

白龙江流域不同降雨侵蚀力模型对比研究

田黎明¹, 孙爽¹, 王刚², 张鹏¹, 马金珠¹

(1.兰州大学西部环境与气候变化研究院,甘肃 兰州 730000; 2.甘肃省兰州市气象局,甘肃 兰州 730020)

摘要:降雨侵蚀力不仅是评价土壤流失、输沙量和水质模型的重要参数,也是气候环境变化模拟中的重要参量。基于白龙江流域5个气象站点逐日降雨观测资料,利用Renard等8个降雨侵蚀力模型分别计算白龙江流域降雨侵蚀力,并分析各模型之间的差异。结果表明Renard-Lo年降雨侵蚀力模型误差最大为76.2%,周伏建月降雨侵蚀力模型误差最小为2.1%,月降雨侵蚀力模型计算结果在白龙江流域优于年雨量和日雨量模型结果。白龙江流域年平均侵蚀性降雨占年降雨量的34.5%~46.0%。年降雨量与年平均降雨侵蚀力之间呈现高度相关,可以用幂函数拟合,各站相关系数均超过0.98。

关键词:降雨侵蚀力模型;白龙江流域;土壤侵蚀;年降雨

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)01-0055-06

1 引言

Wischmeier和Smith^[1]根据美国8000多个小区资料,分析降雨动能、降雨强度、前期降雨量等降雨特征与土壤侵蚀的关系,最终发现降雨动能与最大30min雨强的乘积 EI_{30} 与土壤侵蚀量的关系最好,并将 EI_{30} 定义为降雨侵蚀力^[2-3]。降雨侵蚀力是描述降水动能与土壤侵蚀之间的相互作用^[2],也反应了雨滴溅蚀地表径流对土壤侵蚀的综合效应^[6],并在通用土壤流失方程(USLE)和修订通用土壤流失方程(RUSLE)中直接运用。那么,如何准确评估降雨侵蚀力,对于定量评价和预报土壤侵蚀的研究,灾害控制,水资源管理以及制定水土保持措施与规划都具有重要意义^[4]。

在计算降雨动能 E 和 R 时,需要利用高精度和20年以上连续记录的降雨数据(包括雨强,雨量,历时等)^[5]。但在许多地区高精度降雨资料十分缺乏,而且处理和计算过程十分繁琐,导致该方法在应用中难以进行。为此,国内外大量学者都在探索通过常规的降雨数据能计算出降雨侵蚀力的简易算法。

降雨侵蚀力是降雨量、降雨强度、径流量以及雨滴能量等降雨特征的函数^[6],目前国内外建立了各区域的年、月、日降雨侵蚀力估算模型,有Lo等^[7]、Renard

等^[8]的年降雨量模型,黄炎和等^[9]、吴素业等^[10]、周伏建等^[11]、Yu和Rosewell^[12]等的月降雨量模型,以及Richardson等^[13]、章文波等^[14]、刘斌涛等^[15]的日降雨量模型。基于这些基础降水资料而建立的降雨侵蚀力模型,已有研究表明年平均降水量与降雨侵蚀力的关系较好^[12,16-17]。目前,关于白龙江流域的降雨侵蚀力估算鲜有报道,该区域山高坡陡、河谷深切、降雨集中且多为暴雨,生态环境脆弱,土壤流失较为严重。选取常用的几种降雨侵蚀力模型,利用白龙江流域5个气象站的逐日降雨资料,分析几种模型的差异,以期为该区域土壤侵蚀的预测和制定水土保持措施具有指导意义。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

白龙江流域处于青藏高原与川西北高原交错地带,在甘肃境内流域面积约为 $1.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ ($32^\circ 36' \sim 34^\circ 24' \text{ N}$, $103^\circ 0' \sim 105^\circ 30' \text{ E}$)(见图1)。研究区属秦岭山地,地势西高东低,坡度一般在 30° 以上,海拔高度在550~4536m之间。该区地层岩性比较复杂,从志留系到第四系均有出露,而以志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系分布较为广泛。特别是受新构造活动的强烈影响,岩层挤压、褶皱断裂十分严重,导致岩层十

收稿日期:2013-09-20

基金项目:国家科技支撑计划课题(2011BAK12B05)

作者简介:田黎明(1988-),男,重庆开县人,硕士研究生,研究方向为水文过程与土壤侵蚀。E-mail:ttkoko000@gmail.com.

分破碎。流域多年平均气温为 13.0°C,在海拔 2 500m 左右,年平均气温低于 5°C;多年平均降水量约为 500~900mm,主要集中在 6~9 月,降雨量占全年的 60%左右;多年平均径流量约为 $87 \times 10^8 \text{m}^3$,其中 5~10 月流量较大,约占全年的 75%^[18]。土壤类型大致分为草甸土、灰化土、山地棕色森林土、山地棕褐土、山地褐色土和山地栗钙土等^[19]。

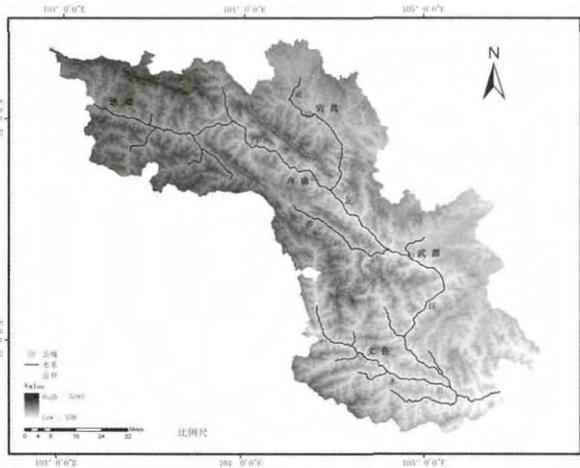


图1 白龙江流域地理位置和气象观测站分布

Fig.1 Location of the Bailongjiang river basin and distribution of the meteorological stations

2.2 研究方法

选取在水土流失严重区常用的 8 种模型,分为年雨量模型 4 种,月和日雨量模型各选取 2 种。利用均方根误差 (RMSE) 和平均绝对百分误差 (MAPE) 分别评价各个模型的优劣。

模型 A: Lo 等^[7]年降雨侵蚀力模型:

$$R=38.46+3.48P \quad (1)$$

式中: R 为年平均降雨侵蚀力 ($\text{N h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); P 为年平均降雨量 (cm); $\text{N h}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 乘以 10 就得到国际单位 $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。

模型 B: Renard 等^[8]年降雨侵蚀力模型:

$$R=0.0483P^{1.610}, P < 850\text{mm} \quad (2)$$

$$R=587.8-1.219P+0.004105P^2, P \geq 850\text{mm} \quad (3)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); P 为年降雨量 (mm)。

模型 C: 周伏建等^[11]月降雨侵蚀力模型:

$$R=\sum_{i=1}^{12} (-2.6398+0.3046P_i) \quad (4)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($\text{J cm m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); P_i 为第 i 月降雨量 (mm)。

模型 D: Arnoldus^[20]年降雨侵蚀力模型:

$$MFI=\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (5)$$

$$R=21.56MFI^{0.927} \quad (6)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); MFI 为修正傅里叶指数 (Modified Fournier Index), P_i 为第 i 月平均月降雨量 (mm), P 为年平均降雨量 (mm)。

模型 E: 吴素业^[10]月降雨侵蚀力模型:

$$R=\sum_{i=1}^{12} 0.0125P_i^{1.6295} \quad (7)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($\text{J cm m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$), P_i 为第 i 月降雨量 (mm)。

模型 F: 章文波等^[14]日降雨侵蚀力模型:

$$R_i=\alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (8)$$

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \quad (9)$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \quad (10)$$

式中: R_i 为第 i 个半月的降雨侵蚀力值 ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); k 为该半月时段内的天数; P_j 为半月时段内的第 j 天的降雨量,日降雨量 $\geq 12\text{mm}$,反之,日降雨量 $< 12\text{mm}$,则 P_j 以 0 计算; α 和 β 是模型参数; P_{d12} 为日雨量 $\geq 12\text{mm}$ 的日平均降雨量 (mm),亦为 1 年中 $\geq 12\text{mm}$ 日雨量的总和与相应日数的比值; P_{y12} 为日雨量 $\geq 12\text{mm}$ 的年平均降雨量 (mm),即 1 年中 $\geq 12\text{mm}$ 日降雨量累加值的多年平均降雨量。

模型 G: 史志华等^[21]日降雨侵蚀力模型:

$$R_j=0.429 \left\{ 1+0.328\sin \left[\frac{\pi}{12}(j-1) \right] \right\} \sum_{k=1}^n P_k^{1.47}, P_k \geq 12\text{mm} \quad (11)$$

式中: R_j 为第 j 个月的降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$); P_k 为日降雨量; j 为月序。

模型 H: Renard-Lo^[8]年降雨降雨侵蚀力模型:

$$R=38.5+0.35P \quad (12)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{yr}^{-1}$); P 为年平均降雨量 (mm yr^{-1})。

均方根误差 (RMSE) 和平均绝对百分误差 (MAPE) 是检验模型计算结果平均误差的常用方法,广泛用于气候环境科学。其计算公式如下:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{act,i}-R_{est,i})^2}{n}} \quad (13)$$

$$RMSE = \left| \frac{(R_{act,i} - R_{est})}{R_{act}} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中: $R_{act,i}$ 为第*i*年基准降雨侵蚀力值, $R_{est,i}$ 为第*i*年的模拟降雨侵蚀力值。

2.3 研究资料

选取白龙江流域迭部、宕昌、舟曲、武都和文县等5个气象站点(见表1)所观测的多年逐日降水资料。不同研究区域侵蚀性降雨不一样,有9.8mm、9.2mm、10mm、12mm、12.7mm等。结合研究区地理状况独特性,最终根据谢云等^[22]的研究结果为准,即侵蚀性降雨标准:日降雨量 $\geq 12\text{mm}$ 。

表1 研究区气象站点特征

Table1 The characteristics of the meteorological stations in the study area

站名	资料长度/a	起止年	纬度/°N	经度/°E	海拔/m
迭部	39	1973~2011	34.08	103.23	2380
宕昌	48	1958~2005	34.06	104.38	1775
舟曲	40	1972~2011	33.81	104.38	1372
武都	55	1951~2005	33.43	104.94	1004
文县	53	1959~2011	32.95	104.70	934

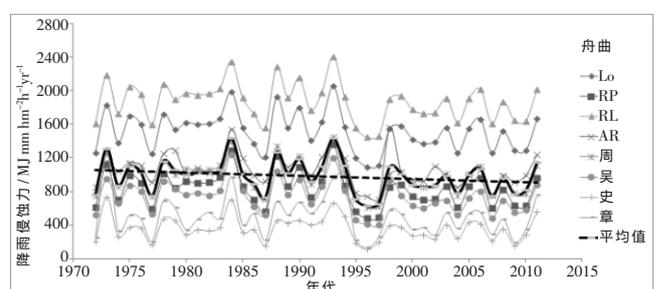
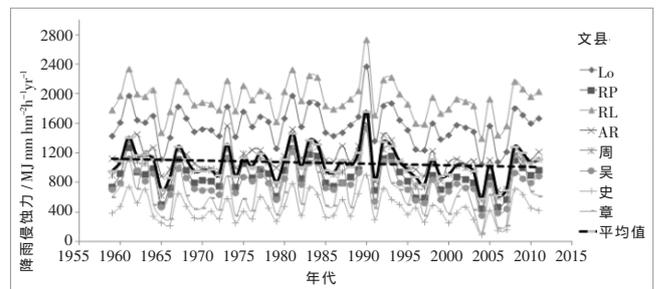
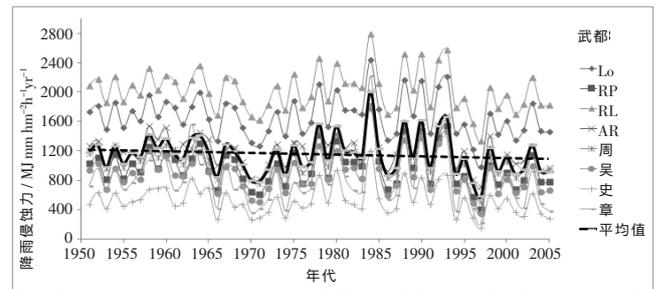
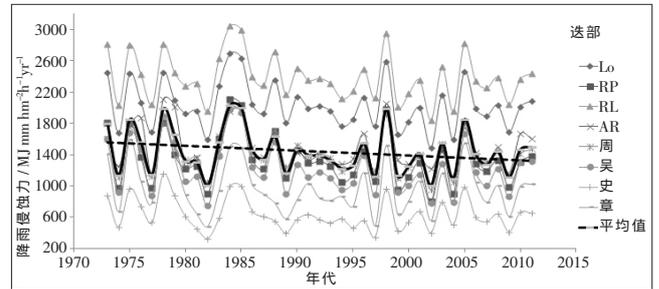
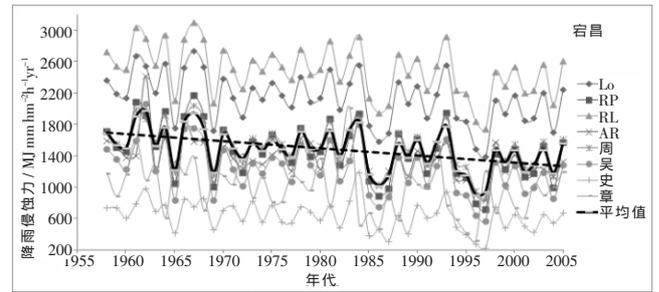
3 结果与分析

3.1 各模型之间的年降雨侵蚀力差异分析

根据不同模型和资料序列,分别计算得到白龙江流域5个气象站的降雨侵蚀力(见图2)。

由图2—宕昌可以看出,各模型计算得到的降雨侵蚀力变化较大。模型F波动比较剧烈且与其余模型的变化趋势不同,而其余模型变化趋势一致。值得注意的是,模型F出现低谷值时(如1962年),其他模型出现峰值;出现峰值时(如1963年),而其他模型出现低谷。这可能是因为在西北地区,特别是该研究区域,降雨主要呈现出历时短,降雨强度大,雨量相对集中等特点。已有研究表明模型F在降雨较丰富的南方地区误差较小,而在降雨较小的西北地区误差较大,年平均降雨量在400mm左右的相对误差为0~90%^[14]。月雨量模型C与E在1962年出现交叉,可能是因为月雨量在年内分配中的权重大小不同而引起的^[22],而日雨量模型E和F之间也出现交叉,与田刚等^[22]的结果有所不同。这可能是由于不同研究区域的降雨特征不同而导致的。从图2—武都可以看出,日雨量模型F与G在1959年是呈现峰值,但是其余几个模型均表现为低估值。特别是在1984年,模型F比模型B、C、D、E均大,

反映出模型F对极端降雨情况有较好的敏感性,因为在1984年汛期该区域出现极端降雨,地质灾害十分严重。多年降雨侵蚀力平均值曲线与模型C、D比较接近,各站点多年降雨侵蚀力均随时间呈现出降低趋势,其降低速率分别为6.15,9.07,4.01,2.23和2.21 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹。



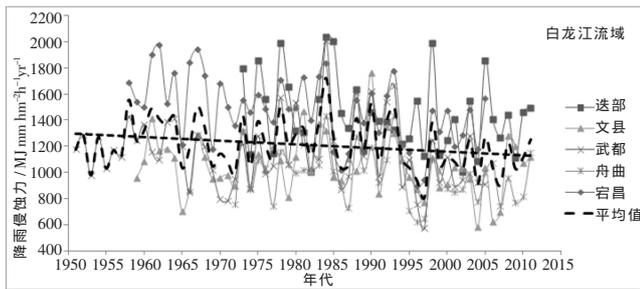


图2 各站各模型计算得到的降雨侵蚀力

Fig.2 The rainfall erosivity of the different models at the 5 stations

总体来看,迭部、舟曲、武都和文县的年降雨侵蚀力大小依次为模型 H>A>D>C>B>E>F>G,而宕昌则为 H>A>C>B>E>D>F>G。可见模型 H、A 均偏大,模型 F、G 则偏小,模型 C 均适合白龙江流域的 5 个站点,与相应的模型平均降雨侵蚀力相近。利用各站点的基准值进行平均化,最后得到白龙江流域的多年平均降雨侵蚀力(图 2—白龙江),最大值为 1725.2 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹(1984 年),最小值为 814.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹(1997 年),平均值为 1 213.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹。降雨侵蚀力沿干流呈现出先减小后增大的趋势,这与长江上游有所不同,范建荣等^[23]得出降雨侵蚀力沿长江上游先增大后减小的趋势。可能是由于流域尺度不同,二者流域面积相差 56 倍。白龙江流域多年降雨侵蚀力呈现降低趋势,每 10 年约减少 27.2 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹。由以上分析可知,宕昌、迭部和舟曲的降低趋势均大于平均值,而武都和

文县则小于平均值,并且降雨侵蚀力的降低趋势沿干流逐渐减少。

3.2 各模型的误差分析

模型的优劣程度可以用均方根误差和平均绝对百分误差来衡量。根据公式(13)和(14)计算得到的结果如表 2。从 MAPE 看,各站各模型相差比较大,舟曲最大为模型 H(90.7%),最小为模型 C(0.5%)。RMSE 规律与 MAPE 相似,迭部、舟曲、武都和文县均是模型 H 最大,模型 C 最小;宕昌最大也为模型 H(1012.95 MJmmha⁻¹h⁻¹yr⁻¹),但最小为模型 B(20.50MJmmha⁻¹h⁻¹yr⁻¹)。总体上看,在白龙江流域,模型 H 误差最大,模型 C 误差最小。所以利用模型 C 计算白龙江流域的降雨侵蚀力时误差较小,同时模型 D 也在误差范围之内。模型 H 和 A 误差大可能是由于两种模型主要是针对夏威夷地区而建立的,该区域处在温暖的信风带,气候带复杂多样,这与白龙江流域的气候差别较大。有学者将模型 G 和 F 也应用到其他地区,发现模型 G 计算结果比实际结果偏小很多,而模型 F 在计算多年平均降雨侵蚀力时,相对偏差很大^[24],这与本文结果与其一致。由以上结果可以得出,月雨量降雨侵蚀力模型得出的结果在白龙江流域优于年雨量和日雨量模型。田刚等^[22]在选取湫水河流域最佳降雨侵蚀力模型中也得到相同结论。这说明月雨量模型在计算中小流域的降雨侵蚀力能够取得较好结果。

表2 各站不同模型的模拟值、平均值绝对百分误差和均方根误差

Table2 The simulated value, mean absolute percentage error and root mean square error of the different models at the 5 stations

站点	项目	模型 A	模型 B	模型 H	模型 D	模型 C	模型 E	模型 G	模型 F	
迭部	模拟值	2 029.39	1 343.65	2 387.37	1 470.12	1 425.86	1 239.77	634.90	980.30	1 438.92
	MAPE	0.410	0.066	0.659	0.022	0.009	0.138	0.559	0.319	
	RMSE	590.47	95.27	948.45	31.20	13.06	199.15	804.02	458.62	
宕昌	模拟值	2 131.72	1 456.84	24 90.29	1 360.79	1 515.42	1 234.76	634.60	994.25	
	MAPE	0.443	0.014	0.686	0.079	0.026	0.164	0.570	0.327	1 477.33
	RMSE	654.38	20.50	1012.95	116.54	38.09	242.57	842.73	483.08	
舟曲	模拟值	1 515.35	831.16	1 870.38	1 059.34	975.93	734.77	356.92	504.45	
	MAPE	0.545	0.153	0.907	0.080	0.005	0.251	0.636	0.486	981.04
	RMSE	534.32	149.88	889.34	78.30	5.11	246.27	624.12	476.58	
武都	模拟值	1 669.28	977.61	2 025.20	1 203.42	1 110.66	887.09	528.15	837.28	
	MAPE	0.445	0.153	0.754	0.042	0.038	0.232	0.543	0.275	1 154.84
	RMSE	514.45	177.23	870.36	48.59	44.17	267.75	626.68	317.56	
文县	模拟值	1 577.68	888.57	1 933.07	1 123.83	1 030.49	798.08	447.10	684.84	
	MAPE	0.488	0.162	0.823	0.060	0.028	0.247	0.578	0.354	1 060.46
	RMSE	517.23	171.89	872.61	63.38	29.97	262.38	613.36	375.62	

注:基准值是 8 个模型计算的降雨侵蚀力的平均值。基准值、模拟值和 RMSE 的单位均为 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹,MAPE 无单位。

3.3 降雨量与降雨侵蚀力

从表 3 看出,5 个站点的多年平均降雨量的平均值为 501.8mm; 多年平均降雨侵蚀力的平均值为 1 222.5 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹。迭部、宕昌、舟曲、武都和文县年平均侵蚀性降雨占总比例分别为 46.1%、44.8%、43.6%、46.0%和 34.5%。由此可见,白龙江中上游降雨对土壤侵蚀作用较大,文县地区降雨对土壤流失的贡献则相对较小。

对各站逐年降雨量与平均降雨侵蚀力做相关性分析,发现其相关系数均超过 0.98,迭部、宕昌、舟曲、武都和文县分别为 0.9811、0.9822、0.9856、0.9857 和 0.9808,说明二者之间的幂函数关系非常好。然后将 5 个站的逐年降雨与对应的年降雨侵蚀力做相关分析(见图 3),二者依然呈现出以幂函数的高度相关($r=0.9860, R^2=0.9722$),这与其他学者得到的结论一致^[12,16-17]。将 1973~2005 年 5 个站点的降雨数据与降雨侵蚀力进行平均化得到结果见图 4,年平均降雨与年降雨侵蚀力变化规律一致,最大年平均降雨量(652.4mm)和最大年降雨侵蚀力(1 725.2 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹)均发生在 1984 年,最小年平均降雨量(361.8mm)和最小年降雨

侵蚀力(814.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹)均发生在 1997 年。可能是因为 1984 年为厄尔尼诺年,发生了一系列的重大灾害(极端降雨和泥石流滑坡等灾害)而引起的,年降雨量越高,暴雨事件次数越多,基于年降雨量估算降雨侵蚀力的方法可靠性越高^[17]。

4 结论

各模型计算得到的降雨侵蚀力变化幅度较大,特别是模型 F 波动十分强烈。白龙江流域的降雨侵蚀力平均值为 1213.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹,多年降雨侵蚀力呈现降低趋势,每 10 年约减少 27.2 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹。从 MAPE 和 RMSE 分析,模型 H 误差最大(76.2%),模型 C 误差最小(2.1%),因此利用模型 C 计算白龙江流域的降雨侵蚀力效果最佳,同时月雨量降雨侵蚀力模型得出的结果在研究区域优于年雨量和日雨量模型。迭部、宕昌、舟曲、武都和文县年平均侵蚀性降雨占年降雨量的比例分别为 46.1%、44.8%、43.6%、46.0%和 34.5%。年降雨量与年平均降雨侵蚀力之间呈现高度相关,可以用幂函数拟合,各站相关系数均超过 0.98。

表3 各站点年降雨量与降雨侵蚀力

Table3 The annual precipitation and annual rainfall erosivity at the 5 stations

站点	年限	年平均降雨 / mm			年平均侵蚀性降雨 / mm	年降雨侵蚀力/MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ yr ⁻¹		
		平均值	最大值	最小值		平均值	最大值	最小值
迭部	39	572.1	762.0	416.5	263.7	1 438.9	2 036.4	1 004.2
宕昌	48	601.5	775.7	388.3	269.3	1 477.3	1 972.5	899.5
舟曲	40	424.4	561.5	303.4	184.9	981.0	1 435.8	626.2
武都	55	468.6	689.3	270.5	215.5	1 154.8	2 006.0	580.0
文县	53	442.3	671.9	290.9	152.8	1 060.5	1 760.2	583.5

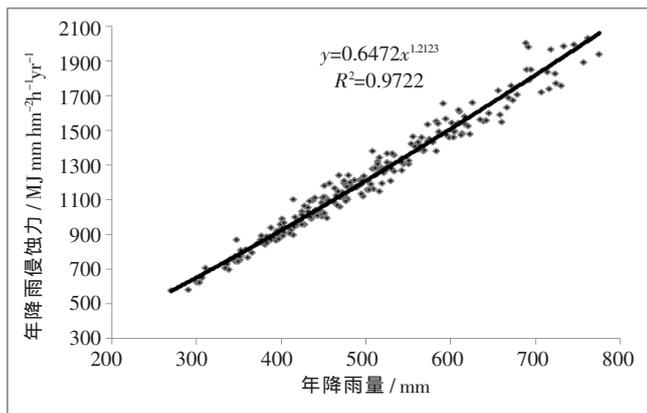


图3 235 个数据散点图

Fig.3 Scatter plot of 235data records ($r=0.9860$)

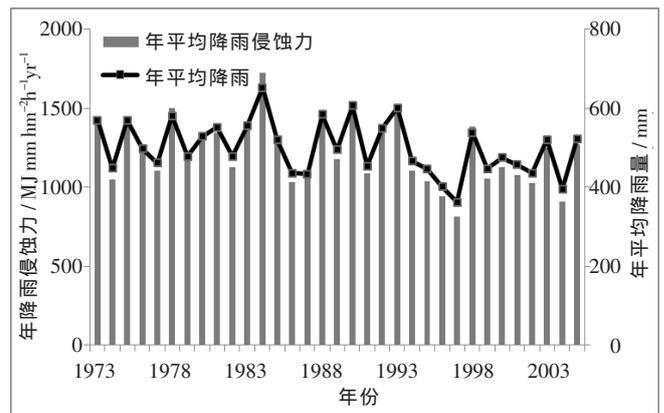


图4 5 个气象站年平均降雨与年平均降雨侵蚀力

Fig.4 The annual mean precipitation and annual mean rainfall erosivity at the 5 stations for 33 years

参考文献:

- [1] Wischmeier WH, Smith DD. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transaction American Geophysical Union, 1958,39(2): 285-291.
- [2] Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning [M]. Agriculture handbook No.537. USDA, Science and Education Administration Washington D.C., 1978.
- [3] 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. (ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Research evolution of rainfall erosivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002,16(5):43-46. (in Chinese))
- [4] 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. (SUN Quanzhong, WANG Zhaojun, ZHAO Jia, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011,27(4):1-5. (in Chinese))
- [5] Renard KG, Foster GR, Weesies GA, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation RUSLE [M]. Agriculture Handbook, No.703, USDA, Science and Education Administration Washington D.C., 1997.
- [6] 杨轩, 梁音, 方继青, 等. 基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型[J]. 土壤学报, 2010,47(2):216-222. (YANG Xuan, LIANG Yin, FANG Jiqing, et al. Constitution of monthly rainfall erosivity models based on information of daily rainfall [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(2):216-222.(in Chinese))
- [7] Lo A, EI-Swaify SA, Dangler EW, et al. Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii. soil erosion and conservation [A]. In: EI-Swaify SA, Moldenhauer WC, Lo A, (Eds.), Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, 1985:384-392.
- [8] Renard KG, Freimund JR. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994,157:287-306.
- [9] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报, 1992,6(4):1-5. (HUANG Yanhe, LU Chenglong, ZHENG Tianfa, et al. Study on rainfall erosivity index in southeastern Fujian [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992,6(4):1-5. (in Chinese))
- [10] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J]. 中国水土保持, 1994,(4):12-13. (WU Suye. Spatiotemporal distribution and simplified algorithm of rainfall erosivity in Dabieshan of Anhui Province [J]. Chinese Soil and Water Conservation, 1994,(4):12-13. (in Chinese))
- [11] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995,9(1):13-18. (ZHOU Fujian, CHEN Minghua, LIN Fuxing, et al. The rainfall erosivity index in Fujian province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(1):13-18. (in Chinese))
- [12] Yu B, Rosewell CJ. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1996,39(2):559-561.
- [13] Richardson CW, Foster GR, Wright DA. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE, 1983,26:153-160.
- [14] 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))
- [15] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 地球科学进展, 2012,27(5):499-509. (LIU Bintao, TAO Heping, SONG Chunfeng, 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. (in Chinese))
- [16] Silva AM. Rainfall erosivity map for Brazil [J]. Catena, 2004,57: 251-259.
- [17] Lee JH, Heo JH. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea [J]. Journal of Hydrology, 2011,409:30-48.
- [18] 田黎明, 齐识, 马金珠, 等. 白龙江流域上游径流年内分配变化规律分析 [J]. 水文, 2012,32 (4):82-87. (TIAN Liming, QI Shi, MA Jinzhu, et al. Changes of annual runoff distribution in the upstream of the Bailongjiang river [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(4):82-87. (in Chinese))
- [19] 韩国营. 甘肃省白龙江流域苔类植物的研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2009. (HAN Guoying. Study on Liverworts Hepaticae Hepatophyta in the Bailongjiang River Basin of Gansu Province [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009. (in Chinese))
- [20] Arnoldus HMJ. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco [J]. FAO Soils Bulletin, 1977,34:39-51.
- [21] 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. Daily rainfall erosivity model and characteristics of rainfall erosivity in Wuhan [J]. Chinese Soil and Water Conservation, 2006,1:22-24. (in Chinese))
- [22] 田刚, 梁音, 陈效民, 等. 几种降雨侵蚀力模型在澗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))
- [23] 范建荣, 严冬, 郭祥. GIS 支持下的长江上游降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(1):92-96. (FAN Jianrong, YAN Dong, GUO Xiang. Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity based on GIS in the upper Yangtze river basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(1):92-96. (in Chinese))
- [24] 伍育鹏, 谢云, 章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J]. 水土保持学报, 2001,15(3):31-34. (WU Yupeng, XIE Yun, ZHANG Wenbo. Comparison of different methods for estimating average annual rainfall erosivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001,15(3):31-34. (in Chinese))

