

湖北省侵蚀性降雨时空分布特征

曹裔¹, 高超², 张晓明¹, 王顺杰¹, 杨清杰¹

(1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖北省水土保持监测中心, 武汉)

摘要: 侵蚀性降雨是南方红壤区剧烈水蚀的原动力, 因此分析其时空分布特征对于区域内水土保持相关研究有十分重要的意义。选取国家气象数据网站数据(2014—2020年)、结合水土保持监测站点人工观测数据(2016—2019年), 对湖北省4个水土保持分区24个监测站点的侵蚀性降雨标准及降雨侵蚀力进行了分析、计算, 并用克里格模型进行插值。结果表明: 湖北省整体的降雨侵蚀力从西北到东南逐渐增加, 与降雨量的空间分布表现出相同特征, 同时降雨量与侵蚀性降雨量表现出高度协同性。全省年平均降雨量813.88~1 590.15 mm(2014—2020年), 多年平均年降雨量为1 201.98 mm, 多年平均侵蚀性年降雨量为603.53 mm。多年平均侵蚀性年降雨量占多年平均年降雨量的50.21%, 多年平均侵蚀性降雨频次(天数)为14次, 平均次侵蚀性降雨量为46.88 mm。根据多年平均半月侵蚀力计算结果分析可知, 湖北省全省多年平均年降雨侵蚀力值为6 650.10 MJ·mm/(hm²·h·a)。省内年内降雨侵蚀力时间分布基本符合正态分布。4—10月总降雨侵蚀力值为6 202.10 MJ·mm/(hm²·h·a), 占全年降雨侵蚀力值的93.26%。研究结果有助于指导省内水土保持规划, 并对不同时段针对性防治水土流失具有一定的参考意义。

关键词: 水土保持; 降雨侵蚀力; 空间插值; 时空分布; 侵蚀性降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0041-06

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Erosive Rainfall in Hubei Province

CAO Yu¹, GAO Chao², ZHANG Xiaoming¹, WANG Shunjie¹, YANG Qingjie¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Soil and Water Conservation Monitoring Center, Wuhan, China)

Abstract: Erosive rainfall is the driving force of severe water erosion in the red soil region of south China. Therefore, it is of great significance to analyze its spatial and temporal distribution characteristics for the study of regional soil and water conservation. In this paper, the erosive rainfall standard and rainfall erosivity of 24 monitoring stations in four soil and water conservation regions of Hubei Province were analyzed and calculated based on the national meteorological data website data and the artificial observation data of soil and water conservation monitoring stations, and the Kriging model was used for spatiotemporal interpolation. The results show that the rainfall erosivity of Hubei Province increased gradually from northwest to southeast, which showed the same characteristics as the spatial distribution of rainfall; annual average rainfall of the whole province ranged from 813.88 mm to 1 590.15 mm, the average annual rainfall was 1 201.98 mm, the annual average erosive rainfall was 603.53 mm; The annual average erosive rainfall accounted for 50.21% of the annual average rainfall, the annual average frequency of erosive rainfall was 14; the average single erosive rainfall was 46.88 mm; according to the calculation results of annual average half month erosivity, the average annual rainfall erosivity of Hubei Province was 6 650.10 MJ·mm/(hm²·h·a); The temporal dis-

收稿日期: 2021-05-31

修回日期: 2021-06-12

资助项目: 国家自然科学基金(41771307, 41201271); 长江科学院开放研究项目(CKWV2017522/KY); 华中农业大学大学生科技创新项目(2021096)

第一作者: 曹裔(1998—), 男, 湖北省恩施人, 硕士研究生, 从事水土保持与荒漠化防治方向研究。E-mail: 897313056@qq.com

通信作者: 张晓明(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事崩塌及土壤侵蚀研究。E-mail: zxm_huanong@mail.hzau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

tribution of annual rainfall erosivity in Hubei Province basically conformed to normal distribution; the total rainfall erosivity from April to October was $6\,202.10\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, accounting for 93.26% of the annual rainfall erosivity. These results are helpful to the planning of soil and water conservation in the province, and it has a certain guiding significance for the prevention and control of soil erosion in different periods.

Keywords: soil and water conservation; rainfall erosivity; spatial interpolation; spatiotemporal distribution; erosive rainfall

雨滴溅蚀与径流剥蚀是降雨引起土壤侵蚀的主要途径^[1],为便于研究降雨引起侵蚀的程度,将各种降雨侵蚀类型引起当地土壤侵蚀的潜在能力总的定义为降雨侵蚀力。在水土保持研究领域,降雨侵蚀力这一因素对于当地侵蚀程度和侵蚀潜力的评估以及相关修复措施的布置规划是十分重要的,因此在通用土壤流失方程 USLE 和修正土壤流失方程 RUSLE 中降雨侵蚀力也是十分重要的研究因子^[2],一般用 R 将其表示。同时, R 因子的大小与很多因素有关,如降雨量、雨强、雨滴特性等。目前学界已有很多对于降雨侵蚀力计算及预估模型的研究,如选取次降雨中的降雨动能 E 和最大 30 min 降雨强度 I_{30} 的乘积计算表示降雨侵蚀力^[3],该公式是基于经验与美国本土降雨实际观测资料得出的衡量当地降雨侵蚀力的方法。我国学者结合国内研究区域实际状况,做出了根据次降雨中降雨动能与雨强降雨量计算降雨侵蚀力^[4-5],根据逐日降雨量计算年平均降雨侵蚀力^[6]等研究。在众多降雨侵蚀力计算模型中,通过逐日降雨量计算月降雨侵蚀力最终合成年降雨侵蚀力的计算模型相对来说稳定性最好^[7]。近年来,随着科学技术手段的不断发展,对于降雨侵蚀力进行计算的时序也越来越精细化,Jennifer Kreklow 研究了通过雷达对降雨数据进行采集的方法^[8],与传统雨量计相比,气象雷达具有超高时空分辨率,超大尺度的优点。但是我国的现代化水土保持事业起步较晚,很多地区观测站点的降水资料内容不全,降雨强度及降雨动能等数据较难获得,因此通过较为容易获得的降雨量资料计算降雨侵蚀力成为一种十分可行的方法。而用于计算的降雨量资料一般分为年降雨量资料、月降雨量资料以及日降雨量资料,其中月或年降雨量资料最容易获取,因此早期研究也多集中于此,如 Renard Kenneth G 等用月降水量数据估算通用流失方程中的 R 因子^[9]。但由于月或年降雨量时间跨度较大,无法反映降水年内分布,通过该方法对降雨侵蚀力进行估算精度无法得到保证。因此通过逐日降雨量对降雨侵蚀力进行计算的方法在确保可行性的同时也大大提升了精度,同时还能反映降雨侵蚀力的年内变化特征,章文波^[10]及 Richarchson^[11]等就提出了基于逐日

降雨量的降雨侵蚀力模型,这些模型中都有能反映当地降雨特征的参数,这大大增加了模型在不同地区推广应用的可行性。在降雨量资料年限时长的选取方面,金建君等^[12]通过分析认为,当降雨资料年限时长超过五年时,其计算结果的相对误差已经在可接受范围内。在研究区域尺度选取上,多为以一整个区域^[13-14]或不同水系^[15]为基础进行侵蚀性降雨研究,而较少选择研究区域内已有的二级或三级水土保持区划。本文尝试将人工观测记录数据与逐渐兴起的自动化监测设备观测记录数据结合,通过逐日降雨量资料并考虑湖北省内水土保持分区状况,对不同水土保持分区及全省范围内降雨侵蚀力的时空分布特征进行研究。

1 研究区概况

湖北省介于北纬 $29^{\circ}01'53''$ — $33^{\circ}6'47''$ 、东经 $108^{\circ}21'42''$ — $116^{\circ}07'50''$,东西长约 740 km,南北宽约 470 km,总面积 18.59 万 km^2 ,占中国总面积的 1.94%。其地形东、西、北三面环山,中间低平,略呈向南敞开的完整盆地。在全省总面积中,山地占 56%,丘陵占 24%,平原湖区占 20%,属长江水系。湖北省地处亚热带,全省除高山地区属高山气候外,大部分地区属亚热带季风性湿润气候,因此降水资源充沛,且多集中在 5—9 月,土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,在花岗岩地区及西南部分土石山区也发生有水力与重力共同影响下的崩岗、泥石流等混合侵蚀(引自湖北省人民政府)。

在全国水土保持区划中,湖北省横跨南方红壤区与西南紫色土区两个一级区。省内包括 5 个二级水土保持分区,分别是大别山—桐柏山山地丘陵区、长江中游丘陵平原区、江南山地丘陵区、秦巴山山地区以及武陵山山地丘陵区。其中大别山—桐柏山山地丘陵区、长江中游丘陵平原区及江南山地丘陵区这 3 个二级分区位于南方红壤区内,秦巴山山地区以及武陵山山地丘陵区这两个二级分区位于西南紫色土区内。由于武陵山山地区与长江中游丘陵平原大致处于同一纬度范围内,降雨类型大致相同,因此将两区合为一个水土保持分区进行计算(图 1)。全省共有 24 个自动观测站点,其中 7 个位于大别山—桐柏山山地丘陵区,2 个位于

江南山地丘陵区,5 个位于秦巴山山地区,10 个位于长江中游丘陵平原区和武陵山地丘陵区。本文采用的自动化监测设备观测站点数据均来自于中国气象网湖北省 2014—2020 年资料,人工记录数据来自于湖北省水土保持监测站点整编数据。

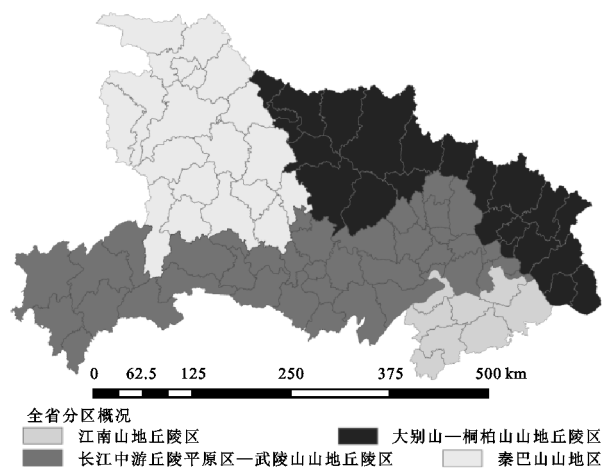


图 1 全省分区状况

2 研究方法

2.1 侵蚀性降雨雨量标准的计算

并不是每次降雨都会产生侵蚀,只有当降雨达到一定条件后才有可能造成土壤侵蚀。在对于降雨量的研究中,当降雨量超过某一个临界点后才能达到造成土壤侵蚀的条件,称这一临界点为侵蚀性降雨雨量标准^[16]。设置这一标准有助于筛选出真正造成侵蚀的降雨,能在减少工作量的同时提升结果精度。

对于侵蚀性降雨雨量标准的计算,采用王万忠^[16]提出的侵蚀性降雨一般雨量标准的计算模型。该计算方法是将逐日降雨量进行降序排列,对每次降雨量 R' 产生的侵蚀量进行累加,从而得到侵蚀性降雨的总侵蚀量 q ,每次降雨对应的累计侵蚀量为 Q ,再以次降雨量 R' 为横坐标,累计侵蚀量 (Q) 占总侵蚀量 (q) 的百分比 P 为纵坐标绘制曲线并进行拟合,当 P 为某个值时,其对应的次降雨量 R' 即为侵蚀性降雨一般雨量标准,具体公式如下:

$$P = \frac{Q}{q} \times 100\% \quad (1)$$

$$P = a \ln R' + b \quad (2)$$

式中: P 为累计侵蚀量占总侵蚀量的百分比(%); Q 为累计侵蚀量(kg); q 为总侵蚀量(kg); R' 为次降雨量(mm); a 、 b 为每个站点具体的拟合公式参数,由各站点 P 与 R' 曲线拟合得出。

根据湖北省水土流失特点及下垫面因素,选取 P 等于 90%,即拟定的侵蚀性降雨雨量标准以上的降雨量引起土壤流失的概率为 90%,代入公式(2),在曲线上找

到对应的次降雨量 R' ,即为侵蚀性降雨雨量标准。

2.2 降雨侵蚀力的计算

对于降雨侵蚀力的计算,采用章文波^[10]的基于日降雨量的半月侵蚀力计算模型,具体公式如下:

$$R = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (3)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \alpha P_{i,j,k}^{\beta} \quad (4)$$

式中: R 为多年平均年降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; k 为一年的 24 个半月, $k=1,2,3,\dots,24$; i 为所用降雨资料的年序, $i=1,2,3,\dots$; j 为第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨日的日序, $j=1,2,3,4,5,\dots$; d 为第 k 个半月的总天数, $d=13,14,15,16$; $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量(mm); α 、 β 为参数,由各个站点的实际降雨量计算得出,计算公式如下:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_d} + \frac{24.455}{P_y} \quad (5)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (6)$$

式中: P_d 为侵蚀性降雨的日平均降雨量(mm); P_y 为侵蚀性降雨的年平均降雨量(mm)。

2.3 空间插值方法

目前通过 ArcGIS 进行空间插值的方法大致有以下几种:反距离加权模型(IDW)、样条函数模型(SPLINE)、克里格模型(Kriging)。黄利燕等^[17]通过对比分析认为,在站点数量较为适宜时,克里格模型预测效果要明显优于其他几种模型。李巍等^[18]对普通克里格模型(OK)与协同克里格模型(OCK)进行对比认为,相同情况下协同克里格模型还考虑了高程因素,因此其预测结果要更为精准。在相同情况下,反距离加权模型的可行性最高,预测结果精确性适中。综合考虑计算结果精确性与可行性,本文采用普通克里格方法进行空间插值,具体公式如下:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n z_i w_i \quad (7)$$

式中: \hat{Z}_0 是待估算降雨量的气象站; z_i 是已知气象站 i 的降雨量数值; w_i 是气象站 i 的权重; n 表示参与计算的已知气象站数量。

2.4 各站点权重确定方法

采用泰森多边形法对各站点权重进行分析确定,即将所有相邻站点连成三角形,作这些三角形各边的中垂线,于是每个气象站周围的若干垂直平分线便围成一个多边形,该多边形即代表该站点的实际控制面积,将其控制面积占总面积的百分比作为每个站点在平均降雨侵蚀力计算中的权重(图 2—3)。

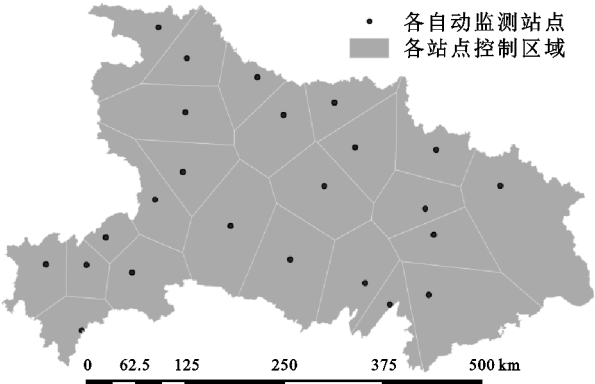


图 2 全省自动监测站点分布及泰森多边形

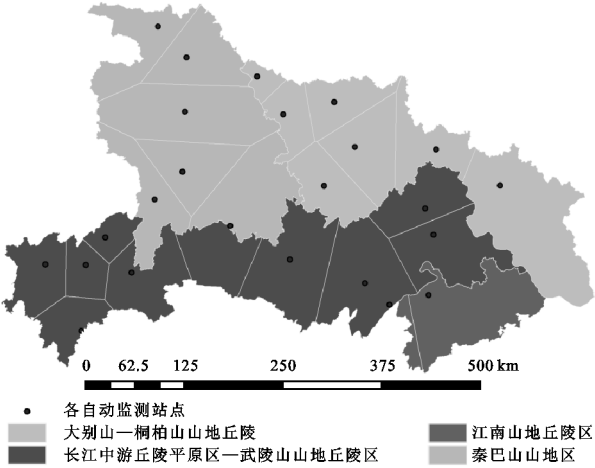


图 3 各分区内站点控制面积

3 结果与分析

3.1 湖北省降雨量及侵蚀性降雨量特征分析

从地理位置来看,湖北省位于亚热带季风性气候区,降雨充沛且降雨时段集中。由 2014—2020 年这 7 a 间数据分析可知,全省年平均降雨量在 813.88~1 590.15 mm,其中年降雨量最低年份为 2019 年,最高年份为 2020 年。年平均侵蚀性降雨量在 319.99~864.14 mm,其中侵蚀性降雨量最低年份为 2019 年,最高年份为 2020 年(图 4)。多年平均年降雨量为 1 201.98 mm,多年平均侵蚀性年降雨量为 603.53 mm(表 1)。多年平均年侵蚀性降雨量占多年平均年降雨量的 50.21%,年平均侵蚀性降雨频次(天数)为 14 次,平均次侵蚀性降雨量为 46.88 mm。且由年降雨量与年侵蚀性降雨量曲线可以看出,年降雨量 P 与年侵蚀性降雨量 P_y 之间存在着明显的相关性,通过趋势线拟合可得二者之间关系为 $P_y = 0.752P - 311$,相关性可达 0.980 9(图 5)。

从分区来看,全省降雨量大致呈现从西北向东南增加的趋势,其中秦巴山山地区多年平均年降雨量及多年平均侵蚀性年降雨量都为最低,其多年平均

年降雨量为 995.13 mm,多年平均侵蚀性年降雨量为 489.97 mm。而江南山地丘陵区多年平均年降雨量及多年平均侵蚀性年降雨量均为最高,其多年平均年降雨量为 1 507.54 mm,多年平均侵蚀性年降雨量为 1 172.39 mm(图 6)。总体上多年平均年降雨量及多年平均侵蚀性年降雨量排序为秦巴山山地区<大别山—桐柏山山地丘陵区<长江中游丘陵平原区—武陵山山地丘陵区<江南山地丘陵区。

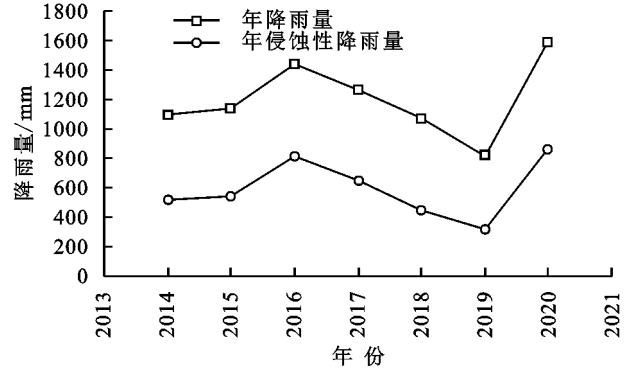


图 4 年降雨量与年侵蚀性降雨量

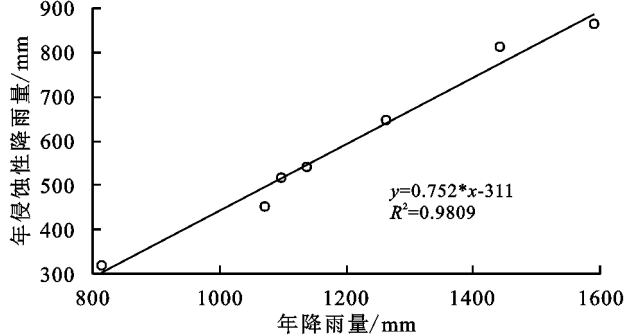


图 5 年降雨量与年侵蚀性降雨量相关性

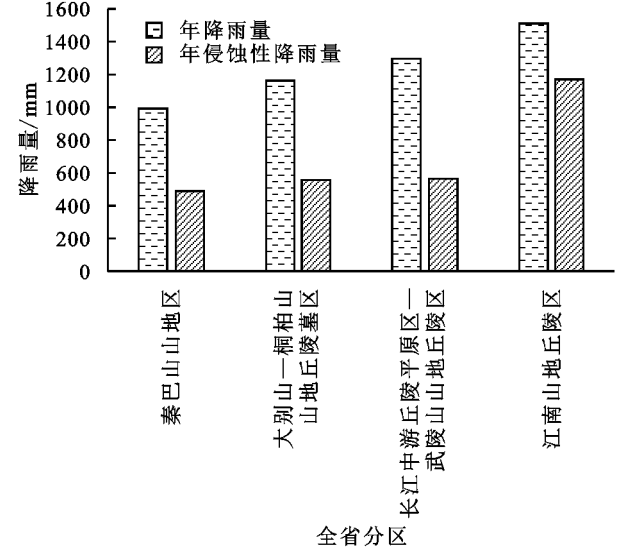


图 6 各分区多年平均年降雨量及多年平均侵蚀性年降雨量

3.2 湖北省降雨侵蚀力时空分布特征分析

根据多年平均半月侵蚀力计算结果分析可知,湖北省地区年内降雨侵蚀力时间分布大致符合正态分布(图 7)。从 4 月份开始随着降雨量的增多,侵蚀性

降雨量及频次随之增多,导致降雨侵蚀力随之上升,4 月份上旬降雨侵蚀力达到 $370.73 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,此后降雨侵蚀大致呈增加趋势,至 7 月上旬达到最大值 $1\,170.62 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,然后逐渐降低。全年降雨侵蚀集中发生在 4—10 月份,该时间段恰好是全年降雨集中发生的时间段,4—10 月总降雨侵蚀

力值为 $6\,202.10 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,占全年降雨侵蚀力值的 93.26%。说明降雨量对于降雨侵蚀力的影响十分显著,通过半月降雨量 $P_{\text{半月}}$ 及半月侵蚀力 $\bar{R}_{\text{半月}}$ 曲线可以看出,两者有十分明显的协同性(图 8),两者关系可用拟合公式 $\bar{R}_{\text{半月}} = 9.7P_{\text{半月}} - 209$ 表示,相关系数达 0.924 9(图 9)。

表 1 全省降雨信息

分区	多年平均侵蚀性 降雨天数/d	多年平均侵蚀性 日降雨量/mm	多年平均侵蚀性 年降雨量/mm	多年平均年 降雨量/mm	多年平均年降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
秦巴山山地区	14	38.03	489.97	995.13	4450.56
大别山—桐柏山山地丘陵区	11	53.26	556.18	1162.52	7299.48
长江中游丘陵平原区—武陵山山地丘陵区	11	52.56	559.40	1295.32	6736.10
江南山地丘陵区	36	32.87	1172.39	1507.54	10110.35
全省平均	14	46.88	603.53	1201.98	6650.10

湖北省整体的降雨侵蚀力从西北到东南逐渐增加(图 10),与降雨量的空间分布表现出相同特征。从不同分区来看,位于湖北省西北部的秦巴山山地区多年平均降雨侵蚀力为 $4\,450.56 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,为全省最小值。而位于湖北省东南部的江南山地丘陵区多年平均降雨侵蚀力为 $10\,110.35 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,为全省最大值,比秦巴山山地区多年平均降雨侵蚀力高出 127.17%。分析具体原因为秦巴山山地区较江南山地丘陵区纬度高,且更为靠近内陆,受大陆性气候影响更深。而江南山地丘陵区纬度更低,更为靠近海洋,且地势较为平坦无高大山脉阻断海洋暖湿气流吹入,因此降雨较秦巴山山地区更为充沛且集中,这种集中且大量的降雨其本身的动能较大,更容易引起土壤侵蚀的发生,因此降雨侵蚀力更高。而比较大别山—桐柏山山地丘陵区与长江中游丘陵平原区—武陵山山地丘陵区,两者多年平均降雨侵蚀力较为接近,前者略高于后者。其中大别山—桐柏山山地丘陵区年降雨侵蚀力为 $7\,299.48 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,长江中游丘陵平原区—武陵山山地丘陵区年降雨侵蚀力为 $6\,736.10 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,前者比后者高出 8.36%。分析其原因是因为两部分地区纬度相差不大,雨热条件较为接近,因此降雨侵蚀力差别不大。

4 讨论

在湖北省相关水土保持规划中,应重点考虑该时间段内特别是 7 月份前后的具体水土保持措施,做好应对短历时强降雨气候类型造成土壤侵蚀的准备。同时由于湖北省东西向跨度大,因此省内气候条件较为复杂,不完全是典型的亚热带季风性气候,越靠近西部内陆其气候中的大陆性特征越明显降雨量及侵蚀性降雨频次(天数)越低。而越靠近东部,其气候受

海洋季风影响越显著,特别是江南山地丘陵区,其气候特征与典型的亚热带季风性气候区已十分接近,且降雨发生时段、降雨量及降雨侵蚀力等与临近省份江西已无明显差别^[19]。因此在对湖北省整体进行水土保持规划时,不仅要注意降雨量的年内时间分布,还要注意其在空间上的东西横向分布。

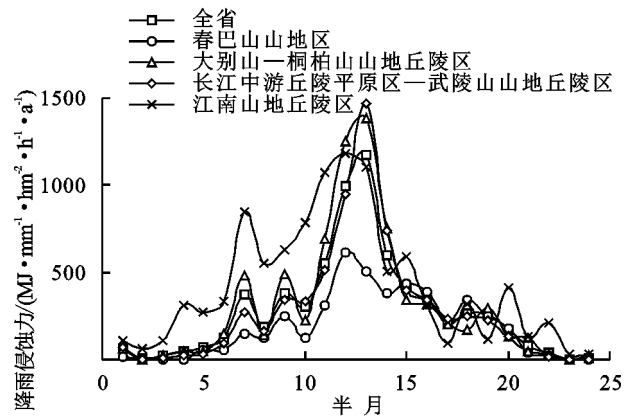


图 7 年内半月降雨侵蚀力分布

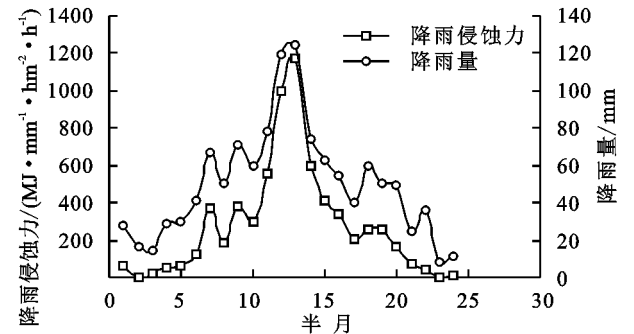


图 8 半月降雨量与半月侵蚀力

本文在降雨量层面上研究讨论其与降雨侵蚀力之间的关系,而每次侵蚀性降雨的降雨特征如次降雨雨强、最大 30 min 雨强及降雨历时等都会对降雨侵蚀力产生更深层次的影响,同时侵蚀性降雨产生的径流量以及地面植被覆盖状况等也是影响土壤侵蚀发

生特别是影响红壤地区土壤侵蚀发生的重要因素^[20],后续研究可在此基础上继续深入。

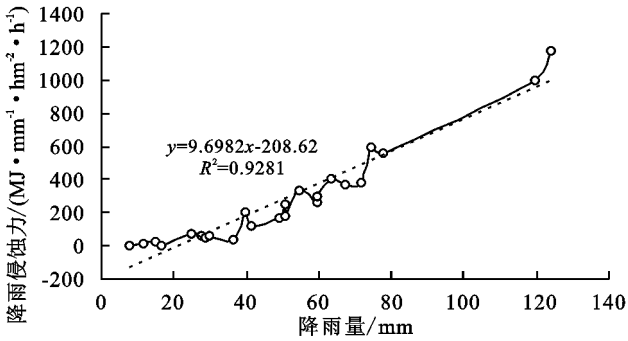


图 9 半月降雨量与半月侵蚀力相关性

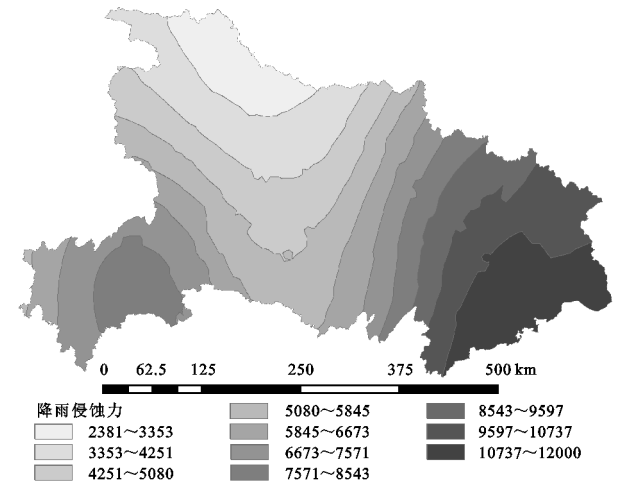


图 10 降雨侵蚀力等值线

5 结论

(1) 湖北省降雨充沛且降雨时段集中,多年平均年降雨量为 1 201.98 mm,集中降雨时段为每年 4—10 月,年内侵蚀性降雨也多集中于该时段,多年平均侵蚀性年降雨量为 603.53 mm,占多年平均年降雨量的 50.21%,其中 4—10 月总降雨侵蚀力值为 6 202.1 MJ·mm/(hm²·h·a),占全年降雨侵蚀力值的 93.26%。

(2) 在对降雨侵蚀力造成影响的各个因素中,降雨量占据着十分主要的地位,年降水量 P 与年侵蚀性降水量 P_y 之间存在着明显的相关性,通过趋势线拟合可得二者之间关系为 $P_y = 0.752P - 311$,相关性可达 0.980 9。而侵蚀性降水量直接影响着降雨侵蚀力的大小,对半月降雨量 $P_{\text{半月}}$ 及半月侵蚀力 $\bar{R}_{\text{半月}}$ 拟合可得二者关系表达式 $\bar{R}_{\text{半月}} = 9.7P_{\text{半月}} - 209$,相关系数 0.938 1。

(3) 全省范围内的降雨侵蚀力空间分布总体上呈现自西北向东南增加的趋势,位于湖北省西北部的秦巴山山地区多年平均降雨侵蚀力为 4 450.56 MJ·mm/(hm²·h·a),为全省最小值。而位于湖北省东南部的江南山地丘陵区多年平均降雨侵蚀力为 10 110.35

MJ·mm/(hm²·h·a),为全省最大值,其他两个分区降雨侵蚀力差别不大。总体排序为秦巴山山地区<长江中游丘陵平原区—武陵山山地丘陵区<大别山—桐柏山山地丘陵区<江南山地丘陵区。

致谢:在数据处理以及论文撰写过程中,感谢湖北省水土保持监测中心及各级监测点对于本文的数据支持以及相关指导。

参考文献:

[1] Huang J, Zhang J, Zhang Z, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960—2005 in the Yangtze River basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013,27(2):337-351.

[2] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE)[R]. United States Government Printing, 1997.

[3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [R]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

[4] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等.黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法[J].水土保持通报,2016,36(2):204-208.

[5] 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.

[6] 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.

[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] Kreklow J, Steinhoff-Knopp B, Friedrich K, et al. Comparing rainfall erosivity estimation methods using weather radar data for the State of Hesse(Germany)[J]. Water, 2020,12(5):1424.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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):153-0156.

[12] 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.

[13] 王普.肇庆市水土流失关键因子提取:以降雨侵蚀力 R 为例[J].水利科技与经济,2021,27(2):35-40.

[14] 郭达,宋小宁,董震,等.基于 RUSLE 与 GIS 的黄土高原水土流失评价研究:以宁夏中卫地区为例[J].泥沙研究,2020,45(5):55-60.

(3) 山丘区输电工程形成的侵蚀单元修复过程中引入了恢复生态学相关理论,遵循因地制宜、因害设防的治理理念,对各侵蚀单元进行近自然的生态系统恢复和重建。针对各侵蚀单元水土流失特征采取临时措施、工程措施和植物措施等措施组合。

由于受数据可获得性限制,本文在输电工程扰动土壤侵蚀特征分析时,只选择了工程施工期的水土流失特征进行研究,提出水土保持措施典型设计。在后续研究中可增加对工程治理措施实际作用的监测数据,以精确评估水土保持措施的效果,提高水土保持措施的治理成效和可实践性。

参考文献:

[1] O' Faircheallaigh C. Public participation and environmental impact assessment: Purposes, implications, and lessons for public policy making[J]. Environmental impact assessment review, 2010,30(1):19-27.

[2] Li B J, Niu D X, Lu Y, et al. Analysis of the surplus rate of power transmission and transformation project cost based on grey correlation analysis[R]. Electrical Engineering and Information Science, 2016.

[3] Jaiswal R K, Mukherjee S, Raju K D, et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2002,4(1):1-10.

[4] 孙中峰,杨文姬,宋康.输变电工程建设低扰动水土保持技术研究:以山西省输变电工程为例[J].水土保持研究,2014,21(3):62-67.

[5] 刘宪春.浅论开发建设项目水土保持监测指标[J].水土保持通报,2007,27(4):67-70.

[6] 闫超.输变电类生产建设项目水土流失特点及水土保持综合效益评价研究[D].南京:南京农业大学,2013.

[7] 刘卉芳,徐永年,池春青,等.云南省输变电工程水土流

失特点浅析[J].水土保持研究,2008,15(2):133-135.

[8] 孙中峰,蔡建勤,王愿昌,等.山西省输电线路工程水土保持方案相关问题探讨[J].水土保持通报,2008,28(5):21-24.

[9] 贺金生,卜海燕,胡小文,等.退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J].科学通报,2020,65(34):3898-3908.

[10] Gayer K. Der gemischte Wald, seine Begründung und Pflege, insbesondere durch Horst-und Gruppenwirtschaft[M]. Berlin:Parey, 1886.

[11] 姜义宝,史东梅,蒋平,等.紫色丘陵区城镇化不同地貌单元的水文特征及土壤重构[J].土壤学报,2018,55(3):650-663.

[12] 陆元昌,张守攻,雷相东,等.人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J].世界林业研究,2009,22(1):20-27.

[13] 艾晓燕.黑龙江省风电工程水土流失防治技术探讨[J].中国水土保持,2010(12):16-18.

[14] 易仲强,张宇,魏浪,等.西藏输变电类生产建设项目水土流失防治探讨[J].中国水土保持,2019(1):11-13.

[15] 张宇,易仲强,张习传,等.西藏输变电工程水土流失特点及防治措施分析[J].中国水土保持,2015(6):65-67.

[16] 潘晓颖,张长伟,孙蓓.输变电工程特征及其水土流失防治措施[J].人民长江,2016,47(23):28-30,75.

[17] 尹武君,邓川,杨晓瑞,等.特高压输电线路工程水土保持专项设计探讨[J].四川环境,2020,39(2):151-155.

[18] 张凤梅.山西省输变电工程水土流失特点及防治措施体系研究[D].北京:北京林业大学,2014.

[19] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[20] 姬婧,刘富齐,张登明.平顶山市区采煤塌陷地治理现状与分区治理措施探讨[J].煤炭工程,2006(7):69-71.

[21] 王德起,王霖琳,朱海坤,等.门头沟煤矿区生态修复功能及生态农业工程规划[J].农业工程学报,2007,23(11):138-141.



(上接第 46 页)

[15] 朱大运,杨倩,陈海,等.1960—2017 年贵州省不同水系降雨侵蚀力时空变异特征[J].水土保持通报,2021,41(1):6-14.

[16] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究Ⅲ:关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报,1984,4(2):58-63.

[17] 黄利燕.基于 ArcGIS 不同空间插值方法的降雨量预测

效果对比[J].北京测绘,2019,33(7):759-762.

[18] 李巍,范文义,毛学刚,等.降雨量空间插值方法比较研究[J].安徽农业科学,2014,42(12):3667-3669.

[19] 郑海金,杨洁,左长清,等.红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J].水土保持研究,2009,16(3):30-33.

[20] 魏静,马洪超.降雨对红黏土区土壤侵蚀的影响[J].西部大开发:土地开发工程研究,2019,4(7):52-55,60.