

# 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析

马良<sup>1,4</sup>, 左长清<sup>2</sup>, 邱国玉<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学 资源学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 北京大学 深圳研究生院 环境与能源学院, 广东 深圳 518055; 4. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 通过对赣北红壤坡地上为期 6 a(2001—2006年)的定点观测, 研究确定了该区域侵蚀性降雨的雨量及雨强标准分别为 11.20 mm 和 0.88 mm/h, 并建立了降雨侵蚀力因子“ $R = \sum E \cdot I_{30}$ ”的最佳算式; 通过降雨侵蚀力的分析计算, 该区多年平均侵蚀力为 8 695.43 J · mm/(m<sup>2</sup> · h), 年内分布上主要集中在夏季; 研究中还拟合了该区降雨侵蚀力预报简易算法, 结果表明当年降雨总量产生 10% 的波动时, 会导致年降雨侵蚀力总量 27% 的变化。

**关键词:** 侵蚀性降雨; 降雨侵蚀力; 降雨变化; 红壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0074-06

中图分类号: P331.1, S157.1

## Erosive Rainfall Characteristics on Red Soil Slope Land in Northern Jiangxi Province

MA Liang<sup>1,4</sup>, ZUO Chang-qing<sup>2</sup>, QIU Guo-yu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China; 3. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School of Beijing University, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 4. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China)

**Abstract:** Erosive rainfall plays an extremely important role in forecasting and evaluating soil erosion by water. Erosive rainfall and rainfall erosivity ( $R$ ) in Northern Jiangxi Province are studied based on data observed from 2001 to 2006. Results show that the rainfall amount standard and intensity standard of erosive rainfall events are 11.20 mm and 0.88 mm/h, respectively. The best equation for calculating rainfall erosivity factor in Northern Jiangxi is  $R = \sum E \cdot I_{30}$ . By calculation, the mean annual rainfall erosivity is 8 695.43 J · mm/(m<sup>2</sup> · h), maximum annual rainfall erosivity is 15 140.64 J · mm/(m<sup>2</sup> · h), and minimum is 5 601.10 J · mm/(m<sup>2</sup> · h). The seasonal distribution of  $R$  value is mainly concentrated in summer. Through the simple algorithm of  $R$  proposed in the paper, percent change in annual rainfall erosivity is greater than percent change in total precipitation.

**Keywords:** erosive rainfall; rainfall erosivity factor; precipitation variation; red soil

用侵蚀性降雨表征全部降雨事件中产生土壤水蚀的降雨,使其从总降雨场次中分离出,分析其降雨特征和时空分布,特别是研究降雨侵蚀力因子的变化规律,对提高土壤水蚀预报准确性,提升预报模型精度,评价水蚀对气候变化的响应具有重要的基础研究价值。同时为提高降雨资料的实用性,指导区域水土流失的科学防治发挥重要的实践意义。

侵蚀性降雨雨量、雨强标准作为产生侵蚀与不产生侵蚀的降雨临界值,是划分侵蚀性降雨的指标。

Rapp 等人<sup>[1]</sup>在坦桑尼亚, Morgan<sup>[2]</sup>在马来西亚, Hudson<sup>[3]</sup>在津巴布韦研究得到的侵蚀性降雨雨强标准均为 25 mm/h。Morgan 在英格兰, Richter 和 Negendank<sup>[4]</sup>在德国, Bollinne 在比利时<sup>[5]</sup>分别得到 10, 6.0 和 1.0 mm/h 的雨强标准。USLE 和 RUSLE 中应用的侵蚀性降雨标准为 12.7 mm<sup>[6-7]</sup>, 我国学者在黄土高原、黑龙江、滇东北、闽东南等地研究得到的侵蚀性降雨雨量标准集中在 8~20 mm 左右<sup>[8-11]</sup>。

收稿日期: 2009-06-03

修回日期: 2009-07-09

资助项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目“红壤退化的阻控和定向修复与高效优质生态农业关键技术与试验示范”(2009BAD6C6B006); 水利部公益性行业科研专项经费项目“水蚀地区坡面水土流失阻控技术研究”(200901047); 中国水利水电科学研究院专项基金项目“红壤坡地水土保持效应及机理研究”(泥集 0844)

作者简介: 马良(1980—),男(汉族),山东省东阿县人,博士研究生,工程师,主要从事生态水文、水土流失防治规律的研究。E-mail: maleung@163.com。

通信作者: 左长清(1956—),男(汉族),湖南省衡阳市人,博士,教授级高级工程师,从事水土流失规律研究。E-mail: zuochq@sina.com。

在地形、植被等下垫面信息设为常数的前提下, 土壤侵蚀率可表示成降雨侵蚀力的函数。降雨侵蚀力作为降雨的物理特征参数, 表征降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。由于降雨的侵蚀力是雨强、降雨历时、雨滴质量、直径和速度的函数, 因此计算降雨侵蚀力最有效的表达式应基于降雨动能建立<sup>[12]</sup>。如忽略降雨过程中雨滴中径的变化, 在降雨动能与雨强之间寻找表达式应是可行的, 如 Wischmeier 和 Smith 应用到 USLE 中  $e = 0.0119 + 0.0873 \lg I$  的算式。国内外学者在不同研究区下分别拟合出各自的公式, 代表性有 RUSLE 算式<sup>[13]</sup>、Marshall 算式<sup>[14]</sup>、江忠善算式、余新晓算式<sup>[15]</sup>、van Dijk 算式<sup>[16]</sup>等, 这些算式主要是基于时段雨强、时段最大雨强为自变量的对数或幂函数。计算某一场降雨动能的一般范式是首先根据自记雨量计划分单位时段, 使用上述算式计算该时段内动能, 然后乘以时段内雨量, 累加即可。

降雨侵蚀力因子  $R$  最常用的算式是 USLE 及 RUSLE 提出的  $E \cdot I_{30}$ , 即单位面积单场降雨的总动能与该场降雨的最大 30 min 雨强的乘积。此外, 降雨侵蚀力因子  $R$  还有如修正 Fournier 指数法<sup>[17]</sup>、 $KE > 1$  指数法等其它计算方法。目前许多研究集中于借助观测资料来描述降雨—土壤侵蚀过程, 以寻求在当地更适用的算式。

南方红壤坡地因水热条件好, 自然资源丰富而具有巨大的农业生产发展潜力, 但由于区域水土流失, 特别是土壤水蚀严重, 导致了土壤肥力退化, 生态破坏加剧, 而成为全国生态脆弱区之一。因此在该区开展水蚀的源动力—侵蚀性降雨的特征研究, 意义重大。

## 1 试验处理与研究方法

### 1.1 试验处理

本研究试验布设在江西省德安县境内的国家南方水土保持科技示范园内(东经  $115^{\circ} 42' 38''$ — $115^{\circ} 43' 06''$ , 北纬  $29^{\circ} 16' 37''$ — $29^{\circ} 17' 40''$ )。该科技园地处赣北鄱阳湖水系的燕沟小流域, 气候属亚热带季风区, 多年平均气温  $16.7^{\circ}\text{C}$ , 年日照时数  $1650 \sim 2100\text{h}$ , 多年平均无霜期为 249 d。科技园地貌主要为低丘岗地, 海拔高度在  $30 \sim 100\text{m}$  之间, 坡度  $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ , 园内以第四纪红壤为主, 侵蚀以水力侵蚀为主。科技园自然条件在赣北红壤坡地上具有典型代表性。

本研究在典型坡面上布设了一个标准径流小区, 小区水平投影面积  $100\text{m}^2$ , 即  $5\text{m} \times 20\text{m}$ , 坡度  $12^{\circ}$ , 下垫面为裸露红壤。小区坡脚设径流池, 进行产流、产沙的取样和观测。

另按照气象观测要求, 建立标准气象站 1 个, 除设有 2 套虹吸式自记雨量计记录降雨过程外, 还可观测其它相关气象要素。

### 1.2 研究方法

在本文研究中, 采用 80% 经验频率方法和统计的方法来确定侵蚀性降雨雨量和雨强标准。

计算红壤坡地降雨动能, 首先选取 USLE, RUSLE, Marshall, van Dijk 以及余新晓 5 个代表性算式进行降雨动能的区域适用性检验, 后将各算式结果与小区侵蚀量观测值之间进行相关性分析, 结果发现余新晓算式最优, 可选作本研究的经验公式, 如式(1)、(2)所示。

$$e = 24.151 + 8.64 \lg I \quad (1)$$

式中:  $e$ ——一场降雨某一时段的降雨动能 [ $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ ];  $I$ ——对应该时段的雨强 ( $\text{mm}/\text{min}$ )。

$$E = \sum eP \quad (2)$$

式中:  $E$ ——一次降雨的总动能 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );  $P$ ——对应某一时段的降雨量 ( $\text{mm}$ )。

借鉴前人研究成果, 选择“ $R = \sum E \cdot I_n$ ”或“ $R = E_n \cdot I_n$ ”组合作为赣北红壤坡地降雨侵蚀力因子算式的基本形式。通过比较各种降雨因子或组合与土壤流失量观测值之间相关系数的大小及逐步回归法, 来分析确定相关性最好的组合作为红壤坡地降雨侵蚀力因子  $R$  的最佳算式。

## 2 结果与分析

### 2.1 侵蚀性降雨标准

本研究在 6 a 观测期内筛选出 95 个降雨样本(之前至少 24 h 没有降雨且发生轻微以上土壤侵蚀的降雨)。采用 80% 经验频率法绘制出场雨量和雨强  $P$ — $Q$  型频率曲线, 查得频率值为 80% 时的雨量或雨强, 分别为  $11.20\text{mm}$ ,  $0.88\text{mm}/\text{h}$ , 即为侵蚀性降雨基本雨量和雨强标准值。

有研究认为足够多的样本数, 如 5 a 序列的观测资料才能保证降雨标准的稳定性<sup>[18]</sup>。本文研究以 6 a 观测期内引起土壤侵蚀的所有降雨为样本(共 227 个), 满足拟定要求。按雨量大小降序排列, 并将大于某一雨量( $P$ )产生的土壤侵蚀量逐个累加, 得到  $N$  个土壤侵蚀量( $Q$ )和总侵蚀量( $q$ ), 然后求出大于某一雨量( $P$ )的侵蚀累计百分比( $P_Q$ ), 拟合  $P$ — $P_Q$  关系曲线, 即为:

$$P_Q = 104.275 - 0.761P \quad (3)$$

式中:  $P_Q$ ——侵蚀累计百分比(%);  $P$ ——相应的雨量标准 ( $\text{mm}$ )。

因此, 当  $P$  等于根据 80% 频率法计算出的侵蚀雨量标准值  $11.2\text{mm}$  时,  $P_Q$  为 95.75%, 说明雨量  $\geq 11.2\text{mm}$  的侵蚀性降雨产生的土壤侵蚀量可占总侵蚀量的 95.75%。

### 2.2 降雨侵蚀力因子 $R$ 算式

本研究计算了  $\sum E \cdot I_n$  组合及  $E_n \cdot I_n$  组合与产

沙量之间相关性(表 1)。各相关系数均达显著水平且很接近,因此再考虑最大时段雨强  $I_n$  与土壤流失

量之间的相关关系(表 2),选择相关系数最大的那一时段的组合作为  $R$  的算式。

表 1 产沙量与  $\Sigma E \cdot I_n, E_n \cdot I_n$  组合的相关系数

相关系数	$I_{10}$	$I_{20}$	$I_{30}$	$I_{45}$	$I_{60}$	$I_{90}$
$\Sigma E$	0.855	0.855	0.845	0.834	0.832	0.834
$E_{10}$	0.795	0.759	0.752	0.751	0.748	0.778
$E_{20}$	0.786	0.781	0.764	0.764	0.758	0.708
$E_{30}$	0.692	0.705	0.679	0.693	0.697	0.700
$E_{45}$	0.801	0.817	0.785	0.731	0.759	0.757
$E_{60}$	0.749	0.752	0.748	0.733	0.719	0.704
$E_{90}$	0.718	0.735	0.734	0.719	0.716	0.712

注:样本数  $n=227$ 。

表 2 产沙量与时段最大雨强  $I_n$  相关系数

相关系数	$I_{10}$	$I_{20}$	$I_{30}$	$I_{45}$	$I_{60}$	$I_{90}$
土壤流失量	0.794	0.792	0.806	0.748	0.736	0.684

注:表中各项间均在 0.01 水平下显著相关,样本数  $n=227$ 。

因此本研究中选择降雨侵蚀力指标的最佳计算式为:

$$R = \Sigma E \cdot I_{30} \quad (4)$$

式中:  $R$ ——降雨侵蚀力  $[(J \cdot mm)/(m^2 \cdot h)]$ ;  $\Sigma E$ ——一场侵蚀性降雨总动能  $(J/m^2)$ ;  $I_{30}$ ——该场降雨最大 30 min 雨强  $(mm/h)$ 。

### 2.3 侵蚀性降雨的时间分布

在观测期内(2001—2006 年),共观测到总降水 897 次,剔除降雪 6 次,剩余降雨 891 次。降雨总量达到 8 257.5 mm,降雨总历时 5 620.93 h,年均降雨量 1 376.25 mm,年均降雨历时 936.82 h。观测期内有丰、平、枯水年,因此对研究该地区降雨特征具有较好的代表性(表 3)。根据 11.20 mm, 0.88 mm/h 为侵蚀降雨雨量、雨强标准的划分,全部降雨中有 414

场次降雨为侵蚀性降雨,占总降雨场次的 46.46%。侵蚀性降雨的雨量总计 7 243.15 mm,占总降雨雨量的 87.72%;降雨历时 3 346.03 h,占总降雨历时的 59.53%;降雨雨强平均 2.16 mm/h(表 4,图 1)。可见,全年总降雨一半左右的侵蚀性降雨事件带来了侵蚀,其雨量占全年总雨量的 80% 以上,雨强是年均雨强的 1.36~1.61 倍。

从侵蚀性降雨年内分布分析,该类型降雨多发生在春、夏两季,春季侵蚀性降雨雨量最高,而夏季雨强最大(表 5)。从月份上(图 1),侵蚀性降雨多发生在 4—8 月份,其中 4 月份侵蚀性降雨雨量最多,8 月份雨强最大,且侵蚀性降雨占当月降雨总量比例最高,达 96.10%。雨量最低,占当月比例最低的月份均为 12 月份。侵蚀性降雨雨强最低的月份为 1 月份。

表 3 观测期内年降雨特征

年份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
年降雨总量/mm	1 163.20	1 808.50	1 433.00	1 302.40	1 550.90	999.50
年降雨历时/h	1 022.77	1 187.60	828.00	845.63	1 003.75	733.18
平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	1.14	1.52	1.73	1.54	1.55	1.36
次最大降雨雨量/mm	61.50	131.30	129.30	178.80	253.40	52.00
次最大降雨历时/h	61.83	51.50	37.97	34.58	57.97	23.92
次最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	34.56	32.43	21.00	28.80	30.90	40.80
丰枯年	枯	丰	平	枯	平	枯

### 2.4 降雨侵蚀力

应用式(4)求得观测期内降雨侵蚀力共计

52 172.58 J·mm/(m<sup>2</sup>·h),年平均 8 695.43 J·mm/(m<sup>2</sup>·h)。从年际分布可发现,雨量最大的

2002 年降雨侵蚀力最大, 达  $15\ 140.64\ \text{J} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 2006 年侵蚀力最低, 仅  $5\ 601.10\ \text{J} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (图 2)。然而雨量、雨强两个指标并不能直接反映侵蚀力的大小。如虽然 2005 年雨量仅次于 2002

年, 并且雨强也高于 2004 年, 但产生的降雨侵蚀力小于 2004 年。由此可见, 虽一般情况下降雨的特征可用场次雨量、雨强来表示, 但降雨实际产生的侵蚀力主要是时段最大雨强的结果。

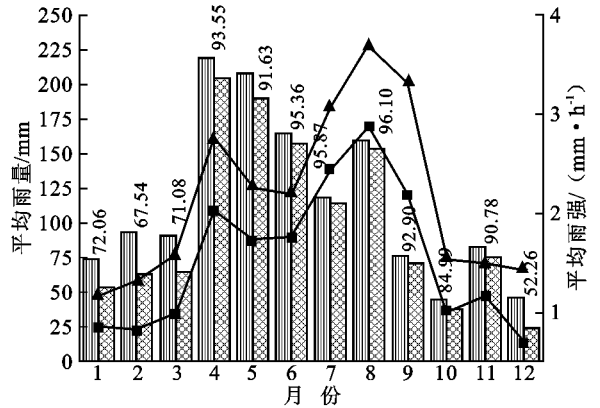
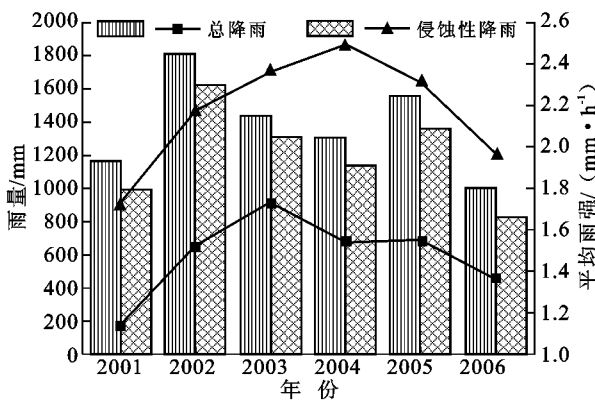


图 1 侵蚀性降雨年际及月平均分布

注: 图内数值为侵蚀性降雨量占该月总雨量的百分数(%)

表 4 观测期内年侵蚀性降雨特征

年份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	合计
年降雨场次/次	117	154	150	146	166	158	891
侵蚀性降雨场次/次	57	82	74	64	66	71	414
占总降雨场次比例/%	48.72	53.25	49.33	43.84	39.76	44.94	46.46
年降雨总量/mm	1 163.20	1 808.50	1 433.00	1 302.40	1 550.90	999.50	8 257.50
侵蚀性降雨雨量/mm	990.25	1 620.90	1 307.90	1 132.70	1 360.60	830.80	7 243.15
占总雨量比例/%	85.13	89.63	91.27	86.97	87.73	83.12	87.72
年降雨历时/h	1 022.77	1 187.60	828.00	845.63	1 003.75	733.18	5 620.93
侵蚀性降雨历时/h	575.75	745.27	554.88	455.72	589.98	424.43	3 346.03
占总历时比例/%	56.29	62.75	67.01	53.89	58.78	57.89	59.53
年降雨平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	1.14	1.52	1.73	1.54	1.55	1.36	1.47
侵蚀性降雨平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	1.72	2.17	2.36	2.49	2.31	1.96	2.16
侵蚀性雨强/年均雨强	1.51	1.43	1.36	1.61	1.49	1.44	1.47

表 5 研究区侵蚀性降雨季节分配特征

季节	春季	夏季	秋季	冬季	全年
天数/d	541	552	552	546	2 191
总降雨场次/次	304	234	136	217	891
侵蚀降雨场次/次	152	142	58	62	414
侵蚀降雨场次占总场次/%	50.00	60.68	42.65	28.57	46.46
总降雨量/mm	3 099.15	2 658.60	1 219.55	1 280.20	8 257.50
侵蚀降雨量/mm	2 753.20	2 545.95	1 101.40	842.60	7 243.15
侵蚀降雨量占总雨量/%	88.84	95.76	90.31	65.82	87.72
总降雨历时/h	1 924.27	1 189.32	905.55	1 601.80	5 620.93
侵蚀降雨历时/h	1 196.72	904.52	579.05	665.75	3 346.03
侵蚀降雨历时占总降雨历时/%	62.19	76.05	63.94	41.56	59.53
日均侵蚀雨量/mm	5.09	4.61	2.00	1.54	3.31
日均侵蚀历时/h	2.21	1.64	1.05	1.22	1.53
平均侵蚀雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	2.30	2.81	1.90	1.27	2.16

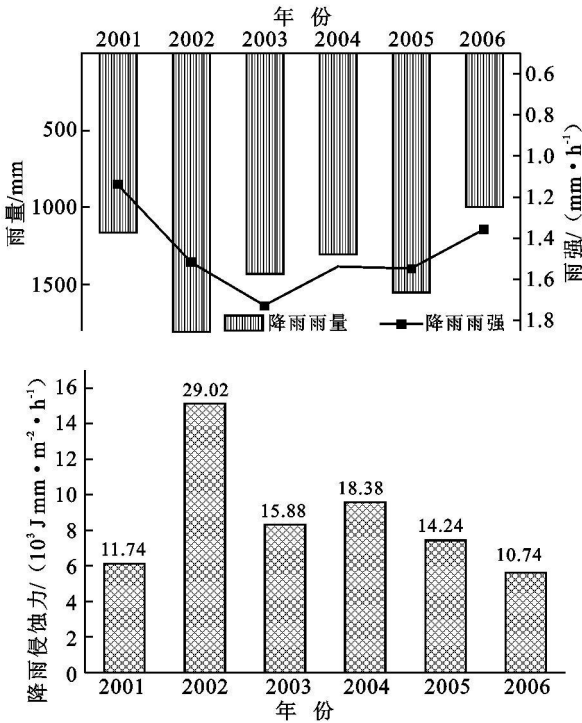


图 2 降雨量、雨强和降雨侵蚀力  $R$  的年份分布

注: 图内数值为占该年总侵蚀力的百分数 (%)

赣北红壤坡地降雨侵蚀力年内分布也存在不均, 夏季 6, 7, 8 月降雨侵蚀力总和大于其它各季, 占总降雨侵蚀力的 53.07%; 冬季最小, 仅 3.88% (图 3)。观测期内月降雨侵蚀力的最大值为 2004 年 8 月份, 最小值出现在 2005 年 12 月份 (表 6, 图 3)。全年降雨侵蚀力集中在 4—8 月份, 这与侵蚀性降雨多发月份相吻合, 年内并不是侵蚀性雨量最大的 4 月份侵蚀力最大, 而是侵蚀降雨雨强最大的 8 月份。夏季降雨侵蚀的峰值在 7, 8 月份, 两月份降雨产生的侵蚀力可占全年侵蚀力的 41.82%。降雨侵蚀力最低值出现在 12 月份。

有研究认为年降雨量  $P_a$  与降雨侵蚀力因子  $R$  之间有良好的相关性, 如  $R = 0.05P_a^{1.6}$  (相关系数为 0.82)<sup>[19]</sup> 等, 因此也可用来评估气候变化对土壤侵蚀的影响。本研究中利用 2001—2003 年的年、月降雨量 ( $P_a, P_m, \text{mm}$ ) 分别为自变量, 以  $R$  值为因变量, 拟合得到年侵蚀力因子  $R_a$ , 月侵蚀力因子  $R_m$  的简易算法:

$$R_a = 0.265P_a^{1.435} (r = 0.803) \quad (5)$$

$$R_m = 0.068P_a^{1.825} (r = 0.745) \quad (6)$$

表 6 降雨侵蚀力因子  $R$  值的月份分配

月份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	合计	年平均
1	337.27	228.09	27.73	61.35	105.96	60.61	821.01	136.84
2	46.05	9.66	532.00	92.00	168.82	65.59	914.12	152.35
3	137.55	244.19	734.60	44.42	86.71	56.93	1304.40	217.40
4	1272.82	2101.04	2265.00	322.36	659.43	1101.90	7722.55	1287.09
5	82.70	5031.70	462.90	1716.41	865.39	359.27	8518.37	1419.73
6	281.96	597.08	1490.00	866.03	1746.40	889.15	5870.62	978.44
7	1734.95	3836.50	1954.00	1471.15	747.63	234.05	9978.28	1663.05
8	1909.87	1680.43	140.60	4872.48	601.96	2633.55	11838.89	1973.15
9	0.89	961.21	505.80	15.74	2007.85	64.32	3555.81	592.64
10	193.06	116.05	117.50	0.03	100.67	61.03	588.34	98.06
11	70.16	140.24	35.71	119.82	334.52	69.66	770.11	128.35
12	57.31	194.46	19.70	9.97	4.03	5.04	290.51	48.42
合计	6124.59	15140.64	8285.14	9591.75	7429.36	5601.10	52172.58	8695.50

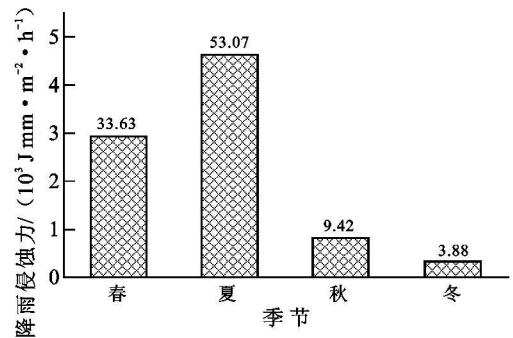
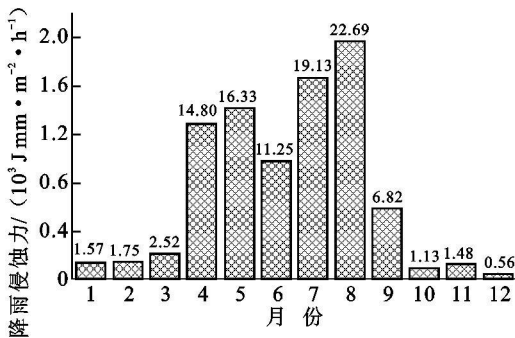


图 3 观测期间平均降雨侵蚀力  $R$  年内分布

注: 图内数值为占时段总侵蚀力的百分数 (%)

利用上述公式计算 2004—2006 年、月降雨侵蚀力因子  $R$  以进行方程检验。结果显示, 方程相关系数分别可达 0.90 和 0.78, Nash-Steddliffe 效率系数 ( $E_{ns}$ ) 分别为 0.80 和 0.61。因此认为, 上述两方程可较好地描述年、月降雨量与相关降雨侵蚀力因子  $R$  之间的关系。式(5)可明显表示, 在赣北红壤坡地上, 当年降雨总量出现 10% 的变化时, 则会导致年降雨侵蚀力总量 27% 的变化幅度。

### 3 结论

通过对赣北红壤坡地典型研究区为期 6 a (2001—2006 年) 的观测, 研究得到如下结论。

(1) 该研究区侵蚀性降雨的基本雨量和雨强标准值分别为 11.20 mm 和 0.88 mm/h, 使用该雨量标准值可描述占土壤侵蚀总量 95.75% 以上的降雨侵蚀事件。

(2) 研究区侵蚀性降雨事件虽然仅占全部降雨场次的 1/2 左右, 但其雨量占全年总雨量的 80% 以上, 产生比年均雨强高 1.36~1.61 倍的雨强; 侵蚀性降雨事件多发生在春夏两季的 4—8 月份, 其中春季雨量大, 夏季雨强大。

(3) 确定了该区降雨侵蚀力因子的最佳算式, 即  $R = \sum E \cdot I_{30}$ ; 多年平均降雨侵蚀力为  $8695.43 \text{ J} \cdot \text{mm} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 但存在年际和年内分布不均, 年总量在  $5601.10 \sim 15140.64 \text{ J} \cdot \text{mm} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  之间; 侵蚀力夏季最大, 且集中在 7, 8 月份, 防治该区土壤侵蚀的关键时期在于夏季的强侵蚀力降雨时期。

(4) 拟合建立了年、月降雨侵蚀力预报简易算法, 经 Nash-Steddliffe 效率系数等检验, 认为其具有较好的精度。研究结果表明, 当年降雨量产生 10% 的波动时, 会导致该区降雨侵蚀力年总量 27% 的变化。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Rapp A, Axelsson V, Berry L, et al. Soil erosion and sediment transport in the Morogoro River catchment, Tanzania [ J ]. Geografiska Annaler, 1972, 54A ( 3/4 ): 125-155.
- [ 2 ] Morgan R P C. Field studies of sediment transport by overland flow [ J ]. Earth Surface Processes, 1980, 5: 307-316.
- [ 3 ] Hudson N W. Soil Conservation [ M ]. 2nd ed. London: Batsford, 1981.
- [ 4 ] Richter G, Negendank J F W. Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river [ J ]. Earth Surface Processes, 1977, 2: 261-278.
- [ 5 ] Bollinne A. Study of the importance of splash and wash on cultivated loamy soils of Hesbaye ( Belgium ) [ J ]. Earth Surface Processes, 1978, 3( 1 ): 71-84.
- [ 6 ] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [ J ]. Transactions of the American Geophysical Union, 1958, 39( 2 ): 285-291.
- [ 7 ] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the  $R$ -factor in the revised USLE [ J ]. Journal of Hydrology, 1994, 157( 1/4 ): 287-306.
- [ 8 ] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土区天然降雨雨滴特性研究 [ J ]. 中国水土保持, 1983( 3 ): 32-36.
- [ 9 ] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究 [ J ]. 水土保持通报, 1992, 12( 4 ): 1-9.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 卢程隆, 黄炎和, 李荣源, 等. 闽东南花岗岩侵蚀区的土壤侵蚀与治理 [ J ]. 福建农学院学报, 1989, 18( 4 ): 504-509.
- [ 12 ] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation [ M ]. Oxford: Blackwell Publishing, 2005: 45-50.
- [ 13 ] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions [ J ]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30( 2 ): 379-386.
- [ 14 ] Marshall J S, Palmer W M. Relation of rain drop size to intensity [ J ]. Journal of Meteorology, 1948, 5: 165-166.
- [ 15 ] 余新晓. 赣西北降雨侵蚀力和森林植被减弱降雨侵蚀能量的初步研究 [ D ]. 北京: 北京林业大学, 1989.
- [ 16 ] Van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A, Rosewell C J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature review [ J ]. Journal of Hydrology, 2002, 261( 1414 ): 1-23.
- [ 17 ] Amoldus J M J. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bulletin ( Annex ⑤ ) [ R ]. Roma: FAO of Un, 1977.
- [ 18 ] 金建君, 谢云, 张科利. 不同样本序列下侵蚀性雨量标准的研究 [ J ]. 水土保持通报, 2001, 21( 2 ): 31-33.
- [ 19 ] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the  $R$ -factor for the universal soil loss equation [ J ]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1996, 39( 2 ): 559-561.