# 广西隆雨侵蚀力计算模型适用性研究

王升1,郑修茹2 (1.广西百色国家农业科技园区管理委员会,广西百色 533612;2.南宁师范大学地理科学与规划学院,广西南宁 530001)

摘要 采用分布于广西区的23个国家基本雨量站1961—2010年逐日降雨数据,选用我国南方地区常用的5种降雨侵蚀力计算模型「章 文波等(A)、CREAMS(B)、吴素业等(C)、郑海金等(D)和史东梅等(E)],探讨其在广西喀斯特和非喀斯特地区的适用性,并采用有效 系教和相对偏差作为模型的评价指标。结果表明,基于日降雨量的降雨侵蚀力模型(A和B)计算的降雨侵蚀力均大于基于月降雨量的 模型(C、D和E)的结果。在喀斯特地区的10个站点中,有6个站点模型B的稳定性较好,具有较大的有效系数和较小的相对偏差,表 明基于日降雨量的模型 B 在喀斯特地区较为适用;当仅有月降雨量资料时,宜采用模型 D。在非喀斯特地区的13个站点中,有12个站 点模型 D 稳定性较好,具有较大的有效系数(0.967)和较小的相对偏差(0.033),表明基于月降雨量的模型 D 在非喀斯特地区较为适用。 研究结果可为洪涝灾害频发、存在较大水力侵蚀风险的广西水土保持规划和防治提供科学依据。 关键词 降雨侵蚀力:土壤侵蚀:适用性:有效系数:相对偏差:喀斯特:广西

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



#### Study on Applicability of Calculation Model of Rainfall Erosivity in Guangxi

WANG Sheng<sup>1</sup>, ZHENG Xiu-ru<sup>2</sup> (1. Administration Committee of Baise National Agricultural Sci-tech Zone, Baise, Guangxi 533612; 2. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001)

Abstract Based on the daily rainfall data collected from 23 meteorological stations in Guangxi from 1961 to 2010, the suitable estimation models of Rainfall erosivity (R) for karst and non-karst regions in Guangxi were chosen from five rainfall erosivity models [ Zhang Wen-bo et al (A), CREAMS (B), Wu Su-ve et al (C), Zheng Hai-jin et al (D) and Shi Dong-mei et al (E), and the effective coefficient and relative deviation were used as the evaluation indicators of the model. The results showed that rainfall erosivity estimated by the daily rainfall models (A and B) were larger than estimated by the monthly rainfall models (C,D, and E). Among the 10 stations in the karst area, there were 6 stations with better stability of model B, with larger effective coefficient and smaller relative deviation, indicating that the model B based on daily rainfall was more suitable in karst area; model D should be used when only monthly rainfall data were available. Among the 13 stations in the non-karst area, 12 stations had better stability of the model D, with larger effective coefficient (0.967) and smaller relative deviation (0.033), indicating that Model D based on monthly rainfall is more suitable for non-karst areas. The research results can provide a scientific basis for the planning and prevention of soil and water conservation in Guangxi, where floods occur frequently and there is a greater risk of hydraulic erosion. Key words Rainfall erosivity; Soil erosion; Applicability; Effective coefficient; Relative deviation; Karst; Guangxi

土壤侵蚀是全世界面临的主要环境和农业问题之一.一 方面它会导致土壤入渗能力降低,从而使得土壤持水能力下 降;另一方面其会降低土壤养分含量,导致土壤质量下降。 土壤侵蚀过程受降雨、地形、土壤结构和植被及作物类型等 因素的影响<sup>[1]</sup>。其中,降雨是土壤水蚀的主要驱动因素,降 雨引起土壤侵蚀的潜在能力称为降雨侵蚀力(简称 R)<sup>[1-2]</sup>。

国内外对降水侵蚀力的时空变化特征的研究已广泛开 展<sup>[1,3-5]</sup>。在国内,章文波等<sup>[2]</sup>提出了适用于我国的日降雨数 据计算降雨侵蚀力的模型,该模型在我国各地区得到了广泛 的应用。史志华等<sup>[6]</sup>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,提出了适用于武汉地区的降雨侵蚀 力计算模型。陈正发等<sup>[7]</sup>基于昆明观测站 1951—2010 年逐 日雨量数据,对我国南方地区常用的5种降雨侵蚀力计算模 型在云南省的适用性进行了分析,筛选出适用于云南省的降 雨侵蚀力计算模型,并进一步研究了云南降雨侵蚀力的时空 分布特征。王超<sup>[8]</sup>以四川省 40 个气象站点 1971—2000 年 逐日雨量资料为基础,采用章文波等<sup>[2]</sup>基于日雨量资料建立 的降雨侵蚀力简易估算方法,分析了四川省降雨侵蚀力时空

分布特征。以上关于降雨侵蚀力的研究,在计算模型的选择 上大多数是直接引用其他学者的研究成果,并没有对模型的 地区适用性进行适宜性分析,或者已有的一些研究只适用于 某些特定的区域<sup>[7-8]</sup>,降雨侵蚀力的计算结果精确度很难满 足预测的要求。

2013年第一次全国水利普查水土保持公报显示,广西以 水力侵蚀(地表土壤或地表组成物质在降水、径流作用下被 剥离、冲刷、搬运和沉积的过程)为主(达 50 537 km<sup>2</sup>)。尽管 广西已有降雨侵蚀力时空变化特征方面的研究<sup>[9]</sup>,但这些研 究选用的降雨侵蚀力计算模型是直接引用其他学者的研究 成果,并没有对模型的地区适宜性进行深入评估,使得计算 结果存在很大的不确定性。广西喀斯特地貌分布广泛,喀斯 特区总面积达 9.6×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占全区土地面积的 42%<sup>[10-11]</sup>。 广西喀斯特与非喀斯特区尽管外界气候条件差异较小,但内 部结构(母岩、土岩结构、植被类型和分布、地形等)的不同使 得地表水与地下水路径、径流系数和相互转化机制等存在差 异,也导致喀斯特地区土壤侵蚀以地下漏失为主[11-12]。该研 究拟基于广西区 1961—2010 年 23 个均匀分布的气象站点的 逐日降雨量数据,分别探讨适用于广西喀斯特地区和非喀斯 特地区的降雨侵蚀力模型,旨在为广西区石漠化治理及水土 流失治理提供科技支撑。

#### 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 广西壮族自治区位于 104°26′~112°04′E、

中图分类号 S157.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2022)16-0156-05 doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.16.040

国家自然科学基金项目(41807012,42167038);广西自然科 基金项目 学基金项目(2018GXNSFBA281136,桂科 AD20238026)。 王升(1987--),男,湖北郧县人,讲师,博士,从事生态水文 作者简介 研究。 收稿日期 2021-10-26;修回日期 2021-11-16

20°54′~26°24′N,属亚热带季风气候区,全年气候温暖(年平均气温16~23℃),雨量丰富,年降雨量1250~2000 mm。每年雨量最多的时期主要在4—9月,雨季暴雨过于集中,较大的降雨强度容易造成严重的水力侵蚀。广西地质环境条件也比较特殊,使得广西水土流失较为严重,4—9月份降水量占全年降水量的70%~85%<sup>[9]</sup>,且广西区喀斯特地貌广布,占全区总面积的41%,连片分布在桂东北、桂西北、桂中和桂西南<sup>[13]</sup>。

**1.2 数据来源** 从中国气象科学数据共享服务网收集了广西 25 个气象站点逐日降雨量资料,因平果站和防城站 1961—2010 年的大部分年份的降雨数据不齐全,所以剔除了

这2个站点,选取了剩下23个国家基本雨量站1961—2010 年逐日降雨数据,从建站到现在数据记录较完整。由于广西 喀斯特地貌广布,且降雨侵蚀过程会受到地质、地貌等因素 的影响,所以将广西划分为喀斯特地区和非喀斯特地区来分 别探讨降雨侵蚀力简易计算模型的适宜性。如果气象站点 所在的市(县)喀斯特地貌面积是所在市(县)总面积的 30%,则可以认为该气象站点属于喀斯特站点<sup>[13]</sup>,否则就是 非喀斯特站点。23个气象站点中(图1),喀斯特站点有10 个(融安、桂林、凤山、河池、都安、柳州、那坡、靖西、来宾、龙 州),非喀斯特站点有13个(蒙山、贺州、百色、田东、桂平、梧 州、南宁、灵山、玉林、东兴、软州、北海、涠洲岛)。



图 1 广西气象站点分布 Fig.1 Distribution of meteorological stations in Guangxi

#### 1.3 研究方法

**1.3.1** 降雨侵蚀力计算模型介绍。将以下 5 种降雨侵蚀力 简易计算模型分别运用于广西喀斯特地区和非喀斯特地区, 并依据田刚等<sup>[14]</sup>的方法,将 5 种模型计算的降雨侵蚀力的平 均值作为基准值,然后与 5 种计算模型的值对比,最后对喀 斯特地区和非喀斯特地区模型的适宜性进行评价。

(1)模型A。章文波等<sup>[2]</sup>的日雨量模型:

$$R_i = \alpha \sum_{i=1}^{K} P_j^{\beta} \tag{1}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \tag{2}$$

$$\beta = 0.836 \ 3 + \frac{19.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}$$
(3)

式中, $R_i$  为第 i 个半月时段的降雨侵蚀力值[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)];K 为该半月时段内的天数; $P_j$  为半月时段内第j 天的侵蚀性降雨量,要求日雨量≥12 mm,否则以 0 计算; $\alpha$  与 $\beta$  为模型参数; $P_{d12}$ 为日雨量≥12 mm 的日平均雨量; $P_{y12}$  为日雨量≥12 mm 的年平均雨量。

(2)模型 B。CREAMS<sup>[7]</sup>日雨量模型:  
$$R=1.03P_i^{1.51}$$
 (4)

式中,*R*为降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]; $P_i$ 为第*i*天的 日雨量(mm),日侵蚀性降雨标准 $P_i \ge 12.7 \text{ mm}_{\circ}$ 

(3)模型C。吴素业<sup>[15]</sup>的月降雨量模型:

$$R_{\text{ff}} = \sum_{i=1}^{12} (0.012 \ 5P_i^{1.629 \ 5}) \tag{5}$$

式中, $R_{\mu}$ 为年降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]; $P_i$ 为 *i* 月 降雨总量(mm)。

(4)模型 D。郑海金等<sup>[16]</sup>的月雨量模型:

$$R_{4\pm} = \sum_{i=1}^{12} (0.312 P_i^{1.494\ 2}) \tag{6}$$

式中, $R_{\pm}$ 为年降雨侵蚀力[( $MJ \cdot mm$ )/( $hm^2 \cdot h$ )]; $P_i$ 为 i 月 降雨总量(mm)。

(5)模型 E。史东梅等<sup>[17-18]</sup>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:

$$R = 5.249 \left[ \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_i}{P} P_i \right) \right]^{1.205}$$
(7)

$$\Rightarrow F_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_i}{P} P_i \right), A = (\sum_{i=1}^{12} F_i)^{\beta^{-1}}, \alpha = 5.249, \beta = 1.205,$$

则可得出每个月的降雨侵蚀力:

$$R_i = \alpha \times A \times F_i = 5.249 \times A \times F_i \tag{8}$$

式中, $P_i$ 为月降雨量(mm); $R_i$ 为第 i个月的降雨侵蚀力 [(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]。

**1.3.2** 模型适宜性评价方法。选用模型有效系数(*E<sub>f</sub>*)和相对偏差系数(*E<sub>r</sub>*)来评价 5 种降雨侵蚀力模型在广西喀斯特地区和非喀斯特地区的适用性<sup>[7,15]</sup>。

有效系数 $(E_f)$ 的计算公式如下:

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

式中, $R_{obs}$ 为模型计算的年降雨侵蚀力, $R_{oal}$ 为基准年降雨侵蚀力, $R_{oal}$ 为基准年降雨侵蚀力, $R_{oal}$ 为基准年降雨侵蚀力的平均值。该研究中,参照 田刚等<sup>[14]</sup>的研究方法,将5个模型计算得到的年降雨侵蚀力 的平均值作为该年度的基准年降雨侵蚀力,将5个模型计算 得到的多年(50年)降雨侵蚀力平均值作为基准年降雨侵蚀 力的平均值。 $E_f$ 越接近1,表示模型计算结果与基准值越接 近,模型的精度越高。

相对偏差系数(E,)的计算公式如下:

$$E_r = \frac{|R_{\rm obsn} - R_{\rm oalm}|}{R_{\rm oalm}}$$
(10)

式中, R<sub>obsn</sub>为模型计算的多年平均降雨侵蚀力; R<sub>oalm</sub>为基准年降雨侵蚀力的平均值。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 典型站点降雨侵蚀力逐年特征

2.1.1 喀斯特地区。基于喀斯特地区 10 个观测站 1961—2010 年逐日降雨数据,采用 5 种降雨侵蚀力计算模型,分别计算得到各站 1961—2010 年降雨侵蚀力指标。以河池站和桂林站为例,对喀斯特地区的降雨侵蚀力模型计算结果进行比较。

从河池站不同模型计算的降雨侵蚀力(*R*值)逐年变化 (图 2)可以看出,年降雨侵蚀力整体上呈波动变化,5种降雨 侵蚀力计算模型得到的降雨侵蚀力都是随着降雨量的增多 而呈现出增大的趋势,反之亦然;不同降雨侵蚀力计算模型 得到的年*R*值存在一定的差异,表现为模型 A[16 805.8 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 B[7 637.2(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]> 模型 D[6 229.3(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 C[5 209.5 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 E[3 364.7(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)], 其变化趋势一致,未出现交叉现象。另外对于河池站,基于 日降雨量的降雨侵蚀力模型(A和B)计算的*R*值均大于基 于月降雨量的模型(C、D和E)的结果。

图 3 给出了桂林站 5 种模型计算的 R 值逐年变化。与 河池站类似,不同模型得到的逐年 R 值也呈波动变化,且随 着降雨量的增多而增大,反之亦然。不同降雨侵蚀力计算模 型得 到 的 年 R 值 也 存 在 较 大 差 异,表 现 为 模 型 B [74 604.7(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 A[24 069.2(MJ·mm)/ (hm<sup>2</sup>·h)]>模型 D[10 251.5(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 C [9 038.9(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 E[5 065.5(MJ·mm)/ (hm<sup>2</sup>·h)],各模型计算的 R 值变化趋势一致。对于桂林站, 也表现为基于日降雨量的降雨侵蚀力模型(A 和 B)计算的 R 值均大于基于月降雨量模型(C、D 和 E)的结果。

2.1.2 非喀斯特地区。基于广西非喀斯特地区 13 个观测站



图 2 1961—2010 年河池站不同降雨侵蚀力计算模型 R 值时间序 列分布

Fig.2 Time series distribution of *R* value of different rainfall erosivity calculation models at Hechi Station from 1961 to 2010



图 3 1961—2010 年桂林观测站不同降雨侵蚀力计算模型 R 值时 间序列分布

Fig.3 Time series distribution of *R* value of different rainfall erosivity calculation models at Guilin Station from 1961 to 2010

1961—2010 年逐日降雨数据,采用 5 种降雨侵蚀力计算模型 分别计算 R 值,得出 13 个观测站不同降雨侵蚀力模型计算 的 R 值在 1961—2010 年的变化趋势。以非喀斯特地区降雨 较多的北海站(年降雨量为 1 670 mm)和降雨较少的田东站 (年降雨量为 1 167 mm)为例,对非喀斯特地区的降雨侵蚀力 模型计算结果进行比较。

从 1961—2010 年田东观测站不同降雨侵蚀力计算模型 *R* 值时间序列逐年分布(图 4)可以看出,不同降雨侵蚀力计算模 型得到的年 *R* 值表现为模型 A[6 894.9(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]> 模型 B[6 596.0(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 D[4 978.6 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 C[4 089.8(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模 型 E(2 961.8(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)];除模型 E 计算的 *R* 值存在 一定的不规则波动外,其余模型计算的 R 值均表现出一致的 变化趋势,表明模型 E 对不同月份降雨量大小较为敏感。在田 东站,也表现出基于日降雨量的降雨侵蚀力模型(A 和 B)计算 的 *R* 值均大于基于月降雨量模型(C,D 和 E)的结果。

图 5 显示了 1961—2010 年北海观测站不同降雨侵蚀力 计算模型 R 值时间序列逐年分布图。北海站降雨量比田东 站年均降雨量多 503 mm,不同模型获得的北海站 R 值在 2 578.1~2 7609.4 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),而田东站大多则是 1 658.1~10 056.1 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h),北海站 R 值远大于田 东站。不同降雨侵蚀力计算模型得到的年 R 值表现为模型 B [13 369.3 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)])>模型 A[10 893.2(MJ·mm)/ (hm<sup>2</sup>·h)]>模型 D[9 105.8(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 C (8 100.3 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)]>模型 E[5 710.2(MJ·mm)/ (hm<sup>2</sup>·h)],同样表现出基于日降雨量的降雨侵蚀力模型(A 和B)计算的R值均大于基于月降雨量模型(C、D和E)的





Fig.4 Time series distribution of *R* value of different rainfall erosivity calculation models at Tiandong observation station from 1961 to 2010



Fig.5 Time series distribution of *R* value of different rainfall erosivity calculation models at Beihai observation station from 1961 to 2010

area

结果。

综上所述,典型4个站点分别用5种降雨侵蚀力模型计 算的R值在喀斯特地区的离散程度远大于非喀斯特地区,表 明不同模型计算的降雨侵蚀力差异较大,也进一步说明在选 用降雨侵蚀力模型时,须对计算模型进行地区适宜性分析。

#### 2.2 不同降雨侵蚀力模型适宜性分析

喀斯特地区。不同降雨侵蚀力模型在喀斯特地区站 2.2.1 点的模型有效系数( $E_{\ell}$ )和相对偏差( $E_{\ell}$ )如表1所示。喀斯 特地区的10个观测站中,有6个站点(融安、凤山、河池、都 安、来宾、龙州)模型 B 的 E<sub>f</sub> 在 5 种模型中最大, 且均在0.89 以上接近1,E,均低于0.05接近0,说明模型B精度在这5种 模型中最高。其次精度较高的为模型 D,其 E<sub>f</sub> 均大于 0,且 E, 相对较小,在日降雨量资料缺失仅有月降雨量时,喀斯特 地区降雨侵蚀力计算可采用模型 D。模型 A 计算结果明显 偏大,在昆明地区的研究也表明模型 A(章文波等模型)计算 得到的降雨侵蚀力偏大<sup>[4]</sup>。模型 E(史东梅等模型)的计算 结果 E<sub>t</sub> 较低,且得到的年 R 值小于其余几个模型,这可能是 由于该模型基于重庆地区的降雨特征及标准径流小区监测 资料建立,主要适用于重庆地区<sup>[10-11]</sup>。综上所述,广西喀斯 特地区降雨侵蚀力计算,有日降雨资料时宜采用模型 B,仅 有月降雨资料时宜采用模型 D。

2.2.2 非喀斯特地区。从不同降雨侵蚀力模型在广西非喀 斯特地区站点的模型 *E<sub>f</sub>* 和 *E<sub>r</sub>*(表 2)可以看出,在非喀斯特地 区选取的 13 个观测站中,除了蒙山,其余 12 个观测站均为 模型 D 的 *E<sub>f</sub>*(平均值为 0.967)高于其余 4 个模型,*E<sub>r</sub>*(平均值 为 0.033)均低于 0.11,且在蒙山站模型 C 与模型 D 计算的 *R* 值差异较小(*E<sub>f</sub>* 分别为 0.897 和 0.840,*E<sub>r</sub>* 分别为 0.059 和 0.102),说明模型 D 在衡量广西非喀斯特地区降雨侵蚀力时效 果较好。另外,模型 E 在 4 个站点(贺州、田东、桂平和玉林)的 *E<sub>f</sub>* 为负值,其他模型的 *E<sub>f</sub>* 均为正值,表明基于重庆地区降雨特 征及实测侵蚀数据建立的模型 E 不适用于广西地区。

#### 3 结论

(1)在广西地区,基于日降雨资料的降雨侵蚀力模型 (章文波等和CREAMS模型)计算结果大于基于月降雨资料

Table 1 Effective coefficient  $(E_f)$  and relative deviation  $(E_r)$  of different rainfall erosivity models for different observation stations in the karst

观测站 Observation station	模型 A Model A		模型 B Model B		模型 C Model C		模型 D Model D		模型 E Model E	
	$E_{f}$	$E_r$								
融安 Rong'an	0.066	1.159	0.892	0.033	0.650	0.365	0.793	0.227	0.069	0.544
桂林 Guilin	0.763	0.022	0.043	1.032	0.061	0.633	0.073	0.583	-0.036	0.794
凤山 Fengshan	0.130	1.058	0.937	0.019	0.285	0.313	0.534	0.196	-0.024	0.531
河池 Hechi	0.144	1.122	0.961	0.021	0.358	0.329	0.616	0.203	-0.018	0.569
都安 Du'an	0.122	0.989	0.916	0.028	0.358	0.293	0.580	0.187	0.055	0.536
柳州 Liuzhou	-0.083	0.945	-0.080	0.974	0.084	1.204	0.112	0.773	0.249	0.488
那坡 Napo	-0.053	0.925	-0.050	0.968	0.086	1.422	0.119	0.988	-0.016	0.517
靖西 Jingxi	-0.060	0.895	-0.055	0.952	0.098	1.381	0.131	0.983	-0.027	0.518
来宾 Laibin	0.143	1.109	0.916	0.002	0.274	0.346	0.533	0.216	-0.015	0.545
龙州 Longzhou	0.112	1.159	0.918	0.033	0.201	0.365	0.447	0.227	0.001	0.544

模型(吴素业、郑海金等和史东梅等模型)的结果。

(2)在喀斯特地区的 10 个站点中,有 6 个站点模型 B (CREAMS 模型)的稳定性较好,具有较大的有效系数和较小

的相对偏差,表明基于日降雨量的模型 B 在喀斯特地区较为 适用;当仅有月降雨量资料时,宜采用模型 D(郑海金等 模型)。

### 表 2 非喀斯特地区各观测站不同降雨侵蚀力模型有效系数(E<sub>f</sub>)和相对偏差(E<sub>r</sub>)

Table 2 Effective coefficient  $(E_f)$  and relative deviation  $(E_r)$  of different rainfall erosivity models for different observation stations in the karst area

观测站	模型 A Model A		模型 B Model B		模型 C Model C		模型 D Model D		模型 E Model E	
Observation station	$E_{f}$	$E_r$								
	0.424	0.328	0.577	0.060	0.897	0.059	0.840	0.102	0.007	0.430
贺州 Hezhou	0.543	0.285	0.722	0.174	0.547	0.042	0.954	0.001	-0.046	0.501
百色 Baise	0.462	0.356	0.622	0.280	0.591	0.212	0.968	0.035	0.085	0.388
田东 Tiandong	0.325	0.351	0.445	0.292	0.449	0.199	0.964	0.025	-0.011	0.420
桂平 Guiping	0.529	0.288	0.611	0.256	0.839	0.113	0.958	0.046	-0.040	0.477
梧州 Wuzhou	0.406	0.329	0.599	0.235	0.624	0.153	0.960	0.032	0.014	0.443
南宁 Nanning	0.226	0.462	0.610	0.237	0.576	0.208	0.964	0.041	0.031	0.450
灵山 Lingshan	0.618	0.250	0.649	0.294	0.870	0.126	0.987	0.018	0.063	0.436
玉林 Yulin	0.551	0.292	0.638	0.272	0.829	0.131	0.981	0.027	-0.011	0.460
东兴 Dongxing	0.800	0.081	0.481	0.374	0.963	0.028	0.966	0.043	0.034	0.470
钦州 Qinzhou	0.620	0.148	0.440	0.331	0.909	0.075	0.971	0.027	0.078	0.431
北海 Beihai	0.730	0.155	0.511	0.417	0.840	0.142	0.975	0.035	0.135	0.395
涠洲岛 Weizhou Island	0.690	0.219	0.515	0.435	0.755	0.195	0.953	0.071	0.187	0.388

(3)在非喀斯特地区的 13 个站点中,有 12 个站点模型 D(郑海金等模型)稳定性较好,具有较大的有效系数(平均 值为 0.967)和较小的相对偏差(平均值为 0.033),表明基于 月降雨量的郑海金等模型在非喀斯特地区较为适用。

#### 参考文献

- BEGUERÍA S, SERRANO-NOTIVOLI R, TOMAS-BURGUERA M, et al. Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts [J]. Science of the total environment, 2018, 637/638:359–373.
- [2] 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.
- [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] 马良,姜广辉,左长清,等江西省50余年来降雨侵蚀力变化的时空分 布特征[J].农业工程学报,2009,25(10):61-68.
- [5] 何绍浪,郭小君,李凤英,等.中国南方地区近60a 来降雨量与降雨侵蚀 力时空变化研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1406-1416.
- [6] 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.
- [7] 陈正发,史东梅,何伟,等.云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究 [J].农业机械学报,2017,48(10):209-219.
- [8] 王超.四川省降雨侵蚀力时空分布特征分析[J].地理空间信息,2017,15
  (2):111-114.
- [9] 谢坤坚,卢远,蔡卓杰,等.广西降雨侵蚀力时空变化分析[J].中国水土

## (上接第155页)

- [16] 艾超,孙静文,王秀斌,等.植物根际沉积与土壤微生物关系研究进展 [J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1343-1351.
- [17] DAVID C P C, MARIA Y Y S, SIRINGAN F P, et al.Coastal pollution due to increasing nutrient flux in aquaculture sites[J].Environmental geology, 2009,58(2):447-454.
- [18] BRUNE D E, SCHWARTZ G, EVERSOLE A G, et al. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems [J]. Aquacultural

保持,2016(12):50-53.

- [10] 王升,陈洪松,付智勇,等.基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度 估测[J].土壤学报,2015,52(5):1024-1030.
- [11] WANG S, YAN Y, FU Z Y, et al. Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region[J/OL].Journal of hydrology, 2021,605[2021-04-27].https://doi. org/10.1016/j.jhydrol.2021.127370.
- [12] WANG S,FU Z Y,CHEN H S,et al.Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems; Implications of rainfall simulation experiments on karst slope[J/OL].Journal of hydrology,2020, 580 [ 2021 - 04 - 27 ]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019. 124370.
- [13] 吴丽萍,陈洪松,连晋姣,等.喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析:以广西壮族自治区为例[J].中国生态农业学报,2017, 25(10):1508-1517.
- [14] 田刚,梁音,陈效民,等.几种降雨侵蚀力模型在潋水河流域的对比研究[J].土壤学报,2010,47(1):7-12.
- [15] 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.
- [16] 郑海金,方少文,杨洁,等.赣北第四纪红壤坡地降雨侵蚀力的计算与分析[J].中国水土保持科学,2010,8(2):36-40.
- [17] 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.
- [18] 史东梅,卢喜平,蒋光毅,紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):116-122.

engineering, 2003, 28(1/2):65-86.

- [19] 钟哲科,高智慧植物对环境的修复机理及其应用前景[J].世界林业研究,2001,14(3):23-28.
- [20] 甘新华,林清.沉水植物对受污染水体的修复机理及应用前景研究 [J].环境科技,2008,21(6):72-75.
- [21] GUTIERREZ-WING M T, MALONE R F.Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications[J]. Aquacultural engineering, 2006, 34(3):163–171.