浙江省降雨侵蚀力变化特征分析

沈照伟，田 刚，李 钢，陆芳春

（浙江省水利河口研究院 浙江广川工程咨询有限公司，浙江 杭州 310020）

摘 要：根据浙江省 83 个气象站 1980—2009 年逐日雨量资料，采用日降雨侵蚀力模型，运用 Mann—Kendall非参数检验和径向基函数插值等方法，研究了该省降雨侵蚀力变化的时空分布特征。结果表明，近 30 a来浙江省多年降雨侵蚀力长期变化趋势不显著，但冬季呈显著上升趋势，1 和 12 月为上升趋势的主要贡献月份；浙江省多年平均降雨侵蚀力由西北向东南递增，月、季降雨侵蚀力变化趋势显著的集中区主要位于浙中浙北地区，但夏季降雨侵蚀力较大，上升趋势显著的集中区位于该省东南部，该地区降雨潜在侵蚀动能较大，是水土保持的重点区域。

关键词：降雨侵蚀力；时空分布；Mann—Kendall 非参数检验；径向基函数插值；浙江省

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2013)04-0119-06 **中图分类号**：S157.1

An Analysis of Rainfall Erosivity Change in Zhejiang Province

SHEN Zhao-wei, TIAN Gang, LI Gang, LU Fang-chun

(*Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang* 310020, *China*)

Abstract: Based on a long time series(1980—2009) daily rainfall data collected by 83 meteorological stations, the rainfall erosivity in Zhejiang Province was calculated by using daily rainfall erosivity model. The temporal changes and its spatial distribution characteristics of rainfall erosivity were analyzed by using the non-parametric Mann—Kendall test and radial basis function interpolation. The results indicated that there are no significant changes in the long-term mean annual rainfall erosivity, significant increases of rainfall erosivity occurred in winter, especially in January and December. An increasing trend in mean annual rainfall erosivity was showed from the northwest to the southeast of Zhejiang Province. While the most monthly and seasonally rainfall erosivity changes mainly occurred in the northern and the central part of Zhejiang Province with the rainfall erosivity was obviously higher in summer than that in other three seasons. As the main region where the most significant rainfall erosivity changes occurs, and the region with relative high rainfall kinetic energy, southeast part of Zhejiang Province was regarded as the key area for soil and water conservation.

Keywords: rainfall erosivity; spatial-temporal distribution; non-parametric Mann－Kendall test; radial basis function interpolation; Zhejiang Province

降雨侵蚀力因子 R 值是评价降雨对土壤侵蚀潜在能力的一个动力指标，不同区域 R 值的差异是导致区域水土流失特征差异的重要原因之一。因此，研究降雨侵蚀力变化的时空分布特征，对土壤流失预测、水土保持规划等具有重要意义。20 世纪 50 年代末，美国学者 Wischmeier 等[1-2]在研究中发现次降雨动能($\sum E$)和 30 min 最大降雨强度(I_{30})的乘积与土壤流失量的关系最为密切，并提出次降雨侵蚀力 R 值的计算公式为 EI_{30}，随后也得到了大量研究的证实[3-6]。由于次降雨动能计算繁琐，有学者[7-9]提出了 PI_{30} 等形式的次降雨侵蚀力计算公式。但在区域研究中很难获取较为全面的降雨过程资料，使其应用受到极大限制，而目前最为全面和详细的降雨资料为逐日降雨资料，因此许多学者[10-12]提出了基于日降雨量的各种估算模型，其中以幂函数型模型应用最为广泛。章文波等[13]采用日降雨幂函数模型和 Kriging 插值方法，并结合线性倾向率指标分析了我国降雨侵蚀力的空间变化特征；刘斌涛等[14]、张照录等[15]、温

收稿日期：2013-01-26 修回日期：2013-03-26
资助项目：浙江省水利河口研究院院长基金项目“钱塘江流域降雨侵蚀力模型研究”(水保 A10003)，“山核桃林水土流失综合防治技术研究”
作者简介：沈照伟(1975—)，男(汉族)，浙江省桐庐县人，博士，主要从事水土保持监测及技术研究。E-mail：shenzw@zjwater.gov.cn。
通信作者：田刚(1982—)，男(汉族)，山东省莱芜市人，硕士，工程师，主要从事土壤侵蚀和水土保持规划设计。E-mail：gk_fctb@163.com。

美丽等[16]采用同样的模型和方法分别对西南山区、三峡库区和广东省降雨侵蚀力时空变化趋势进行了探讨。但有研究[17-18]指出,水文要素的时间序列数据存在非正态分布特征,该类数据的分析与检验,采用 Mann—Kendall 非参数检验法比线性趋势法更为合适;同时对于散乱数据的插值采用径向基函数法可以得到更为满意的结果[19]。因此,可以结合 Mann—Kendall 非参数检验法和径向基函数插值法研究降雨侵蚀力变化的时空分布特征[20-21]。本研究以浙江省为例,借助该省 83 个气象站点 1980—2009 年的逐日降雨资料,基于日雨量幂函数降雨侵蚀力模型,应用 Mann—Kendall 非参数检验法和径向基函数插值法探讨该省降雨侵蚀力长时间序列的变化趋势和空间分布特征,揭示区域土壤侵蚀动力因子变化规律,为区域水土流失治理措施选择和水土保持规划制定提供参考。

1 研究区概况

浙江省地处中国东南沿海,长江三角洲南翼,陆域面积 10.18 km^2,地形复杂;省内土壤以黄壤和红壤为主,占该省面积的 70%以上;该区多年平均降雨量 980～2 000 mm,雨量丰沛,降雨集中,主要分布在 3—9 月,雨热季节变化同步,对成土母质的风化和淋溶作用大,降雨潜在侵蚀动能大是造成该省水土流失的重要因素之一。根据浙江省第 5 次水土流失遥感普查和中国水土流失生态安全综合科学考察结果,该省平均森林覆盖率虽然高达 60%以上,但林地水土流失亦十分严重,林地水土流失面积占总水土流失面积的 68.3%。

2 资料与方法

2.1 数据来源

降雨侵蚀力计算所用的降雨资料来源于省内各地方气象站,总共收集到浙江省 83 个气象站 1980—2009 年的逐日降雨资料。其中,湖州市 5 个,嘉兴市 7 个,杭州市 10 个,宁波市 9 个,绍兴市 5 个,舟山市 4 个,衢州市 6 个,金华市 9 个,台州市 9 个,丽水市 9 个,温州市 10 个。

2.2 降雨侵蚀力计算

采用参考文献[11]的降雨侵蚀力计算公式,计算过程为:

$$R_{hm}=\gamma\sum_{i=1}^{k}(P_i)^{\lambda} \tag{1}$$

$$\lambda=0.836\ 3+18.177/P_{d12}+24.455/P_{y12} \tag{2}$$

$$\gamma=21.586\lambda^{-7.189\ 1} \tag{3}$$

式中:R_{hm}——某半月时段的降雨侵蚀力值〔MJ·mm/(hm^2·h)〕;k——半月时段内的天数;P_i——半月时段内第 i 天的侵蚀性日雨量,要求 $P_i\geqslant 12$ mm,否则以 0 计算;P_{d12}——日雨量≥12 mm 的日平均雨量;P_{y12}表示日雨量≥12 mm 的年平均雨量;半月以每月第 15 日为界将月划分为两个半月,将半月侵蚀力累加得月、季、年尺度的降雨侵蚀力。

2.3 Mann－Kendall 检验法

降雨侵蚀力时间变化趋势采用 Mann—Kendall 非参数检验法进行趋势显著性检验[21-22]。检验统计变量计算为:

$$S=\sum_{k}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_k) \tag{4}$$

式中:x_j,x_k——第 j,k 年的侵蚀力,$k<j\leqslant n$;n——系列长度;$\mathrm{sgn}(x_j-x_k)$——返回函数,$(x_j-x_k)>0$,$(x_j-x_k)=0$,$(x_j-x_k)<0$ 返回值分别为 1,0,－1。

S 服从均值为 0,方差 $\mathrm{var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18$ 的正态分布。当 $n>10$ 时,标准正态统计变量计算为:

$$Z=\begin{cases}(S-1)/\sqrt{\mathrm{var}(S)} & (S>0)\\ 0 & (S=0)\\ (S+1)/\sqrt{\mathrm{var}(S)} & (S<0)\end{cases} \tag{5}$$

在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z|\geqslant Z_{1-\alpha/2}$,则否定原假设,即在 α 置信水平上时间序列数据存在显著的上升或下降趋势。$|Z|$ 大于等于 1.64,2.32 分别表示通过信度 95%和 99%的显著性检验。

Kendall 倾斜度中值,可以用来衡量时间序列变化的年平均增减幅度,$\beta>0$ 表示序列为上升趋势,$\beta<0$ 表示序列为下降趋势。其计算公式为:

$$\beta=\mathrm{median}[(x_j-x_k)/(j-k)]\quad(k<j) \tag{6}$$

式中:median——返回给定数据集合的中值;x_j,x_k——第 j,k 年的侵蚀力。

2.4 空间插值方法

各站点多年平均降雨侵蚀力和逐年 Kendal 倾斜度 β 值等离散数据点,借助于 Surfer 8.0 软件提供的径向基函数法进行空间插值,以获取连续的等值线图。径向基函数插值是逼近理论中的有利工具,对给定的多元散乱数据,选取径向基函数,并利用平移构造基函数系,从而寻找插值函数进行插值。该方法具有计算格式简单,节点配置灵活、计算快,精度相对较高等优点。

3 结果与分析

3.1 降雨侵蚀力年际变化趋势

通过计算,1980—2009 年浙江省平均降雨侵蚀

力的年序变化趋势如图 1 所示。该省 30 a 平均降雨侵蚀力为 8 473 MJ·mm/(hm²·h),降雨侵蚀力年际波动明显,峰值为 10 121 MJ·mm/(hm²·h)(1992 年),谷值为 5 326 MJ·mm/(hm²·h)(2003 年),波动幅度达 4 795 MJ·mm/(hm²·h),年际变差系数 0.16。该省逐年降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值为 20.18,表明降雨侵蚀力呈上升趋势,但显著性检验结果表明上升趋势不显著。

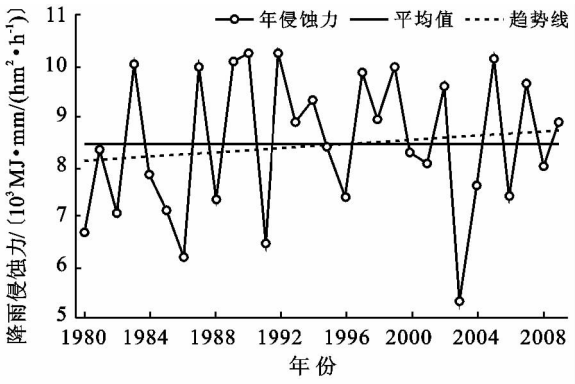


图 1　平均降雨侵蚀力年际变化趋势

3.2　降雨侵蚀力年内分配与变化趋势

浙江省平均降雨侵蚀力月、季分配及其降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值详见表 1。由表 1 可以看出,四季降雨侵蚀力分配关系为:夏季>春季>秋季>冬季。其中,夏季平均降雨侵蚀力可达 4 000 MJ·mm/(hm²·h),春季和秋季在 1 700～2 000 MJ·mm/(hm²·h),冬季平均降雨侵蚀力只有 570 MJ·mm/(hm²·h);变差系数关系为:冬季>秋季>春季>夏季,表明春、夏两季降雨侵蚀力波动弱于冬、秋两季。四季降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值春、秋两季为负,呈下降趋势,夏、冬两季为正,呈上升趋势;降雨侵蚀力逐年 Mann—Kendall 显著性检验表明,冬季通过了 95%信度水平,上升趋势显著,而春、夏、秋这 3 个季节未通过 95%信度水平,变化趋势不显著。

在各月份中,6—9 月平均降雨侵蚀力在 1 000～1 600 MJ·mm/(hm²·h),其中 6 月最大,这 4 个月的降雨侵蚀力之和占总降雨侵蚀力的 61.07%;3—5 月平均降雨侵蚀力在 550～850 MJ·mm/(hm²·h),降雨侵蚀力之和占全年的 23.65%;1—2 月以及 10—12 月平均降雨侵蚀力小于 500 MJ·mm/(hm²·h),合计占全年的 15.28%。从变差系数来看,4—8 月变差系数小于 0.50;2,3 和 9 月变差系数在 0.60～0.65;1 月以及 10—12 月变差系数大于 0.85,其中 10 和 12 月超过 1.00,表明这 4 个月降雨侵蚀力波动相对较大。

表 1　月、季平均降雨侵蚀力及其 Kendall 倾斜度 β 值

项 目	3 月	4 月	5 月	春季	6 月	7 月	8 月	夏季
降雨侵蚀力	551.68	617.61	828.48	1 997.77	1 599.50	1 114.94	1 401.46	4 115.90
占全年比例/%	6.53	7.31	9.81	23.65	18.95	13.20	16.59	48.74
变差系数 C_v	0.59	0.49	0.44	0.28	0.44	0.50	0.49	0.26
Kendall 倾斜度 β 值	−11.14*	−1.50	−3.74	−18.96	7.95	−6.71	17.91	25.38
项 目	**9 月**	**10 月**	**11 月**	**秋季**	**12 月**	**1 月**	**2 月**	**冬季**
降雨侵蚀力	1 041.69	377.58	323.94	1 789.17	131.17	214.94	244.05	570.16
占全年比例/%	12.33	4.47	3.83	20.63	1.55	2.54	2.89	6.98
变差系数 C_v	0.60	1.09	0.90	0.48	1.33	0.87	0.64	0.55
Kendall 倾斜度 β 值	4.42	−7.64	1.80	−0.76	2.01*	5.94**	2.33	10.67*

注:*,**分别表示通过信度 95%和 99%的显著性检验。

不同月份 Kendall 倾斜度 β 值为:3—5,7 和 10 月 Kendall 倾斜度 β 为负,呈下降趋势;其余月份 Kendall 倾斜度 β 值为正,呈上升趋势。月降雨侵蚀力逐年 Mann—Kendall 显著性检验表明,1 月通过 99%信度水平,3 和 12 月通过 95%信度水平,其他月份未通过 95%信度水平,表明 1 和 12 月增加趋势显著,3 月下降趋势显著,其他月份变化不显著。

结合月季年降雨侵蚀力变化趋势检验结果表明,冬季上升趋势显著,主要是 1 和 12 月贡献,而春季只有 3 月下降显著,由于 4 和 5 月下降不显著的综合作用,可能导致总体呈不显著。在季尺度上只有冬季上升趋势显著,其他 3 个季节不显著,同时存在上升、下降趋势的共同作用,全年上升趋势亦不显著。

3.3　降雨侵蚀力变化趋势空间分布

3.3.1　年降雨侵蚀力变化趋势空间分布　图 2 反映了浙江省平均降雨侵蚀力变化的空间分布。从图 2 可知,浙江省多年平均降雨侵蚀力区域差异明显,总体上呈现由西北向东南递增的规律,浙北、浙中和浙西北区变化梯度整体上小于浙西南和浙东沿海区;浙北区降雨侵蚀力主要集中在 6 000～7 000

MJ·mm/(hm²·h)，而其他 4 个区域由于地域跨度较大，降雨侵蚀力变化也大，变化区间为 6 000～15 000 MJ·mm/(hm²·h)；该省最高侵蚀力出现在浙东沿海区苍南县附近，可达 15 000 MJ·mm/(hm²·h)，最低值出现在浙北区的嘉善县和浙东沿海区嵊泗县附近，仅为 5 000～5 500 MJ·mm/(hm²·h)。不同区域降侵蚀力年际变差系数表现为(图 2)，浙中和浙西南区变差系数整体上小于浙北、浙西北和浙东沿海区。

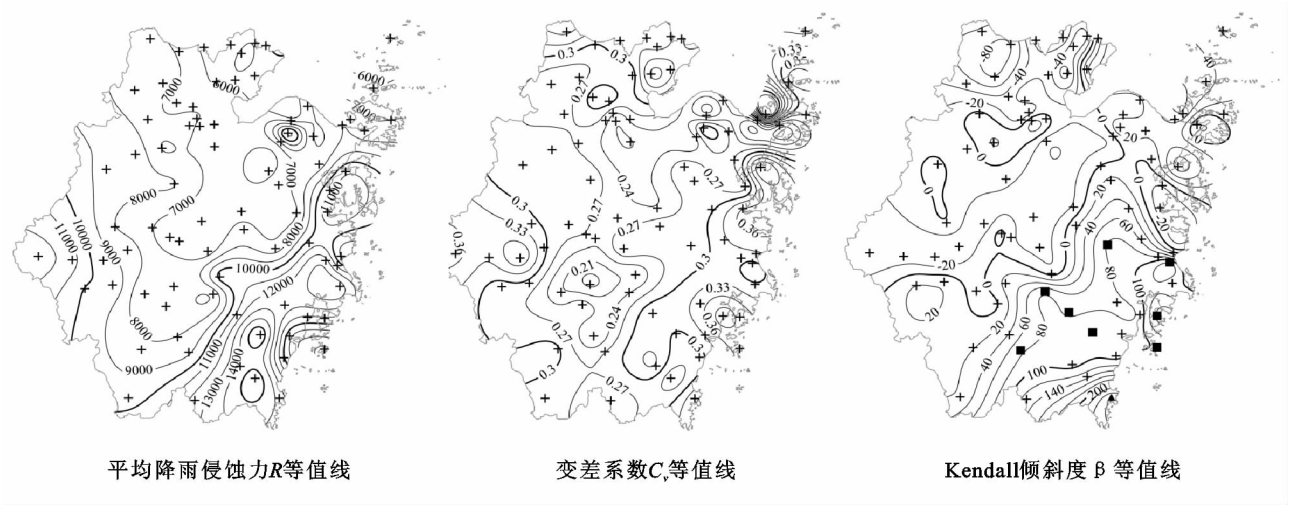


图 2 年降雨侵蚀力空间变化趋势等值线图

注：图中＋表示气象站点。■表示通过信度水平站点，▲表示通过 99%信度水平站点。下同。

从图 2 可以看出，浙西南区和浙东沿海区降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值为正，呈上升趋势，其他区域降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值绝大部分为负，呈下降趋势。浙西南区的丽水市、仙居县、青田县、景宁畲族自治县以及浙东沿海区的台州市区、玉环县、洞头县和苍南县上升趋势显著，年均上升幅度为 60～250 MJ·mm/(hm²·h)，越往东南部，上升幅度越大；其余区域变化趋势不显著。可见，上升趋势显著的区域主要分布于浙江的东南部。

3.3.2 季降雨侵蚀力变化趋势空间分布 季降雨侵蚀力空间变化趋势如图 3 所示。春季降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值绝大部分区域为负值，表明浙江省春季降雨侵蚀力总体呈下降趋势。在浙北区有嘉善县、嘉兴市区、海宁市、湖州市区、长兴县和德清县组成的显著下降区，年均下降幅度为 20～30 MJ·mm/(hm²·h)；浙中区有常山县、衢州市区、龙游县、金华市区、义乌市和永康市组成的显著下降区，年均下降幅度为 25～45 MJ·mm/(hm²·h)；其次浙西北区的安吉县、浙西南区的缙云县、浙东沿海区的舟山市区、瓯海区存在不同程度的显著下降趋势，其余区域变化趋势不显著。因此，春季降雨侵蚀力下降趋势显著的区域主要分布在浙江的最北部和中部两个区域。

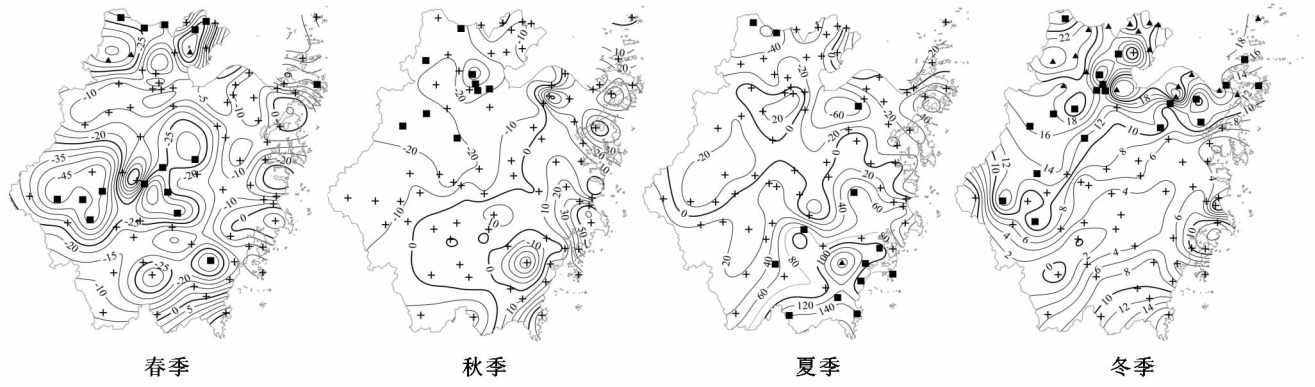


图 3 季降雨侵蚀力变化趋势 Kendall 倾斜度 β 等值线图

由图 3 可得出，夏季浙北区、浙西北区以及浙东沿海区的东北部 β 值绝大部分为负值，呈下降趋势；浙西南区和浙东沿海区的西南部 β 值为正，呈上升趋势。夏季上升趋势显著的区域主要集中在浙东沿海区的西南部，包括乐清市、瑞安市、洞头县、平阳县、苍南县，年均上升幅度为 80～140 MJ·mm/(hm²·h)；

浙西南区的仙居县、丽水市区和云和县上升趋势显著,年均上升幅度为 50～80 MJ·mm/(hm²·h);浙北区的长兴县、湖州市区和余姚市下降趋势显著,年均下降幅度约为 55～60 MJ·mm/(hm²·h);其他区域变化趋势不显著。所以,夏季降雨侵蚀力上升趋势显著的区域主要分布在浙江省的东南部。

从图 3 可知,秋季浙西北区 β 值分别为负,呈现下降;浙东沿海区 β 值为正,呈上升趋势;浙北区、浙中区和浙西南区 β 值有正有负,浙北浙中区以下降趋势为主,浙西南区以上升趋势为主。浙北区的湖州市区、杭州市区、萧山市降雨侵蚀力下降显著,年均下降幅度为 20～40 MJ·mm/(hm²·h);浙西北区侵蚀力下降显著的区域有安吉县、桐庐县、淳安县和浦江县,年均下降幅度 20～30 MJ·mm/(hm²·h);其他区域变化趋势不显著。由此可见,秋季降雨侵蚀力下降显著的区域主要集中在浙江省的西北部。

冬季浙江省降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值为正(图 3),表明该省冬季降雨侵蚀力呈上升趋势。冬季浙北区和浙西北区侵蚀力上升趋势显著,年均上升幅度为 10～25 MJ·mm/(hm²·h);其次,浙东沿海区的东北部的宁波市区、舟山区和嵊泗县上升趋势亦显著,年均上升幅度为 12～18 MJ·mm/(hm²·h);浙东沿海区其余区域以及浙中区、浙西南区为上升不显著区。因此,冬季降雨侵蚀力上升显著的区域主要分布在浙江省的西部和北部。

3.3.3　月降雨侵蚀力变化趋势空间分布　浙江省降雨侵蚀力年内变化趋势显著的月份有 1,3 和 12 月,其他月份变化趋势不显著。为探讨月降雨侵蚀力变化趋势的空间分布,选择月份 1,3,7 和 10 月为典型月份进行空间变化趋势分析。典型月份降雨侵蚀力变化趋势空间分布如图 4 所示。

从图 4 可得知,1 月降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值均为正,表明在 1 月份浙江省各区降雨侵蚀力均呈现上升趋势;浙西北区、浙中区和浙北绝大部分区域降雨侵蚀力上升趋势显著,年均上升幅度为 6～10 MJ·mm/(hm²·h);浙东沿海区的北部区域上升趋势显著,年均上升幅度在 4～9 MJ·mm/(hm²·h);浙西南区中部上升趋势不显著。可见,1 月该省绝大部分区域降雨侵蚀力上升趋势显著,上升趋势不显著的区域主要集中在浙江省的南部和东南部。

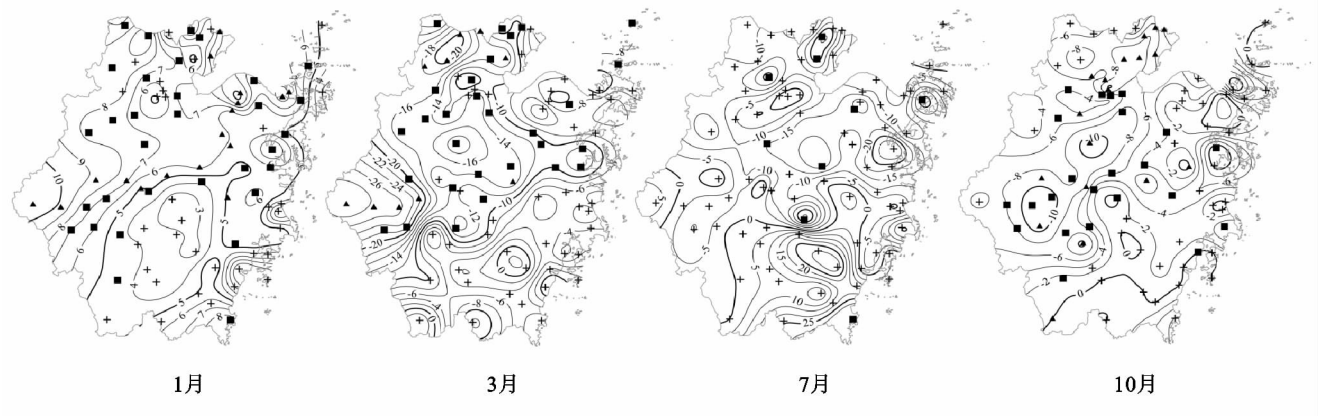


图 4　典型月份降雨侵蚀力变化趋势等值线图

3 月降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值为负(图 4),即该省各区降雨侵蚀力呈下降趋势;下降趋势显著的区域为浙西北区和浙中区,年均下降幅度分别为 12～28 和 6～26 MJ·mm/(hm²·h);浙北区的西北部下降趋势显著,年均下降幅度为 6～20 MJ·mm/(hm²·h);浙西南区和浙东沿海区绝大部分下降趋势不显著。可见,3 月降雨侵蚀力下降显著的区域主要位于浙江省的中部和北部。

7 月份浙西南区和浙东沿海区的西南部降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值为正,降雨侵蚀力呈上升趋势,但上升趋势不显著;其余区域 β 值为负,呈下降趋势。但下降显著的区域零星分布,无明显的集中区。因此,7 月该省各区降雨侵蚀力变化趋势不显著(图 4)。

通过图 4 可知,10 月降雨侵蚀力 Kendall 倾斜度 β 值绝大部分为负,表明 10 月该省降雨侵蚀力总体呈下降趋势。浙中区下降趋势显著,年均下降幅度为 2～10 MJ·mm/(hm²·h);浙北区的萧山市、杭州市、余杭市、桐乡市、海宁市、海盐县、嘉兴市区、嘉善县和平湖市,浙西北区的临安市、富阳市和桐庐县,浙西南区的武义县、遂昌县、江山市、龙游县、衢县和龙泉市,下降趋势显著,年均下降幅度为 4～8 MJ·mm/(hm²·h);浙东沿海区侵蚀力下降显著区域分散。所以,10 月降雨侵蚀力变化趋势显著的区域主要位于浙江省的中部地区。

在空间分布上,对比月、季、年降雨侵蚀力变化趋

势的分布特征，月尺度上的变化显著的区域分布广，主要位于浙中浙北区；季尺度上，秋冬两季变化显著的区域主要位于浙北；春季浙中浙北均有分布；夏季变化显著的区域与年际相似，主要位于浙江省的东南部地区。由于同一季节内各月份之间的综合作用，从典型月份到对应的季节，春秋冬三季降雨侵蚀力变化显著的区域整体上向北移，夏季向南移；再到年际时，降雨侵蚀力变化显著的区域主要移动到了浙江省的东南部。结合降雨侵蚀力的空间分布特征和年内的分配比例，浙江省东南部降雨侵蚀力大，上升趋势显著，应加强这些地区的水土保持措施规划。

4 结 论

(1) 浙江省近 30 a 来平均降雨侵蚀力为 8 473 MJ·mm/(hm^2·h)，年际变差系数为 0.16，逐年降雨侵蚀力以随机变动为主，长期变化趋势不显著；在空间分布上，呈现由西北向东南递增的趋势，浙北、浙西北和浙中区变化梯度小，浙西南和浙东沿海区变化梯度大。

(2) 年内降雨侵蚀力主要集中在春夏两季，占总降雨侵蚀力的 72.39%，而 6—9 月对全年降雨侵蚀力贡献较大；在四季中，冬季降雨侵蚀力上升趋势显著，年均上升幅度为 10.67 MJ·mm/(hm^2·h)；各月份中，1 和 12 月上升趋势显著，年均上升幅度分别为 5.94和 2.01 MJ·mm/(hm^2·h)，3 月下降趋势显著，年均下降幅度为 11.14 MJ·mm/(hm^2·h)。

(3) 全年尺度上，浙江省降雨侵蚀力变化趋势显著的区域位于东南部；在月、季尺度上，该省降雨侵蚀力变化趋势显著的区域主要位于浙北浙中地区，但夏季降雨侵蚀力大，上升趋势显著的区域主要位于该省东南部地区，因此该区降雨潜在侵蚀动能大，是水土保持治理的重点区域。

[参 考 文 献]

[1] Wischmeier W H, Smith D D, Uhland R E. Evaluation of factors in the soil-loss equation[J]. Agricultural Engineering, 1958,39(2):458-462.

[2] Wischmeier W H. A Rainfall erosion index for a universal soil-loss equation[J]. Soil Science Society of American Journal,1959,23(3):246-249.

[3] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力指标的研究[J]. 中国水土保持,1992(2):32-33.

[4] 张宪奎，卢秀琴，詹敏，等. 土壤流失预报方程中 R 指标的研究[J]. 水土保持科技情报,1991(4):48-49.

[5] 陈法杨，王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J]. 水土保持通报,1992,12(1):23-41.

[6] 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.

[7] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity facors for individual storms [J]. Transaction of the ASAE, 1982,25(1):124-129.

[8] Bagarello V, Asaro F D. Estimation single storm erosion index[J]. Transaction of the ASAE, 1994,37(3):785-791.

[9] 王万中，焦菊英，郝小品，等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布Ⅰ.[J]. 水土保持学报,1995,9(4):5-18.

[10] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(1):153-156.

[11] 章文波，付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 张照录，薛重生. 三峡库区日降雨量侵蚀力模型公式[J]. 人民长江,2005,36(11):15-17.

[16] 温美丽，张虹鸥，杨宪杰. 广东省主要站点降雨侵蚀力时间分布规律研究[J]. 热带地理,2007,27(2):102-106.

[17] 马良，左长青，尹忠东，等. 山东省降雨侵蚀力多年变化特征分析[J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):79-85.

[18] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann—Kendall and spearman′s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002,259(1/4):254-271.

[19] Goovaerts P. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity [J]. Catena, 1999, 34(3/4):227-242.

[20] 李良冬，高鹏，穆兴民，等. 辽河流域降雨侵蚀力的时空变化分析[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):69-73.

[21] 马良，姜光辉，左长青，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.

[22] 曹洁萍，迟道才，武立强，等. Mann—Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备,2008(5):35-38.