

# 三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力变化趋势及突变分析

汪言在<sup>1</sup>, 苟诗薇<sup>2</sup>, 张述林<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:**三峡库区水土流失是社会关注的焦点问题,采用 Mann—Kendall 非参数检验法对三峡库区(重庆段)1955—2010 年降雨侵蚀力变化趋势及突变进行分析,获取 56 a 来研究区降雨侵蚀力时间变化特征。结果表明:(1) 1955—2010 年,研究区年降雨侵蚀力增大趋势不显著( $\text{sig}=0.05$ )。季节降雨侵蚀力变化上,仅夏季降雨侵蚀力显著增大,需加强夏季水土流失治理。(2) 1955—2010 年,研究区年降雨侵蚀力突变开始于 1967 年,在 1980s—1990s 显著增大( $\text{sig}=0.05$ )。季节降雨侵蚀力突变结果表明,春、秋季降雨侵蚀力突变开始于 1950s 末,1970s—1980s 显著增大( $\text{sig}=0.05$ );夏季降雨侵蚀力突变开始于 1979 年,在 2000 年后显著增大( $\text{sig}=0.05$ ),近 10 a 来夏季降雨侵蚀潜能明显增强。(3) 沿长江干流的各气象站点中,仅涪陵站年降雨侵蚀力增大显著( $\text{sig}=0.1$ )。奉节、万县两站春、秋季节降雨侵蚀力变化趋势与沙坪坝、涪陵两站存在差异;奉节站季节降雨侵蚀力突变与其他 3 个站点差别较大,地形是影响研究区降雨侵蚀变化空间分异的重要因素,需加强奉节、万县的水土流失防治工作。

**关键词:**三峡库区(重庆段); 降雨侵蚀力; Mann—Kendall 非参数检验方法

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0001-06

## Analysis of Rainfall Erosivity Trend and Abrupt Changes in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)

WANG Yan-zai<sup>1</sup>, GOU Shi-wei<sup>2</sup>, ZHANG Shu-lin<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This paper used the non-parametric Mann—Kendall statistical test to deal with the analysis of rainfall erosivity trend and abrupt change(1955—2010) in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section). The results summarized as: (1) from 1955 to 2010, annual rainfall erosivity in the study area did not change significantly, compared to 1975—1994, there was little change in annual rainfall erosivity potential of 1994—2010, but summer rainfall erosivity increased significantly, we should pay attention to strengthening soil erosion control in the summer; (2) the abrupt change of annual rainfall erosivity mostly started in 1967, and the abrupt change of spring and fall rainfall erosivity started in the end of 1950s; (3) compared to the rainfall erosivity trend, there was different between Fengjie, Wanxian station and Fuling, Shapingba station, but compared to the rainfall erosivity abrupt changes, there was difference between Fengjie station and other three stations.

**Key words:** Three Gorges Reservoir Area (Chongqing section); rainfall erosivity; non-parametric Mann—Kendall statistical test

水土流失导致土壤退化、土地生产力降低,农业减产,影响全球生物化学循环乃至全球气候变化<sup>[1-4]</sup>。降水作为水土流失的决定性因素<sup>[5]</sup>,其年际变化是气候变化的重要信号<sup>[6]</sup>,气候微小变化引起极端降水发生<sup>[7]</sup>,进而导致水蚀事件增多<sup>[6]</sup>,增大农业生产的不稳定性<sup>[8]</sup>,对粮食安全构成威胁<sup>[9]</sup>。研究者常使用降

雨侵蚀力指标表征水蚀潜能<sup>[10]</sup>。该指标与降雨分布、降雨强度及雨量之间有密切关系,是反映水土流失对全球气候变化响应的最佳参数<sup>[11-12]</sup>。降雨侵蚀力年际变化分析对评价水土流失潜在危险性、以及对气候变化具有重要意义<sup>[6]</sup>。

三峡库区是我国水土流失最严重的地区之

收稿日期:2011-10-08

修回日期:2011-11-14

资助项目:重庆市教委科技项目(KJ110608);重庆师范大学校级青年基金项目(10XLQ02)

作者简介:汪言在(1983—),男,山东济宁人,博士,讲师,研究方向:水土流失。E-mail:wyz2003qu@gmail.com

—<sup>[13]</sup>,其表现为水土流失面积广,侵蚀强度大<sup>[14-15]</sup>,是三峡水库的主要沙源地<sup>[16]</sup>。水土流失对三峡库区农业生产<sup>[13]</sup>及长江中下游生态环境均有不同程度影响<sup>[17-19]</sup>。分析和评价三峡库区(重庆段)降雨侵蚀变化具有重要科学和实践意义。目前对该区域降雨侵蚀力时间变化的研究少见于文献,方法上也多以常规检验方法为主。本文选取三峡库区(重庆段)沿江四个气象站点 1955—2010 年共计 56 a 的日降水数据,应用 Mann—Kendall 非参数检验方法分析三峡库区降雨侵蚀力趋势变化及突变特征,为三峡库区(重庆段)水土流失防治提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

三峡库区(重庆段)地理范围为 28°31′—31°44′N,105°49′—110°12′E,约占整个三峡库区面积的 80%。地跨大巴山褶皱带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元;地貌以山地、丘陵为主;属亚热带季风性湿润气候区,多年平均降雨量约为 1 150 mm,土壤类型主要有紫色土、黄壤、水稻土等。研究区水土流失严重,2005 年水土流失面积占全区总面积的 48.6%<sup>[14]</sup>。

### 1.2 数据获取

数据来自国家气象局,选用气象站点奉节站(站点号:57348),万县站(站点号:57432),涪陵站(站点号:57522)和沙坪坝站(站点号:57516)。涪陵降水数据时长为 1955 年 1 月 1 日—2008 年 12 月 31 日,其余站点数据时长为 1955 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日。气象站点日降水数据有多种记录形式,根据研究需要,并参考相关研究<sup>[20]</sup>,本文仅考虑降雨形成的降水量。

### 1.3 数据处理与分析

依据研究目标,首先计算年、季降雨侵蚀力值,然后就逐年降雨侵蚀力进行趋势分析及突变检验。具体如下:

(1) 年、季降雨侵蚀力计算。使用日雨量简易算法计算逐年降雨侵蚀力<sup>[21]</sup>。

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

式中: $M$ ——某半月时段的降雨侵蚀力(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h); $P_j$ ——半月时段内第  $j$  日侵蚀性降雨(侵蚀性降雨标准 $\geq 12$  mm); $k$ ——半月时段内的天数; $\alpha, \beta$ ——简易模型参数,参数计算公式如下:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中: $P_{d12}$ ——日雨量 $\geq 12$  mm 的日均雨量(mm); $P_{y12}$ ——日雨量 $\geq 12$  mm 的年均雨量(mm)。上述日雨量算法可直接估算季节及逐年降雨侵蚀力,该算法在我国南方地区具有较高的预测精度。计算奉节、万县、涪陵和沙坪坝气象站逐年降雨侵蚀力,取四个站点相同年份降雨侵蚀力平均值,定义为三峡库区(重庆段)逐年降雨侵蚀力。

(2) 趋势分析及显著性检验。对于降雨侵蚀力序列  $x_1, x_2, \dots, x_{56}$ ,其变化趋势可用 Kendall 倾斜度  $\beta'$  表示,即单位时间内的变化量<sup>[22]</sup>,具体计算公式如下:

$$\beta' = \text{median}\left(\frac{x_k - x_j}{k - j}\right), \forall j < k \quad (4)$$

式中: $x_j, x_k$ —— $j, k$  年的相应测量值( $56 \geq k > j \geq 1$ )。若  $\beta' > 0$ ,表示降雨侵蚀力在该时段呈上升趋势;若  $\beta' < 0$ ,表示呈下降趋势。

对于变化趋势的显著性,采用 Mann—Kendall 非参数统计方法检验。该方法优点在于不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,且计算方便。以往常用于降水时间变化分析<sup>[22-23]</sup>。具体方法如下<sup>[24-25]</sup>:

对于降雨侵蚀力序列  $x_1, x_2, \dots, x_{56}$ , Mann—Kendall 法首先定义统计量  $S$ :

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (5)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_j, x_k$ —— $j, k$  年的相应测量值( $56 \geq k > j \geq 1$ )。计算统计量  $Z$  值,进行统计检验。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Z$ ——符合正态分布的统计量; $\text{var}(S)$ ——方差。给定  $\alpha$  置信水平,若  $|Z| \geq Z_{1-\alpha}$ ,则拒绝原假设,即在  $\alpha$  置信水平上,降雨侵蚀力序列存在明显上升或下降趋势。由此来判断降雨侵蚀力时间变化趋势是否显著。

(3) 突变检验。突变检验主要检验时间序列的不连续性<sup>[26]</sup>,本文分析降雨侵蚀力序列的均值突变。突变检验的方法有多种<sup>[27]</sup>。本文采用 Sequential Mann—Kendall 检验方法<sup>[23,28]</sup>。

对于降雨侵蚀力序列  $x_1, x_2, \dots, x_{56}$ ,构造秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, 2 \leq k \leq N \quad (8)$$

$$\text{其中 } r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (9)$$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, 56 \quad (10)$$

式中:  $E(s_k)$ ,  $\text{var}(s_k)$  ——  $s_k$  的均值和方差, 由以下公式计算:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, 56 \quad (11)$$

按时间序列  $x$  逆序  $x_{56}, x_{55}, \dots, x_1$ , 重复上述(8)~(10)过程, 同时使  $UB_k = -UF_k$  ( $k = 56, 55, \dots, 1$ ), 若  $UB_k$  和  $UF_k$  两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻是降雨侵蚀力突变开始的年份<sup>[26]</sup>。根据上述方法, 确定降雨侵蚀力突变显著的年份及突变开始的年份。

## 2 结果与分析

### 2.1 多年平均降雨侵蚀力特征

三峡库区(重庆段)1955—2010年降雨侵蚀力平均值为  $5\,589 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ (表1), 属中等强度侵蚀<sup>[29]</sup>。春、夏、秋季节降雨侵蚀力分别占全年降雨侵蚀力的 24%、54%和 21%。对于沿江各气象站点年降雨侵蚀力, 多年平均值范围为  $4\,688.24 \sim 6\,567.17 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ , 其中万县站年降雨侵蚀力多年平均值最大, 涪陵站最小。夏季是三峡库区(重庆段)降雨侵蚀的主要季节(又以 6 月、7 月比例最大), 其次为春、秋两季。夏季降雨侵蚀力占全年降雨侵蚀力比例范围为 50%~61%, 其中奉节站比例最小(50%), 沙坪坝最大(61%), 说明不同气象站点降雨侵蚀力年内分布存在较大差异。本文分析三峡库区(重庆段)年、季降雨侵蚀力变化的同时, 也对各气象站点年、季降雨侵蚀力变化特征进行初步探讨, 以获取研究区降雨侵蚀力变化的空间异同。

表 1 三峡库区(重庆段)1955—2010年降雨侵蚀力统计特征

时间	平均值	极差	标准差	偏度	峰度
全年	5589.0	6006.0	1335.0	0.51	0.32
春季(3—5月)	1323.2	2329.7	446.8	0.25	0.18
夏季(6—8月)	3031.0	5287.0	1149.0	1.08	1.50
秋季(9—11月)	1185.8	2321.4	500.5	1.07	1.30
冬季(12—2月)	49.1	250.36	48.87	1.80	4.72

由极差和标准差看(表1), 降雨侵蚀力年际差异较大。年与季节降雨侵蚀力时间序列均为正偏; 年降

雨侵蚀力与春季降雨侵蚀力偏度与峰度值偏小, 服从正态分布, 其余季节降雨侵蚀力不服从正态分布。

### 2.2 降雨侵蚀力变化趋势分析

2.2.1 逐年降雨侵蚀力变化趋势 三峡库区(重庆段)年降雨侵蚀力(1955—2010年)呈增大趋势(Kendall 倾斜度  $\beta'$  值为 15.19), 但在 0.05 显著水平下, 该变化趋势不显著(表2)。研究表明三峡库区近 50 a 来降水量线性变化也不显著<sup>[30-31]</sup>, 本文使用 Mann—Kendall 非参数检验方法对年降雨侵蚀变化检验结果与降水量变化一致, 说明年降雨侵蚀力变化除与强降水变化有关, 还与降水平均变化有关。沿江气象站点年降雨侵蚀力时间序列 Kendall 倾斜度  $\beta'$  值均为正值(表2), 说明气象站点年降雨侵蚀力也呈增大趋势。其中涪陵站 Kendall 倾斜度  $\beta'$  值最大(22.21), 万县最小(0.07), 即研究区内各站点年降雨侵蚀力变化存在空间分异。但趋势显著结果表明, 在 0.1 显著性水平下, 仅有涪陵站降雨侵蚀力增大趋势显著。

表 2 年降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度  $\beta'$

项目	三峡库区		各气象站点		
	(重庆段)	奉节	万县	涪陵	沙坪坝
Kendall 倾斜度 $\beta'$	15.19	9.10	0.07	22.21*	6.12

注: \*表示在 0.1 显著性水平上显著。

2.2.2 季节降雨侵蚀力变化趋势 三峡库区(重庆段)季节降雨侵蚀力(1955—2010年)时间变化趋势结果显示(表3), 除秋季降雨侵蚀力减小外, 其他三个季节均呈增大趋势。其中夏季降雨侵蚀力增大程度最大, Kendall 倾斜度为 17.85, 且通过 0.05 显著水平检验, 说明三峡库区(重庆段)夏季降雨侵蚀力 56 a 来增大显著。研究认为, 重庆市近 50 a 来夏季(汛期)降水有增加趋势<sup>[32-33]</sup>, 秋季降水呈减小趋势<sup>[34]</sup>, 这与本文季节降雨侵蚀力的变化趋势近似, 只是汛期和秋季降水变化未通过显著性检验, 说明降雨侵蚀力近 56 a 来的变化是气候变化的反映, 但其对气候变化响应的显著程度明显偏强。

气象站点季节降雨侵蚀力变化趋势结果显示(表3), 对于季节降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度的数值大小, 奉节、涪陵两站春、夏季节数值明显偏大; 万县比其它三个站点明显偏小。春季降雨侵蚀力变化趋势显示, 涪陵和沙坪坝 Kendall 倾斜度均为正值, 且通过 0.05 显著水平检验, 表明近 56 a 来, 这两个站点降雨侵蚀力呈显著增大趋势; 奉节、万县两站点 Kendall 倾斜度均为负值, 且未通过显著水平检验 ( $\text{sig} = 0.05$ )。夏季降雨侵蚀力变化趋势为, 奉节站降雨侵蚀力显著增大 ( $\text{sig} = 0.05$ ), 涪陵站也显著增大 ( $\text{sig} = 0.1$ )。对于秋季降雨侵蚀力变化, 涪陵和沙坪坝 Kendall 倾斜度均为负值, 且仅沙坪坝站变化显著

( $\text{sig}=0.1$ );奉节、万县两站点 Kendall 倾斜度则为正值,且变化不显著。各气象站点冬季降雨侵蚀力变化均不显著。总体来看,奉节、涪陵和沙坪坝三个站点夏季降雨侵蚀力增大是导致整个研究区夏季降雨侵蚀显著增强的主要原因。奉节、万县两站春、秋季节降雨侵蚀力变化与涪陵、沙坪坝两站差异较大,表现为倾斜度正负值相反,这与研究区地形有一定关系,沙坪坝、涪陵海拔较低,地势平缓,万县、奉节地形复杂,坡度较大,强降水引起的降雨侵蚀变化较复杂。

表 3 季降雨侵蚀力时间序列 Kendall 倾斜度  $\beta'$

Kendall 倾 斜度 $\beta'$	三峡库区 (重庆段)	气象站点			
		奉节	万县	涪陵	沙坪坝
春季	0.51	-7.76	-4.20	11.30**	8.54**
夏季	17.85**	20.53**	-0.28	14.14*	9.62
秋季	-1.30	0.13	3.54	-0.79	-8.21*
冬季	0.16	0	0	0	0

注: \* 表示在 0.1 显著水平上显著, \*\* 表示在 0.05 显著水平上显著

以 20 a 为尺度,分析三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力年代际变化(表 4)。三峡工程动工(1994 年)以来,三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力多年平均值(1995—2010 年)相比 1955—1974 年增大幅度为 467.08 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a),但与 1975—1994 年多年平均值相比增大幅度仅为 17.10 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。季节降雨侵蚀力变化结果显示(表 4),1995—2010 年春、秋季降雨侵蚀力多年平均值相

比 1955—1974 年、1975—1994 年均略有减小;1995—2010 年夏季降雨侵蚀力则明显增大,相比 1955—1974 年增大幅度达 740.78 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a),相比 1975—1994 年增大幅度达到 291.08 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

由此可见,夏季降雨侵蚀力多年平均值增大是研究区年降雨侵蚀力增大的主要原因。这也说明,夏季(6—8 月)降雨对全年水土流失潜在危险贡献最大,1994 年以来,夏季降雨侵蚀力呈增大趋势,夏季水土流失防治亟待加强。

表 4 三峡库区(重庆段)降雨侵蚀力年代际变化

时段	春季	夏季	秋季	冬季	全年
1955—1974	1303.05	2659.03	1279.05	54.09	5295.22
1975—1994	1396.58	3108.73	1197.30	42.58	5745.19
1995—2010	1256.55	3399.81	1054.93	51.00	5762.29

注:降雨侵蚀力单位为(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

### 2.3 逐年降雨侵蚀力突变分析

2.3.1 年降雨侵蚀力突变分析 根据 Mann—Kendall 突变检验定义<sup>[26]</sup>,时间序列均值突变开始年份应为 UF—UB 曲线交点对应的年份,由图 1 可知,三峡库区(重庆段)年降雨侵蚀力突变出现的年份为 1967 年,即 1967 年后降雨侵蚀力开始增大,至 1980s—1990s UF 值超过临界值,表明该时间段降雨侵蚀力增大显著( $\text{sig}=0.05$ )。

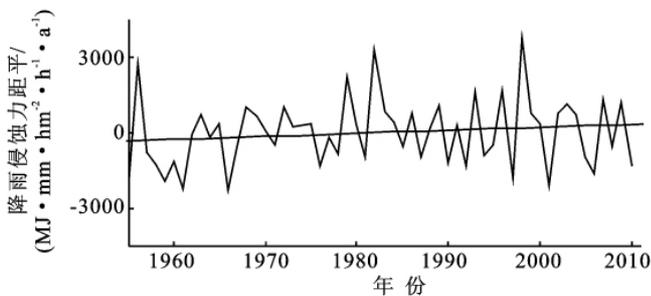
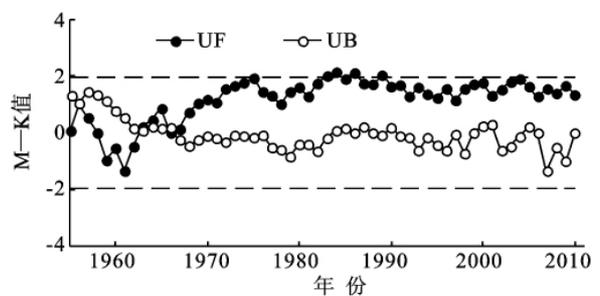


图 1 研究区年降雨侵蚀力突变分析



2.3.2 季降雨侵蚀力突变分析 三峡库区(重庆段)季节降雨侵蚀力突变结果显示(图 2),春季降雨侵蚀力突变开始年为 1955 年,在 1970s—1980s 中期增大显著( $\text{sig}=0.05$ )。夏季降雨侵蚀力突变开始年为 1979 年,在 2000 年后显著增大。秋季降雨侵蚀力突变开始年为 1957 年,在 1970s—1980s 显著增大。冬季降雨侵蚀力 UF—UB 曲线均未超过临界线,说明冬季降雨侵蚀力未出现显著变化。总体来看,春、秋季降雨侵蚀力突变开始年份在 1950s 末,在 1970s—1980s 显著增大;夏季降雨侵蚀力突变开始年在 1979 年,在 2000 年后显著增大,这一结果与上文 1995—2010 年降雨侵蚀力明显偏大的结果一致。

各气象站点降雨侵蚀力突变结果显示(表 5),年、季节降雨侵蚀力时间序列突变开始时间主要出现在 1960s。降雨侵蚀力时间序列突变开始后,多数降雨侵蚀力时间序列显著增大( $\text{sig}=0.05$ )。春、秋季节降雨侵蚀力显著变化的站点数量较多,春季为涪陵和沙坪坝,对应研究区坡度较缓的地区;秋季为奉节和万县,对应研究区坡度较大的地区。夏、冬季节降雨侵蚀力突变显著的站点只有奉节。该结果说明,地形对季节降雨侵蚀力变化具有明显影响,奉节在夏、秋和冬季均发生显著变化,与其他三个站点明显不同,主要与奉节海拔较高,坡度较大有关,也说明奉节地区水土流失防治工作难度更大。

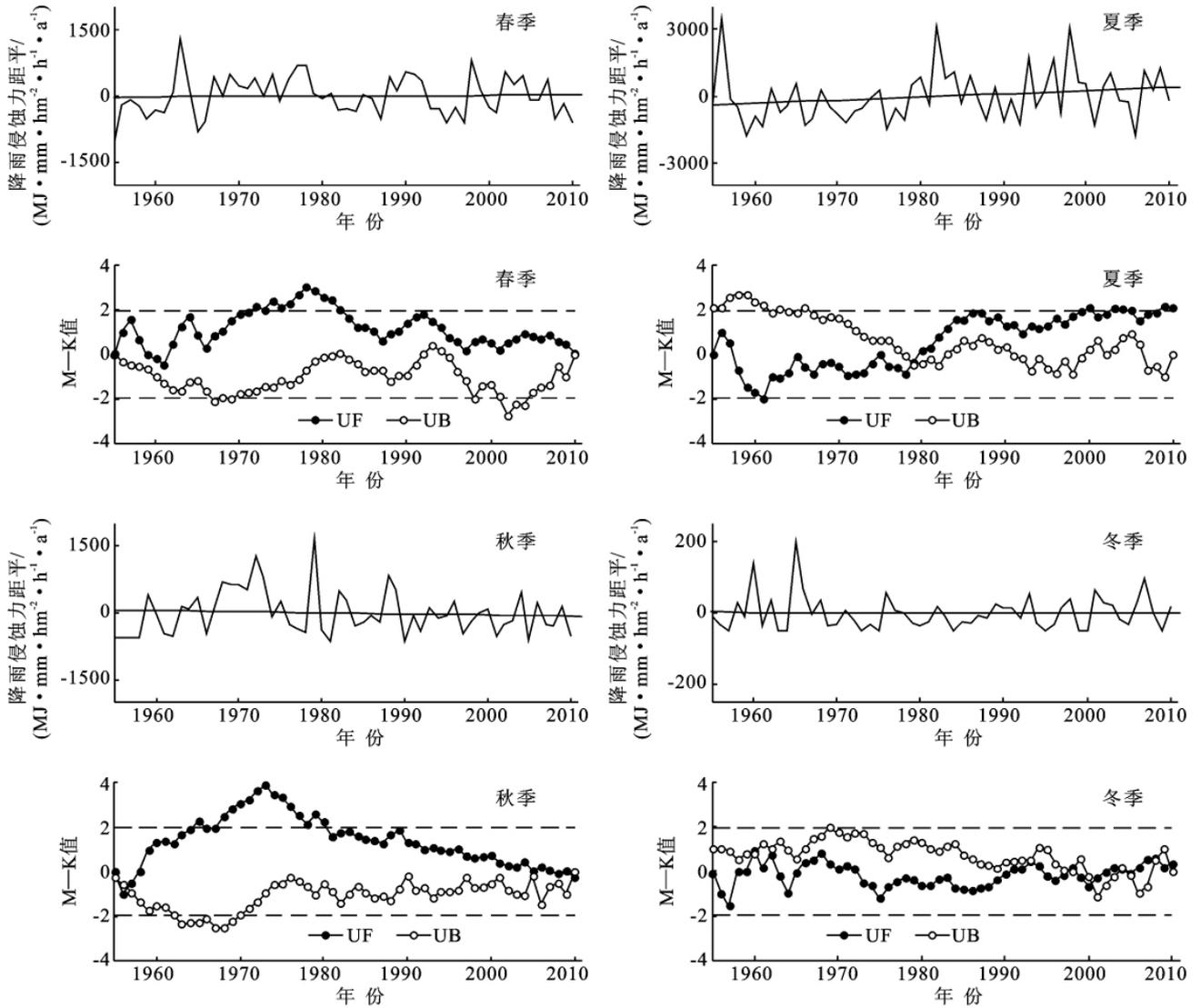


图 2 研究区季节降雨侵蚀力突变分析

表 5 三峡库区(重庆段)沿江气象站点降雨侵蚀力突变检验

突变检验	奉节		万县		涪陵		沙坪坝	
	开始年	趋势	开始年	趋势	开始年	趋势	开始年	趋势
春季	—	—	—	—	1968	↑	1962	↑
夏季	1978	↑	—	—	—	—	—	—
秋季	1958	↑	1958	↑	—	—	—	—
冬季	2004	↓	—	—	—	—	—	—
全年	1960	↑	1962	↑	1968	↑	—	—

注:—表示无显著变化(sig=0.05);↑出现显著上升趋势;↓出现显著下降趋势。

### 3 结论

(1) 三峡库区(重庆段)1955—2010 年降雨侵蚀力呈增大趋势,但趋势不显著(sig=0.05),1995—2010 年间年降雨侵蚀力多年平均值相比 1975—1994 年变化较小,而与 1955—1974 年平均值相差较大。研究区季节降雨侵蚀力变化趋势上,仅夏季降雨侵蚀力显著增大(sig=0.05),夏季水土流失防治工作需进一步加强。

(2) 三峡库区(重庆段)年降雨侵蚀力突变开始

时间为 1967 年;春、秋季降雨侵蚀力突变开始年多为 1950s 末,并在 1970s—1980s 显著增大;夏季降雨侵蚀力突变开始年为 1979 年,在 2000 年后显著增大,近 10 a 是夏季降雨侵蚀潜能增大最明显的时期。

(3) 各气象站点 1955—2010 年降雨侵蚀力均呈增大趋势,仅涪陵站趋势显著(sig=0.1)。奉节、万县站春、秋季节降雨侵蚀力变化与涪陵、沙坪坝存在差别。

(4) 各气象站点降雨侵蚀力突变开始年份多对

应 1960s, 突变年后降雨侵蚀力呈增大趋势。奉节在夏季、秋季和冬季都发生显著变化, 与其他 3 个站点差异最大, 一定程度上与奉节站地形复杂有关。

致谢: 写作中得到北京师范大学环境学院闫冬同学的帮助, 表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 李月臣, 刘春霞. 三峡库区水土流失问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] Renschler C S, Mannaerts C, Dieckkrüger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk—rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain[J]. *Catena*, 1999, 34(3/4): 209-225.
- [3] Ramos M C, Martínez J A. Nutrient losses from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event[J]. *Catena*, 2004, 55(1): 79-90.
- [4] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 等. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征[J]. *地理学报*, 2008, 63(5): 502-513.
- [5] 王光谦, 李铁键. 流域泥沙动力学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [6] Diodato N, Ceccarelli M, Bellocchi G. Decadal and century—long changes in the reconstruction of erosive rain fall anomalies in a Mediterranean fluvial basin[J]. *Earth surface Processes and Landforms*, 2008, 33(13): 2078-2093.
- [7] 张天宇, 程炳岩, 唐红玉, 等. 21 世纪重庆中雨以上天数的预估分析[J]. *气象科学*, 2010, 30(2): 151-157.
- [8] 高阳华, 居辉, Jan Verhagen, 等. 气候变化对重庆农业的影响及其对策研究[J]. *高原山地气象研究*, 2008, 28(4): 46-50.
- [9] 李永华, 高阳华, 张建平, 等. 气候波动对重庆水稻产量的影响及其对策[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(1): 75-78.
- [10] 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.
- [11] Loureiro N S, Coutinho M A. A new procedure to estimate the RUSLE  $EI_{30}$  index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 250(1/4): 12-18.
- [12] Sepaskhah A R, Sarkhosh P. Estimating storm erosion index in southern region of I. R. IRAN[J]. *Iranian Journal of Science & Technology: Transaction B, Engineering*, 2005, 29(3): 357-363.
- [13] 胡勇, 张晟, 郑坚, 等. 三峡库区水土流失状况及防治对策[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(3): 1147-1149.
- [14] Shen Z Y, Gong Y W, Li Y H, et al. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(10): 1435-1442.
- [15] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(长江上游及西南诸河区卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] LU X X, Higgitt D L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from  $^{137}\text{Cs}$  measurements[J]. *Catena*, 2000, 39(1): 33-51.
- [17] Jiao Nianzhi, Zhang Yao, Zeng Yonghui, et al. Ecological anomalies in the East China sea: impacts of the Three Gorges Dam[J]. *Water Research*, 2007, 41(6): 1287-1293.
- [18] Richard S. Three Gorges Dam: into the Unknown[J]. *Science*, 2008, 321: 628-632.
- [19] Richard S. The Legacy of the Three Gorges Dam[J]. *Science*, 2011, 333(6044): 817.
- [20] 房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(5): 711-718.
- [21] 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): 705-712.
- [22] 徐宗学, 张玲, 阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(2): 186-193.
- [23] 张生军, 王天明, 王涛, 等. 新疆近 50 a 来降水量时空变化及其突变分析[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 668-675.
- [24] 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于 Mann—Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 501-508.
- [25] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- [28] Zhang Qiang, Liu Chunling, Xu Chong-yu, et al. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4): 255-265.
- [29] Silva A M. Rainfall erosivity map for Brazil[J]. *Catena*, 2004, 57(3): 251-259.
- [30] 周浩, 杨宝钢, 程炳岩. 重庆近 46 a 气候变化特征分析[J]. *中国农业气象*, 2008, 29(1): 23-27.
- [31] 郑刚, 刘祥梅, 郭志华, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态环境综合评价—降水量变化[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 486-491.
- [32] 刘毅, 何金海, 王黎娟. 近 40 a 重庆地区夏季降水的气候特征[J]. *气象科学*, 2005, 25(5): 490-498.
- [33] 叶香, 陆维松, 张天宇, 等. 近 46 a 重庆汛期极端降水量异常特征[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(5): 646-654.
- [34] 周浩, 李梗, 程炳岩. 重庆秋季降水特征及大气环流异常分析[J]. *气象科学*, 2008, 28(4): 444-449.