99 ~ 6 052.21 MJ·mm/(hm²·h) 之间,最大值和最小值相差 4.6 倍,不同站点降雨侵蚀力差异显著。降雨侵蚀力最大值出现在江城,最小值则出现在德钦。从降雨侵蚀力的季节分布来看,各站点降雨侵蚀力季节分布不均匀。从 36 个站点多年平均年内分布来看,冬季降雨侵蚀力占全年比重最低,仅为 1.55%;其次为春季,仅占全年降雨侵蚀力的 11.95%;降雨侵蚀力所占比重最大的季节为夏季,占全年降雨侵蚀力的 67.05%,说明云南省降雨侵蚀力主要集中分布在夏季,这与云南省降雨主要集中分布在夏季相一致。秋季降雨侵蚀力占全年比重为 19.45%,比重仅次于夏季。此外,不同站点相同季节降雨侵蚀力分布差异也较大。例如,在春季降雨侵蚀力比重中,各站点的降雨侵蚀力比

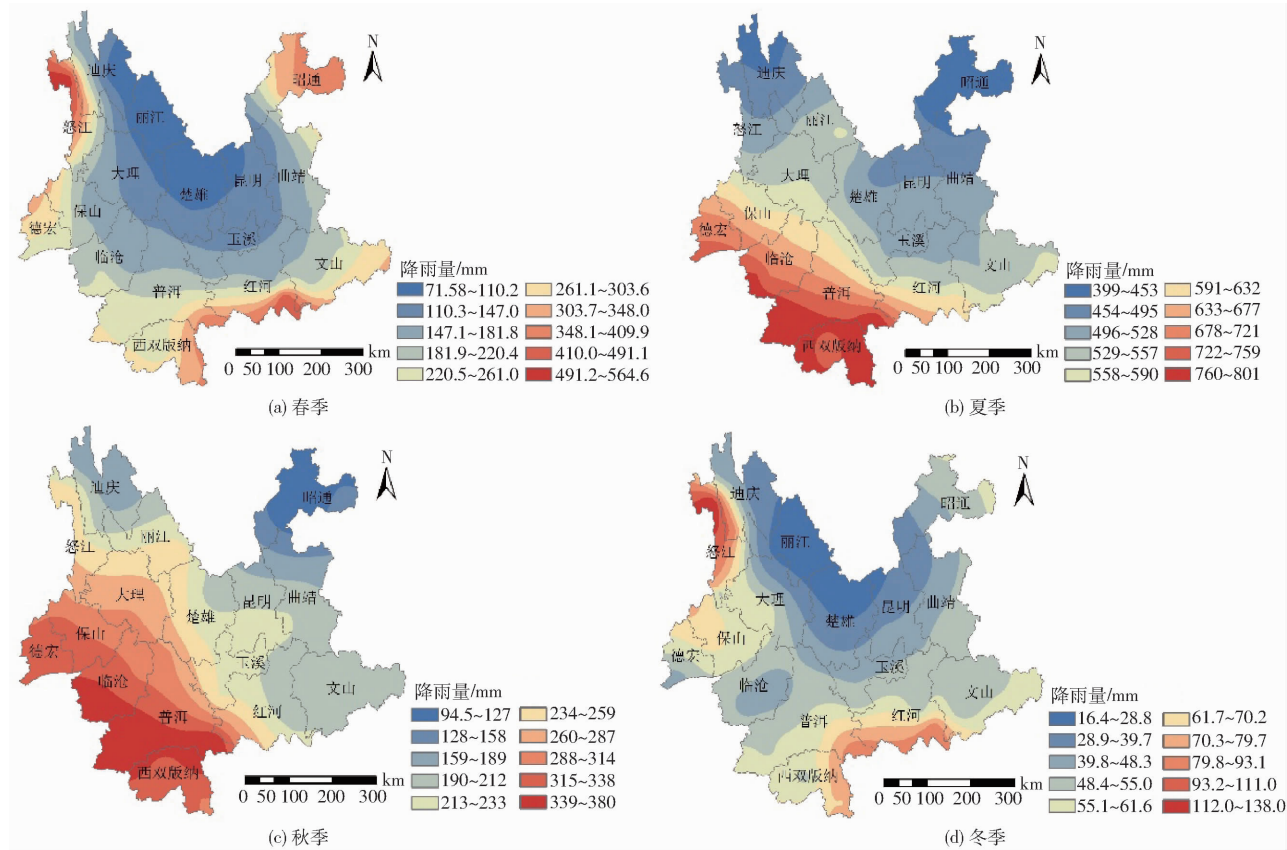


图 4 云南省不同季节降雨量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of rainfall in different seasons in Yunnan Province

重分布在 1.83% ~ 39.32% 之间,不同站点春季降雨侵蚀力所占比重量差异较大。

表 5 为 7 个不同分区降雨侵蚀力季节分布特征。从表 5 可看出,不同分区多年平均降雨侵蚀力差异较大,分布在 1 837.23 ~ 3 949.12 MJ·mm/(hm²·h) 之间,不同分区多年平均降雨侵蚀力的大小依次为南部区、滇西区、滇西南区、滇东南区、滇西北区、滇中区、滇东北区,7 个分区多年平均降雨侵蚀力的大小关系与多年平均降雨量大小关系基本一致;各分区的降雨侵蚀力季节分布也表现出极不均匀性,降雨侵蚀力主要集中在夏季,占比均超过了 61%,滇东北区则达到了 71.35%;秋季降雨侵蚀力占比仅

次于夏季,分布在 11.09% ~ 23.67% 之间;其次为春季,降雨侵蚀力占比分布在 6.06% ~ 18.05% 之间;冬季降雨侵蚀力占比最小,占比均小于 2.84%。通过上述分析可知,云南省不同分区的降雨侵蚀力主要集中在夏季。因此,夏季也成为云南省水力侵蚀的敏感期和集中期,在水土保持生态环境建设中,应重点关注夏季水力作用导致的土壤侵蚀。

2.3.2 降雨侵蚀力空间分布特征

图 5 为云南省多年平均降雨侵蚀力大小的空间分布。从图 5 中可看出,位于南部区和滇西南区的西双版纳、普洱、临沧、德宏等地的多年平均年降雨侵蚀力最高,而位于滇东北区的昭通、滇西北区的迪

表 5 云南省不同分区降雨侵蚀力季节分布特征										
Tab. 5 Seasonal distribution of R in different zoning of Yunnan Province										
序号	分区	多年平均	春季		夏季		秋季		冬季	
		降雨侵蚀力/ (MJ·mm·(hm ² ·h) ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·(hm ² ·h) ⁻¹)	占比/ %	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·(hm ² ·h) ⁻¹)	占比/ %	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·(hm ² ·h) ⁻¹)	占比/ %	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·(hm ² ·h) ⁻¹)	占比/ %
1	滇中区	2 195.52	133.45	6.06	1 515.08	68.88	516.41	23.67	30.58	1.39
2	滇西区	3 014.69	281.23	10.39	2 091.16	68.25	608.77	20.08	33.53	1.28
3	滇东南区	2 454.61	418.80	15.37	1 598.94	65.68	388.14	17.13	49.81	1.87
4	滇西南区	2 804.82	267.30	10.30	1 979.16	69.25	531.50	19.35	26.85	1.10
5	南部区	3 949.12	373.39	9.67	2 746.15	68.73	795.26	20.73	35.09	0.90
6	滇东北区	1 837.23	297.83	17.05	1 322.30	71.35	207.89	11.09	9.22	0.51
7	滇西北区	2 236.71	421.97	18.05	1 339.23	61.34	402.93	17.70	71.71	2.84

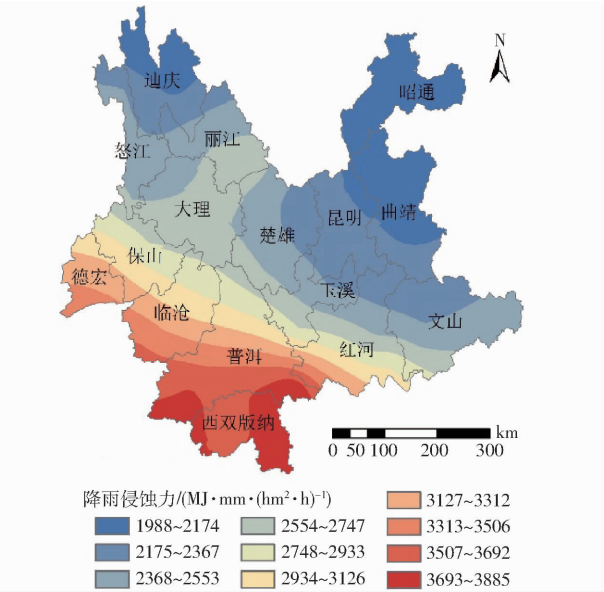


图 5 云南省多年平均降雨侵蚀力空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of average annual R in Yunnan Province

庆地区降雨侵蚀力最小,降雨侵蚀力空间分布总体表现出从西南向东北方向递减的趋势。位于南部区的澜沧、江城、勐腊等地年降雨侵蚀力最大,多年平均降雨侵蚀力超过 3 200 MJ·mm/(hm²·h),处于降雨侵蚀力高值区。位于南部区的德宏、临沧,滇西南区的普洱,以及滇西区的保山等地区的年降雨侵蚀力也较大,多年平均降雨侵蚀力超过了

2 700 MJ·mm/(hm²·h),集中分布在 2 900 ~ 3 200 MJ·mm/(hm²·h)之间。滇中区的降雨侵蚀力相对较小,集中分布在 2 200 ~ 2 500 MJ·mm/(hm²·h)之间。滇西北区、滇东北区多年平均降雨侵蚀力最小,集中分布在 1 900 ~ 2 300 MJ·mm/(hm²·h)之间,属降雨侵蚀力低值区。

图 6 为云南省 4 个季节降雨侵蚀力空间分布,可看出,不同季节降雨侵蚀力空间分布也存在显著的差异。春季,除南部区、滇西南区以及滇东南区的部分地区降雨侵蚀力大于 300 MJ·mm/(hm²·h)外,其余地区的降雨侵蚀力均较小,其中滇中区降雨侵蚀力最小,降雨侵蚀力小于 250 MJ·mm/(hm²·h)。夏季降雨侵蚀力在全年比重最大,不同地区的降雨侵蚀力分布在 1 078 ~ 2 652 MJ·mm/(hm²·h)之间,降雨侵蚀力分布呈现出从西南向东北递减的趋势。秋季降雨侵蚀力占比仅次于夏季,不同地区的降雨侵蚀力分布在 288 ~ 873 MJ·mm/(hm²·h)之间,降雨侵蚀力分布也呈现出从西南向东北递减的趋势。冬季不同地区的降雨侵蚀力分布在 4.4 ~ 111.0 MJ·mm/(hm²·h)之间,是 4 个季节中降雨侵蚀力最小的季节,滇中区仍然是降雨侵蚀力最小的地区。

2.4 降雨侵蚀力演变趋势

表 6 为不同分区降雨侵蚀力年际变化特征参

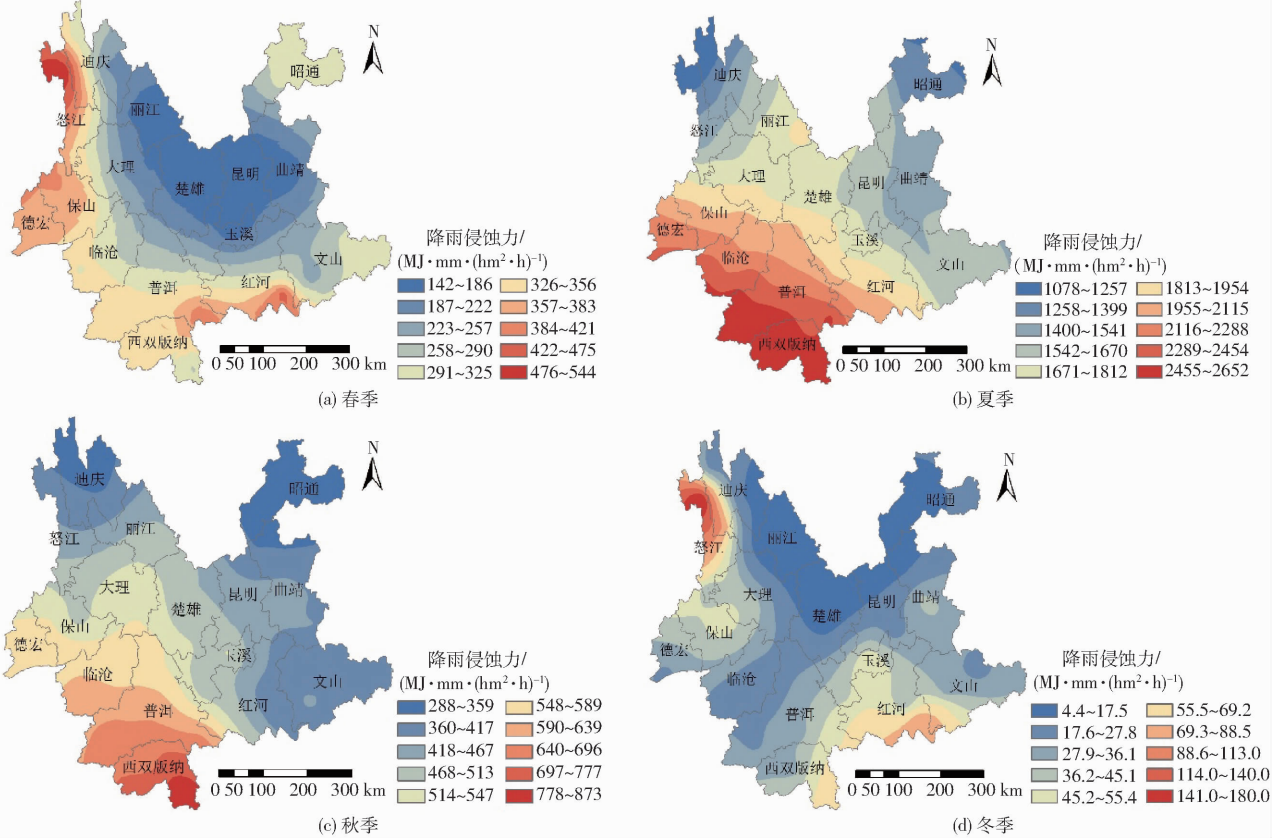


图 6 云南省不同季节降雨侵蚀力空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of R in different seasons in Yunnan Province

数。由表 6 可看出,7 个分区计算得到的降雨侵蚀力标准差变化范围为 496.88 ~ 835.84,其中最大值出现在南部区,最小值出现在滇东北区,说明南部区降雨侵蚀力差异最大,而滇东北区降雨侵蚀力差异最小。不同地区的降雨侵蚀力离差系数 C_v 的变化范围为 0.22 ~ 0.32,其大小依次为滇中区、滇东北区、滇西区、滇西北区和滇西南区、滇东南区、南部区,说明滇中区降雨侵蚀力的年际波动最大,南部区的降雨年际波动最小。7 个分区计算得到的趋势系数均为负值,数值在 -0.34 ~ -0.02 之间变化,说明从计算的降雨侵蚀力时间序列来看,不同分区的降雨侵蚀力均表现为减小的趋势。不同分区的降雨侵蚀力趋势系数绝对值大小依次为滇东北区、滇西南区、南部区、滇中区、滇东南区、滇西区、滇西北区,说明滇东北地区降雨侵蚀力减小的趋势更为明显,减小趋势最弱的是滇西北区。从 36 个观测站点来看,降雨侵蚀力趋势系数为正值的站点有 12 个,仅占全部站点的 1/3,其余站点除华坪外,降雨侵蚀力趋势系数均为负值。在趋势系数为正值的站点中,丽江、贡山 2 个观测站点趋势系数大于 0.1,分别为 0.164 和 0.125,表明这 2 个站点降雨侵蚀力增加的趋势十分明显。

表 6 不同分区降雨侵蚀力年际变化特征参数
Tab.6 Interannual variability parameters of R in different zoning

序号	分区	标准差	C_v	r
1	滇中区	702.93	0.32	-0.09
2	滇西区	769.97	0.26	-0.05
3	滇东南区	581.80	0.24	-0.07
4	滇西南区	734.19	0.25	-0.13
5	南部区	835.84	0.22	-0.12
6	滇东北区	496.88	0.27	-0.34
7	滇西北区	543.78	0.25	-0.02

3 讨论

3.1 降雨侵蚀力计算模型适宜性评价

降雨侵蚀力是采用 USLE/RUSLE 模型进行土壤侵蚀预测和评估的重要参数,也是评价区域降雨径流作用下潜在土壤侵蚀量的常用指标。在 USLE/RUSLE 模型中,一般应采用 EI_{30} 指标计算降雨侵蚀力。但在实际运用中, EI_{30} 对降雨数据的观测和整编要求较高,一定程度上限制了模型的推广使用。解决这一问题的办法之一是根据 EI_{30} 计算结果建立基于年、月、日降雨量的 R 计算模型。这方面很多研究人员也作了大量研究,建立了很多适用不同区域的降雨侵蚀力计算模型。但这些模型往往具有区域适宜性,导致模型的推广运用存在较大的局限性。本研究也表明,同一地区不同计算模型计算得到的

降雨侵蚀力值差异十分显著。因此,在采用简易型模型计算 R 时,必须对模型进行适宜性评估,确认模型精度满足要求后才能引用,否则基于 USLE/RUSLE 模型进行土壤侵蚀预测预报时,会严重影响到计算结果的精度。GU 等^[16]在研究云南高原降雨侵蚀力时空分布特征时,直接引用模型 E 计算降雨侵蚀力,计算结果的精度有待进一步检验。此外,MA 等^[17]在云南地区 KEJIE 流域进行的研究表明,YU 和 ROSEWELL 提出的降雨侵蚀力计算模型比模型 E 具有更好的适宜性,但该研究成果能否适用于其他区域则需进一步研究。本研究选择在中国南方地区常用的 5 种降雨侵蚀力计算模型,分析 5 种模型在云南地区的适宜性,该项工作在地区降雨侵蚀力研究中具有一定的开创性。

3.2 气候变化对云南省降雨侵蚀力的影响

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题,全球气候变化不仅影响人类生存环境,而且也影响世界经济发展和社会进步。近 100 a 来地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,这种变暖是由自然气候波动和人类活动共同引起的。研究表明,云南省近 50 a 气温变化与全球、北半球、中国变化趋势基本一致,全省降雨日数和雨季降雨量逐渐减少,暴雨、大暴雨频率上升^[25-26]。近 46 a 来云南省的年均降水量趋于减少,特别是夏季降水降幅明显下降^[27-28]。作为土壤侵蚀的主要驱动因子,降雨在区域水土生态环境的演变中扮演着重要角色。而在气候变化背景下,随着降雨特征(时空分布、暴雨特征)的变化,降雨侵蚀力也随着变化,并最终影响到水土生态环境的演变。从本文研究结果来看,云南省不同分区的降雨侵蚀力均表现为减小的趋势。该研究结论与全球气候变化背景下,云南省降雨日数和雨季降雨量逐渐减少的研究结论相一致。需要特别关注的是,气候变化背景下暴雨、大暴雨频率上升,这将导致降雨侵蚀力高值频现,进一步提高区域土壤侵蚀的危险性。

4 结论

- (1)在中国南方地区常用的 5 种降雨侵蚀力计算模型中,模型 B 计算的降雨侵蚀力具有较好的稳定性,且有效系数(E_f)最大,相对偏差系数(E_r)最小,计算结果精确度最高,在云南地区有较好的适宜性。
- (2)云南省多年平均降雨量为 1 106.84 mm,7 个分区多年平均降雨量分布在 745.83 ~ 1 533.33 mm 之间,不同地区降雨分布不均匀,降雨主要集中在夏季;7 个分区多年平均降雨量大小依次为南部区、滇西

区、滇西南区、滇东南区、滇西北区、滇中区、滇东北区;不同季节降雨空间分布也存在差异,降雨分布呈现出从西南向东北递减的趋势。

(3)多年平均降雨侵蚀力 $2\,719.31\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$,7个分区多年平均降雨侵蚀力分布在 $1\,837.23\sim 3\,949.12\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ 之间,降雨侵蚀力主要集中在夏季;7个分区降雨侵蚀力大小依次为南部区、滇西区、滇西南区、滇东南区、滇西北区、滇中区、滇东北区,总体表现出从西南向东北方向递减

的趋势,不同季节降雨侵蚀力空间分布也存在显著的差异。

(4)滇中区降雨侵蚀力年际波动最大,南部区降雨年际波动最小;降雨侵蚀力趋势系数在 $-0.34\sim -0.02$ 之间变化,7个分区降雨侵蚀力均表现为减小的趋势;不同分区趋势系数绝对值大小依次为滇东北区、滇西南区、南部区、滇中区、滇东南区、滇西区、滇西北区,滇东北地区降雨侵蚀力减小的趋势最为明显。

参 考 文 献

1 史德明. 中国水土流失及其对旱涝灾害的影响[J]. 自然灾害学报,1996,5(2):36-46.
SHI Deming. Soil erosion and its impact on drought and flood in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(2):36-46. (in Chinese)

2 李景保,梁成军,蔡松柏. 论土壤侵蚀对山地致灾因子链的复合效应——以湖南四水流域中上游地区为例[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):101-105.
LI Jingbao, LIANG Chengjun, CAI Songbai. Compound effect of erosion on mountain hazard chain: taking middle and upper drainage area of Four Rivers in Hunan Province as an example[J]. Journal of Natural Disaster, 2002, 11(4):101-105. (in Chinese)

3 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154,182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150422&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.022.
LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):147-154,182. (in Chinese)

4 LIU Bintao, TAO Heping, SONG Chuanfeng, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in southwest China from 1960 to 2009[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(5):499-509.

5 WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[M]. USDA Agricultural Handbook, No. 282,1965.

6 WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. USDA Agriculture Handbook, No. 537,1978.

7 付金霞,张鹏,郑粉莉,等. 河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 185-192,207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160224&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.024.
FU Jinxia, ZHANG Peng, ZHENG Fenli, et al. Dynamic change analysis of rainfall erosivity and river sediment discharge of Helong reach of the yellow river from 1957 to 2011[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):185-192,207. (in Chinese)

8 USDA Agricultural Research Service. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE)[M]. Agriculture Handbook, No. 703,2000.

9 王万忠,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅱ)[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):29-39.
WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, et al. Distribution of rainfall erosivity R value in China(Ⅱ)[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation,1996,2(1):29-39. (in Chinese)

10 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.
ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711. (in Chinese)

11 史志华,郭国先,曾之俊,等. 武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J]. 中国水土保持,2006(1):22-24.
SHI Zhihua, GUO Guoxian, ZENG Zhijun, et al. Study on rainfall erosivity of the characteristics and daily rainfall erosivity model in Wuhan City[J]. Soil and Water Conservation in China,2006(1):22-24. (in Chinese)

12 卢喜平. 紫色土丘陵区降雨侵蚀力模拟研究[D]. 重庆:西南大学,2006.
LU Xiping. Simulation of rainfall erosivity in purple soil hilly region[D]. Chongqing:Southwest University, 2006. (in Chinese)

13 史东梅,江东,卢喜平,等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J]. 农业工程学报,2008,24(9):16-21.
SHI Dongmei, JIANG Dong, LU Xiping, et al. Temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Fuling district[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9):16-21. (in Chinese)

14 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J]. 地理科学,1999,19(3):265-270.

YANG Zisheng. A study on erosive force of rainfall on sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(3):265 – 270. (in Chinese)

15 赵平伟,郭萍. 1980—2013 年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征[J]. *地理科学*,2015,35(10):1306 – 1311.
ZHAO Pingwei, GUO Ping. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in northwest Yunnan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(10):1306 – 1311. (in Chinese)

16 GU Zhijia, DUAN Xingwu, LIU Bing, et al. The spatial distribution and temporal variation of rainfall erosivity in the Yunnan Plateau, Southwest China: 1960—2012[J]. *Catena*, 2016(145): 291 – 300.

17 MA Xing, HE Yandong, XU Jianchu, et al. Spatial and temporal variation in rainfall erosivity in a Himalayan watershed[J]. *Catena*, 2014(121):248 – 259.

18 SEYED H R S. Trend analysis of the rainfall erosivity index at different time scales in Iran[J]. *Nat Hazards*, 2015,77:383 – 404.

19 赵珂,饶懿,王丽丽,等. 西南地区生态脆弱性评价研究——以云南、贵州为例[J]. *地质灾害与环境保护*,2004,15(2):38 – 42.
ZHAO Ke, RAO Yi, WANG Lili, et al. Evaluation of ecological fragility in southwest of China [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*,2004,15(2):38 – 42. (in Chinese)

20 何云玲,张一平. 云南省生态环境脆弱性评价研究[J]. *地域研究与开发*, 2009, 28(2):108 – 111.
HE Yunling, ZHANG Yiping. Study on the assessment of ecological environment vulnerability in Yunnan Province[J]. *Areal Research and Development*, 2009, 28(2):108 – 111. (in Chinese)

21 KNISEI W G. CREAMS: a field scale model for chemical, runoff and erosion from agricultural management systems[J]. *USDA Conservation Research Report*,1980,26(5):133 – 138.

22 NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models, part 1: a discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*,1970,10(3):282 – 290.

23 田刚,梁音,陈效民,等. 几种降雨侵蚀力模型在赤水河流域的对比研究[J]. *土壤学报*,2010, 47(1):7 – 12.
TIAN Gang, LIANG Yin, CHEN Xiaomin, et al. Comparative study on several rainfall erosiveness models in Lianshui basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1):7 – 12. (in Chinese)

24 云南省农业区划委员会办公室. 云南省地综合农业区划简编[M]. 昆明:云南人民出版社,1999.

25 程建刚,解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5):19 – 26.
CHENG Jian'gang, XIE Ming'en. The analysis of regional climate change features over Yunnan in recent 50 years[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(5):19 – 26. (in Chinese)

26 吴志杰. 城市化对云南高原中部区域气候变化的影响研究[D]. 昆明:云南大学, 2015.
WU Zhijie. Impacts of urbanization on climate change in the central region of Yunnan Plateau[D]. Kunming:Yunnan University, 2015. (in Chinese)

27 LI Yungang, HE Daming, HU Jinming, et al. Variability of extreme precipitation over YP, China 1960—2012[J]. *International Journal of Climatology*,2015, 35(2):245 – 258.

28 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. *灾害学*, 2010, 25(1):39 – 44.
LIU Yu, ZHAO Erxu, HUANG Wei, et al. Characteristic analysis of precipitation and temperature trend in Yunnan Province in recent 46 years[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(1):39 – 44. (in Chinese)