

# 极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应

## ——以山东临朐台风“利奇马”暴雨为例

刘元昊<sup>1</sup>, 韩剑桥<sup>1,2</sup>, 焦菊英<sup>1,2</sup>, 戈文艳<sup>1,2</sup>, 刘宝元<sup>2</sup>,  
黑哲<sup>2,3</sup>, 从辰宇<sup>1,2</sup>, 谢梦霞<sup>1</sup>, 马春玲<sup>1</sup>, 王飞<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100000)

**摘要:** 全球气候变化背景下, 极端暴雨事件出现频率增加, 研究小流域洪峰形成机理对暴雨洪水预测与防灾减灾具有重要意义。基于2019年9号台风“利奇马”在山东省潍坊市临朐县造成的特大暴雨事件, 选取暴雨中心附近的17个小流域, 综合应用野外调查、遥感解译等方法, 研究了小流域洪峰强度和敏感性对植被和梯田的响应特征。结果表明: 该暴雨事件中, 小流域洪峰流量为2.36~56.50 m<sup>3</sup>/s, 洪峰模数为8.00~48.89 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>), 洪水指数介于3.61~4.55。在相似降雨条件下, 洪峰模数、洪水指数与坡耕地比例呈显著的正相关关系( $p < 0.05$ ), 洪峰模数与林草地和梯田比例呈显著的负相关关系( $p < 0.05$ ), 洪水指数与林草地和梯田比例呈一定的负相关关系。植被和梯田对洪峰影响的有效性随着次降雨量的增大, 呈现先增加后降低的非线性特征; 在极端暴雨条件下, 调查流域对洪水的敏感性属于“Average”水平; 增加林草地、梯田等土地类型的面积可提高小流域对极端暴雨的应对能力。

**关键词:** 极端暴雨; 洪峰模数; 洪水指数; 植被; 梯田

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)05-0020-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.003

## Response of Small Watershed Flood Peak to Vegetation and Terraces Under Extreme Rainstorm

— A Case Study of the Rainstorm of Typhoon “Lekima” in Linqu, Shandong Province

LIU Yuanhao<sup>1</sup>, HAN Jianqiao<sup>1,2</sup>, JIAO Juying<sup>1,2</sup>, GE Wenyan<sup>1,2</sup>, LIU Baoyuan<sup>2</sup>,  
HEI Zhe<sup>2,3</sup>, CONG Chenyu<sup>1,2</sup>, XIE Mengxia<sup>1</sup>, MA Chunling<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University,

Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000)

**Abstract:** Under the background of global climate change, the frequency of extreme rainstorm events increases. It is of great significance to study the formation mechanism of flood peak in small watershed for rainstorm flood prediction, disaster prevention and mitigation. Based on the extraordinary rainstorm event caused by Typhoon “Lekima” in Linqu County, Weifang City, Shandong Province in 2019, 17 small watersheds near the rainstorm center were selected, and the response characteristics of the flood peak intensity and sensitivity of the small watersheds to the vegetation and terraces were studied by the methods of field investigation, remote sensing interpretation and correlation analysis. The results showed that in this rainstorm event, the peak discharge of small watershed was 2.36~56.50 m<sup>3</sup>/s, the peak modulus was 8.00~48.89 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>), and the flood index was between 3.61 and 4.55. Under the condition of similar rainfall, the flood peak modulus, flood index K had significant positive correlation with proportion of sloping farmland ( $p < 0.05$ ), and the flood peak modulus had a significant negative correlation with the proportion of forest grassland and terrace ( $p < 0.05$ ), the flood index K had negative correlation with the proportion of forest grassland and terrace. With the increasing of individual rainfall, the influence of vegetation and terraces on flood peak in small watershed presented a nonlinear feature of

收稿日期: 2020-06-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501707); 国家自然科学基金项目(41771558, 41807067); 陕西省水利水保科技项目(2017sbkj-01)

第一作者: 刘元昊(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事流域综合管理研究。E-mail: liuyuanhao998@163.com

通信作者: 王飞(1971-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

increasing first and then decreasing. Under the condition of extreme rainstorm, the sensitivity of surveyed watershed to flood was "Average". The ability of small watershed to cope with extreme rainstorm could be improved by increasing the area of forest, grassland, terrace and other land types.

**Keywords:** extreme rainstorm; flood peak modulus; flood index K; vegetation; terraces

全球气候变化背景下,我国特大暴雨的发生频次和影响范围显著增加。极端暴雨形成洪水,严重威胁居民人身财产安全,导致工农业与城市经济遭受重大损失<sup>[1]</sup>。研究洪峰形成机制对极端暴雨致灾机理与防灾减灾具有重要的理论与实践意义。

小流域作为汇集洪水的基本单元,是暴雨产流的源头。极端暴雨可能在流域内导致严重的山洪、泥石流、滑坡等自然灾害。在自然和模拟降雨的条件下,已经有学者<sup>[2-3]</sup>发现水土保持措施在防洪减灾方面发挥着重要的作用,一系列水土保持措施已经被用于在减少径流和水土流失方面<sup>[4]</sup>;随着小流域内林草地面积的增加,洪水径流量减小<sup>[5]</sup>,并且林草地在减少径流方面的有效性随次降雨量而改变<sup>[6]</sup>,而坡耕地面积的增加会导致洪水径流的增加<sup>[7]</sup>;黄土高原在实施退耕还林(草)之后,相同降雨所产生的洪水径流量显著减少<sup>[8]</sup>,Zhu<sup>[9]</sup>发现在重现期大于20年的降雨中,植被和梯田减少洪峰流量的作用会减弱。上述的研究成果表明,流域内植被和梯田等水土保持措施可以显著影响产流过程,但在极端暴雨下,植被和梯田等水土保持措施对洪峰的作用及有效性还需加强研究。

为此,本文基于2019年8月10日发生于山东省潍坊市临朐县的利奇马台风暴雨事件,通过野外调查、室内解译分析等方法,研究了小流域内的洪峰模数和洪水指数对植被和梯田的响应特征,以为流域土地利用规划提供依据,为人类应对极端洪涝灾害提供支撑。

## 1 研究区域

台风“利奇马”于8月10日1时45分许在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有16级(52 m/s),又于8月11日20时50分许在山东省青岛市黄岛区沿海再次登陆,此后其移入渤海海面并不断减弱,最终于8月13日14时被中央气象台停止编号。“利奇马”在山东造成的过程降雨强度位列历史第一,在8月11日20时至12日16时台风过境期间,潍坊市临朐降水量385.4 mm打破了当地单日降水极值纪录<sup>[10]</sup>。

临朐县隶属于山东省潍坊市,地处山东半岛中部,地理位置北纬36°04′—36°37′,东经118°14′—118°49′。地形南高北低,总面积1 831.23 km<sup>2</sup>,土地利用以耕地和林草地为主,其他土地利用类型比例较小。该地区多年平均降雨量为695.1 mm,汛期(6—9月)的降水量占全年降水量的70%~80%。在调查过程中发

现研究区域内,部分沟道两旁的树木倒塌或被洪水冲走,但是未发现形成明显的类似于堰塞湖阻碍行洪的现象。为了客观评价植被和梯田对小流域洪峰的响应特征,在选取沟道时回避了出现这些情况的沟道,根据沟道的分布位置共选取了17个小流域(图1),进行极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应研究。

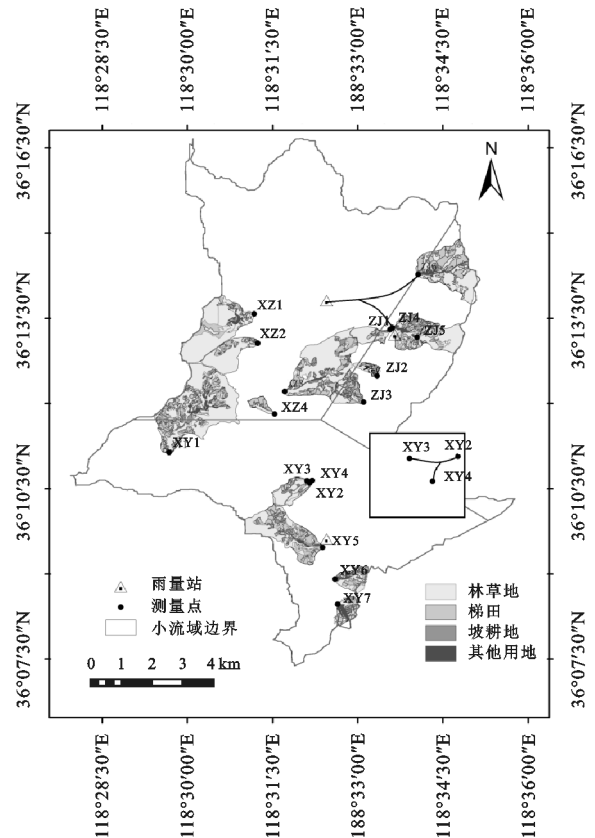


图1 研究区域

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 降雨数据来源

本次台风“利奇马”降雨的降雨资料来源于潍坊市水文局收集的西沂山、辛庄子、曾家沟3个雨量站,时间为2019年8月10日6时至8月12日15时。各雨量站位置见图1,次降雨量数据见表1。其中曾家沟雨量站所监测到的次降雨量、平均雨强和最大瞬时雨强均为最大。

### 2.2 土地利用方式数据来源与处理

小流域的土地利用数据来源为2019 CNES Airbus影像,空间分辨率为0.5 m。利用遥感数据集在ArcGIS 10.2上采用目视解译将小流域土地利用方式划分按照水土保持措施分为4类:林草地、梯田、坡耕地和其他用地。

表 1 台风“利奇马”过境期间研究区雨量站降雨数据

站名	东经	北纬	次降 雨量/mm	平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	最大瞬时雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )
西沂山	118°55'	36°16'	356.00	6.25	106.42
辛庄子	118°55'	36°23'	501.00	8.79	138.46
曾家沟	118°58'	36°21'	570.60	10.01	240.00

### 2.3 洪峰数据获取与处理

洪峰数据采用野外调查洪痕、地形与沟道糙率后计算得到。在研究区域内选取典型小流域的沟口断面进行测量,采用洪痕法测量最大过水面积。根据沟道左右岸洪痕位置测量宽度获取洪痕数据,对于宽度小于 3.0 m 的沟道每隔 0.5 m 测量 1 次深度,对于宽度大于 3.0 m 的沟道每隔 1.0 m 测量 1 次深度,在 CAD 软件上计算断面过水面积。沟道断面过水面积变化不大时,各断面流速相近,可按均匀流,将水面比降近似取沟道比降,沟道比降使用 Google Earth 确定,采用内插值法进行计算,在沟道口每沿 20.0 m 取 1 个 100.0 m 的距离计算比降,进行 3 次最后将计算的结果取平均值作为沟道比降。糙率系数按照河床材质与组成确定,因为所量取的沟道都在山区,沟道口分布有块石,糙率的取值要大于一般的河道,参考关于山区沟道糙率的相关文献<sup>[11]</sup>,糙率的取值范围在 0.035~0.067。本研究根据沟床结构和分布在沟床上的石块,采用目测法确定沟道的糙率取值。沟床较为固定,沟内石较为单一,由于洪水冲刷造成沟底不平整的地方,糙率取 0.045;其他块石相比明显较少的地方,糙率取 0.040。沟道的洪峰流量采用曼宁公式计算<sup>[12-13]</sup>。

$$Q_{\max} = \frac{1}{n} AR^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

式中: $Q_{\max}$ 为洪峰流量(m<sup>3</sup>/s); $n$ 为糙率系数; $A$ 为断面面积(m<sup>2</sup>); $R$ 为水力半径(m); $I$ 为水面比降。

采用洪峰模数和洪水指数分别作为洪峰的(强度和敏感度)表征指标。对于洪峰模数的计算,流域面积采用 Google Earth 勾画确定,洪峰模数按下式计算:

$$C = \frac{Q_{\max}}{F^m} \quad (2)$$

式中: $C$ 为洪峰模数(m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>)); $F$ 为沟道口的集水面积(km<sup>2</sup>); $m$ 为面积比指数,参考针对小流域和极小流域洪峰模数的研究的相关研究<sup>[14]</sup>, $m$ 取 2/3。

同时,本文引入洪水指数表征洪峰的危害特性, Bryndal 等<sup>[15-16]</sup>认为该指数  $K$  能够评估流域对洪水的敏感程度。较高的指数表明流域更容易发生大规模洪灾。这组包络曲线适用于研究观测数据不足地区的特大洪水,评估小流域对洪水的敏感程度<sup>[17]</sup>。公式为:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_0} = \left(\frac{F}{F_0}\right)^{(1-\frac{K}{10})} \quad (3)$$

$$K = 10 \left(1 - \frac{\log_{10} Q_{\max} - 6}{\log_{10} F - 8}\right) \quad (4)$$

式中: $Q_0$ 是阈值流量(10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s); $F_0$ 是阈值集水面积(10<sup>8</sup> km<sup>2</sup>); $K$ 为洪水指数。

### 2.4 数据分析

在研究区域内选取了 17 个小流域,根据潍坊市水文局提供的雨量站信息在 Arcmap 软件上绘制泰森多边形,确定各个雨量站的控制范围。按雨量站的控制范围将各小流域划分为 3 组,其中 XY 组为次降雨量为 501.00 mm 的 7 个小流域,XZ 组为次降雨量为 356.00 mm 的 4 个小流域,ZJ 组为次降雨量为 570.60 mm 的 6 个小流域。小流域跨越 2 个雨量站控制范围的,按照沟道口所在的位置进行划分。

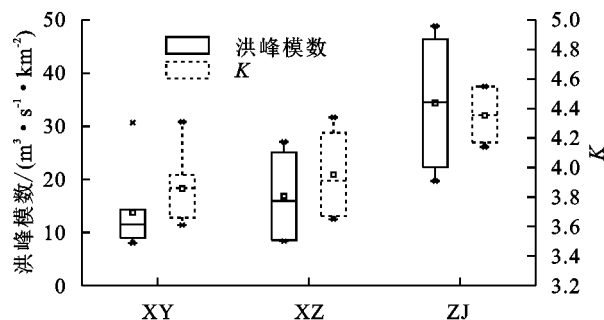
根据水土保持措施,将林草地比例、梯田比例作为一组变量、坡耕地比例作为另一组变量,采用 SPSS 软件进行回归分析研究洪峰对不同土地利用方式的响应关系,经过标准化之后的回归系数可以反映不同土地利用方式对洪峰的影响程度。

参考 Bryndal 等<sup>[15-16]</sup>和 Fu 等<sup>[13]</sup>的研究成果,与本研究的洪水指数进行对比来确定小流域对洪水的敏感程度;根据实地测量时,选取的 XY2、XY3 和 XY4 号沟道以及 ZJ1、ZJ4、ZJ6 号沟道和辛庄观测站实测数据进行洪峰数据的准确性检验,沟道分布位置图见图 1。

## 3 结果与分析

### 3.1 洪峰特征

由图 2 和表 3 可知,XY、XZ、ZJ 组的洪峰流量分别为 2.86~26.61,7.64~49.87,8.71~56.50 m<sup>3</sup>/s;洪峰模数分别为 8.00~30.67,8.35~27.07,9.67~48.89 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>);洪水指数分别为 3.61~4.31,3.65~4.34,4.14~4.55;平均洪峰流量为 12.27,19.91,26.85 m<sup>3</sup>/s;平均洪峰模数为 13.78,16.82,34.38 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>);平均洪水指数为 3.86,3.95,4.35。可见,随着次降雨量(表 1)的升高,3 组小流域的平均洪峰流量、平均洪峰模数、平均洪水指数也随之升高。



注:—表示最大(小)值;□表示平均值;×表示 1%~99%的阈值;箱体表示 25%至 75%的阈值;—表示中值线;须线表示异常值。

图 2 小流域洪峰特征

表 3 小流域沟道实测数据及洪峰特征

分组	小流域	比降	水力 半径/m	断面 面积/m <sup>3</sup>	糙率	流域 面积/km <sup>2</sup>	洪峰流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	洪峰模数/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	洪水 指数
XY	XY1	0.03	0.74	8.24	0.045	3.53	26.61	11.48	3.23	3.86
	XY2	0.12	0.36	1.63	0.045	0.56	6.17	9.08	3.79	3.69
	XY3	0.07	0.35	1.43	0.045	0.38	4.20	8.00	2.95	3.61
	XY4	0.02	0.33	1.73	0.045	0.18	2.86	8.98	1.66	3.66
	XY5	0.01	0.73	8.76	0.040	1.78	20.38	13.88	2.33	3.95
	XY6	0.04	0.48	3.19	0.045	0.50	9.02	14.32	2.83	3.92
	XY7	0.03	0.48	6.35	0.040	0.40	16.65	30.67	2.62	4.31
XZ	XZ1	0.03	0.67	4.21	0.040	2.12	14.42	8.74	3.42	3.69
	XZ2	0.01	0.63	4.11	0.045	0.89	7.72	8.35	1.88	3.65
	XZ3	0.05	0.92	10.43	0.045	2.50	49.87	27.07	4.78	4.34
	XZ4	0.11	0.43	1.85	0.045	0.19	7.64	23.12	4.14	4.13
ZJ	ZJ1	0.08	0.46	2.39	0.045	0.18	8.71	27.33	3.65	4.21
	ZJ2	0.09	0.49	3.63	0.045	0.17	15.00	48.89	4.13	4.50
	ZJ3	0.07	0.63	7.88	0.045	0.60	33.02	46.42	4.19	4.55
	ZJ4	0.05	1.05	11.08	0.045	1.58	56.50	41.65	5.10	4.55
	ZJ5	0.07	0.59	4.53	0.045	0.77	18.74	22.30	4.14	4.17
	ZJ6	0.04	0.77	7.68	0.045	1.80	29.10	19.67	3.79	4.14

3.2 土地利用方式分布特征

图 3 为各小流域土地利用的解译结果, XZ 组小流域的平均林草地比例为 68.40%, 平均梯田比例为 25.22%, 平均坡耕地比例为 5.43%; XY 组小流域的平均林草地比例为 63.17%, 平均梯田比例为 22.97%, 平均坡耕地比例为 9.76%; ZJ 组小流域的平均林草地比例为 60.05%, 平均梯田比例为 27.87%, 平均坡耕地比例为 9.89%。可见, XZ 组小流域的治理程度最高, ZJ 组次之, XY 组最低。

3.3 洪峰对植被和梯田的响应特征

3.3.1 洪峰模数对植被和梯田的响应特征 按水土保持措施将林草地和梯田比例作为 1 组变量, 采用线性回归分析法分析对洪峰模数的影响, 再将坡耕地比例作为 1 组变量分析对洪峰模数的影响。由表 4 可知, 洪峰模数与林草地比例、梯田比例呈显著的负相关关系 ( $p < 0.05$ ); 与坡耕地比例呈显著的正相关关系 ( $p < 0.05$ )。

林草地比例、梯田比例和坡耕地比例的回归系数绝对值并不是随着降雨量的增加而呈上升趋势, 而是呈现出先增长后降低的趋势, 次降雨量为 501.00 mm 的 XZ 组林草地比例和梯田比例的回归系数的绝对值最大, 而次降雨量为 570.60 mm 的 ZJ 组的回归系数绝对值要比 XZ 组小; 次降雨量为 356.00 mm 的 XY 组的回归系数的绝对值最小。

3.3.2 洪水指数对土地利用方式的响应特征 3 组小流域中洪水指数与林草地比例和梯田比例呈负相关, 与坡耕地比例显著正相关 ( $p < 0.05$ ) 并且通过对回归系数研究发现, XZ 组回归系数绝对值最大, XY

组和 ZJ 组的回归系数绝对值要比 XZ 组小(表 5)。

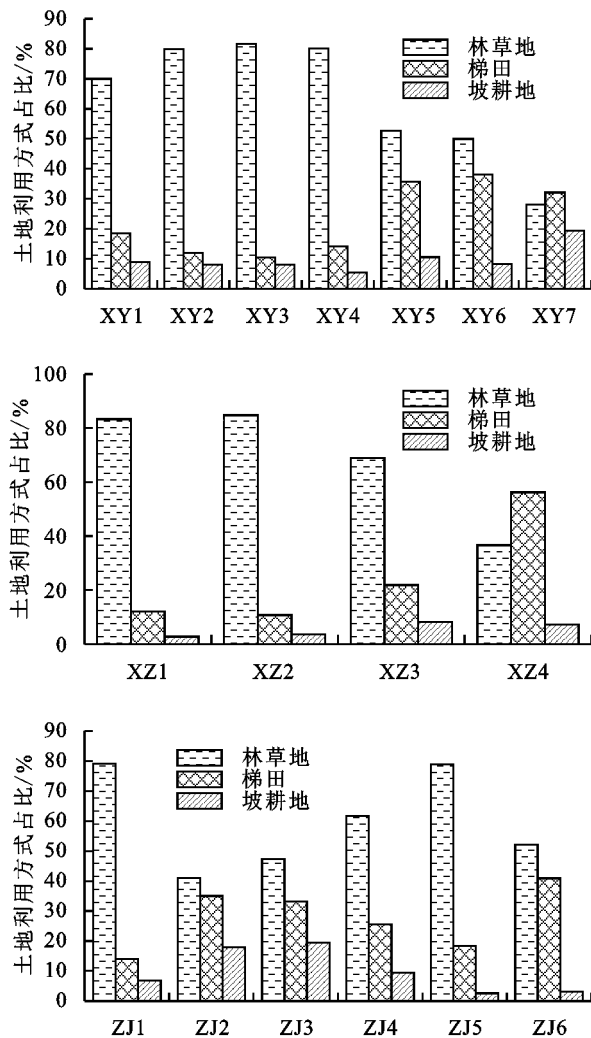


图 3 小流域土地利用方式分布特征

表 4 洪峰模数回归分析

分组	土地利用方式	回归系数 $B$	$t$	$p$	$R^2$
XY 组	林草地比例	-0.605	-21.834	0**	0.995
	梯田比例	-0.489	-10.341	0**	
	坡耕地比例	1.668	7.607	0.001**	
XZ 组	林草地比例	-3.727	-32.191	0.020*	0.999
	梯田比例	-3.619	-29.696	0.021*	
	坡耕地比例	3.586	9.350	0.011*	
ZJ 组	林草地比例	-1.684	-6.439	0.008**	0.937
	梯田比例	-2.050	-5.009	0.015*	
	坡耕地比例	1.649	5.438	0.006**	

注: \*\* 表示在 0.01 级别(双尾)极显著相关; \* 表示在 0.05 级别(双尾)显著相关。下同。

表 5 洪水指数回归分析

分组	土地利用方式	回归系数 $B$	$t$	$p$	$R^2$
XY 组	林草地比例	-0.015	-7.261	0.002**	0.970
	梯田比例	-0.007	-1.875	0.134	
	坡耕地比例	0.049	5.041	0.004*	
XZ 组	林草地比例	-0.139	-85.535	0.007**	1.000
	梯田比例	-0.136	-79.946	0.008**	
	坡耕地比例	0.124	6.751	0.021*	
ZJ 组	林草地比例	-0.023	-2.880	0.064	0.751
	梯田比例	-0.028	-2.209	0.114	
	坡耕地比例	0.023	3.261	0.031*	

## 4 讨论

### 4.1 洪峰数据的准确性检验

根据实地测量时,选取的 XY2、XY3 和 XY4 号沟道以及 ZJ1、ZJ4、ZJ6 和辛庄观测站实测数据进行洪峰数据的准确性检验。由表 6 可知,XY2 号沟道的洪峰流量  $6.17 \text{ m}^3/\text{s}$  略小于 XY3 号沟道与 XY4 号沟道的洪峰流量之和  $8.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,误差率为 25.39%;辛庄观测站算出的洪峰流量  $76.07 \text{ m}^3/\text{s}$  略小于 ZJ1、ZJ4 号沟道与 ZJ6 号沟道的洪峰之和为  $94.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ,误差率为 19.34%,考虑到错峰作用,由洪痕法估算出的沟道洪峰流量基本准确。

表 6 沟道洪峰流量计算结果的准确性评价

沟道编号	洪峰流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
XY2	6.17
XY3	4.20
XY4	2.86
ZJ1	8.71
ZJ4	56.50
ZJ6	29.10
辛庄观测站数据	76.07

### 4.2 植被和梯田对洪峰强度的影响特征

研究发现林草地比例、梯田比例和坡耕地比例的回归系数绝对值是随着次降雨量的增大呈现先增长

后降低的趋势,说明它们对洪峰作用的有效性也是呈先增长后降低的关系。这表明林草地、梯田和坡耕地对洪峰的作用不是一个单一的线性(递增、递减)关系。同样在天然径流场观察林地对径流的削减作用也发现了类似的规律<sup>[18]</sup>。

林草植被通过对径流的削减作用来降低小流域的洪峰模数。刘晓燕等<sup>[19]</sup>研究发现,随着林草植被覆盖率的增加,小流域的产洪系数减小,二者大体呈乘幂关系;欧阳硕龙等<sup>[20]</sup>通过对油茶林地的径流量进行长期观测,发现油茶林地径流量减少量占无林地径流量的 60%~90%;林地和草地可以通过拦截雨水,增加入渗时间的方式达到削减径流的作用。梯田主要是通过降低小流域内的水文连通性来影响小流域的产流能力,以往的研究<sup>[21]</sup>证明,地表的水文连通性越强,产流能力就越强。坡耕地近地表的土壤裸露程度远远高于林草地,并且近地表的糙率系数也相对较低,植物的根系普遍较浅,近地层土壤的抗冲性要远低于林草地,对雨水的拦截作用也要远低于林冠的拦截作用。坡耕地在极端暴雨的条件下,土壤表层水分会很快达到饱和状态,从而会加大地表径流量,对洪水有加剧的作用。

### 4.3 植被和梯田对洪峰敏感性的影响特征

林草地比例、梯田比例和坡耕地比例的回归系数绝对值表明,三者对洪水指数的影响呈现先增长后降低的趋势(表 5)。在本次调查中,洪水指数从 3.61~4.55,平均值为 4.05。Fu 等<sup>[13]</sup>针对 2017 年“7·26”岔巴沟极端暴雨研究中,发现  $K$  值的平均值为 4.0,本研究计算出的平均  $K$  值与之基本相同。参考 Bryndal 等<sup>[15-16]</sup>和 Fu 等<sup>[13]</sup>的研究(图 4),本研究中 3 组小流域对洪水的敏感性可评价为“Average”水平。

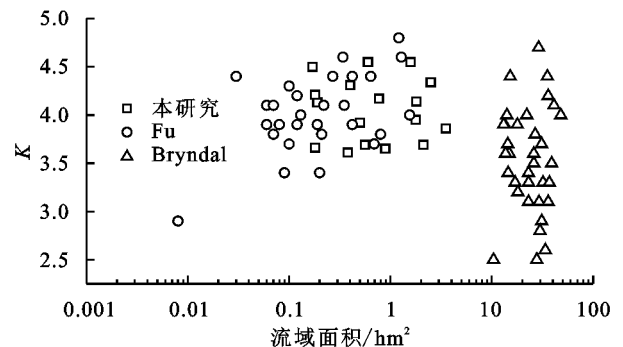


图 4 已有研究与本研究洪水指数对比

植被和梯田主要是通过影响小流域的水文连通性来影响小流域的洪水敏感度。径流的输送能力随着水文连通性的增加而增强,在同样的次降雨量下,水文连通性越强的小流域越容易在短期内产生大量的地表径流。植被和梯田是影响水文过程和连通性的关键因素,在降低水文连通性方面发挥了重要作用。小流域的水

文连通性就越强,对洪水的敏感程度就越高。

## 5 结论

(1)受台风“利奇马”的影响,本次所调查小流域的洪峰流量在  $2.36 \sim 56.50 \text{ m}^3/\text{s}$  变化,洪峰模数在  $8.00 \sim 48.89 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$  变化,洪水指数在  $3.61 \sim 4.55$  变化;调查流域对洪水的敏感性评价为“Average”水平。

(2)在相似降雨条件下,洪峰模数与洪水指数与坡耕地比例呈显著的正相关关系( $p < 0.05$ ),洪峰模数与林草地比例和梯田比例呈显著的负相关关系( $p < 0.05$ ),洪水指数与林草地和梯田比例呈负相关关系;并且小流域的林草地、梯田和坡耕地对洪峰作用的有效性不是一个单一的线性(递增、递减)关系,而是随着次降雨量的增长呈现先增长后降低的趋势,在次降雨量超过一定的值之后,其对洪峰的作用会逐渐减弱。

(3)研究发现增加林草地、梯田等土地类型的面积可以降低小流域流域对洪水的敏感程度,提高其对极端暴雨的应对能力。

### 参考文献:

[1] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.

[2] 付兴盛,罗万福,龙启林,等.水土保持综合治理是防治山洪泥石流的根本措施:“7·6”山洪泥石流灾害中两条小流域受灾程度不同的原因分析措施[J].中国水土保持,2011,(9):56-59.

[3] Han J, Ge W, Hei Z, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: e107047.

[4] 白桦,穆兴民,王双银.水土保持措施对秃尾河径流的影响[J].水土保持研究,2010,17(1):40-44.

[5] 王明玉,王百田.不同水土保持措施对黄土高原小流域年径流和产沙的影响:以平凉纸坊沟为例[J].林业科学,2016,52(8):10-20.

[6] Beschta R L, Pyles M R, Skaugset A E, et al. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 233 (1/4):102-120.

[7] 罗巧,王克林,王勤学.基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1431-1436.

[8] 陈瑞东,温永福,高鹏,等.极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J].生态学报,2018,38(6):1920-1929.

[9] Zhu T X. Effectiveness of conservation measures in reducing runoff and soil loss under different magnitude - frequency atorns at plot and catchment scales in the semi arid agricultural landscape [J]. *Environmental Management*, 2016,57(3):671-682.

[10] 从辰宇,韩剑桥,焦菊英,等.台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究:以山东省临朐县为例[J].水土保持通报,2019,39(5):337-344.

[11] 赵琰鑫.沟道泥石流运动—淤塞—堵塞数值模拟研究[D].武汉:武汉大学,2012.

[12] 张焜,常国梁,胡晓静,等.密云西白莲峪小流域“7·16”暴雨洪水及损毁调查分析[J].北京水务,2019(2):28-31.

[13] Fu S H, Yang Y F, Liu B Y, et al. Peak flow rate response to vegetation and terraces under extreme rainstorms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020,288:e106714.

[14] 纳兴仓,闫永福,李玉芝.某特小流域设计洪峰流量计算分析[J].水利科技与经济,2016,22(8):85-87.

[15] Bryndal T, Krocak R, Soja R. Hydrological Response of a small catchment located in extremely humid monsoonal climate-the maw-ki-syiem case study (Cherrapunji, Meghalaya Plateau, India)[J]. *Episodes*, 2015, 38(1):31-38.

[16] Bryndal T, Franczak P, Krocak R, et al. The impact of extreme rainfall and flash floods on the flood risk management process and geomorphological changes in small Carpathian catchments; A case study of the Kasiniczanka river (Outer Carpathians, Poland)[J]. *Natural Hazards*, 2017,88(1):95-120.

[17] Francou J, Rodier J. Essai de classification des crues maximales[J]. *AIHS Publication*, 1969(84):518-527

[18] 肖金强,张志强,武军.坡面尺度林地植被对地表径流与土壤水分的影响初步研究[J].水土保持研究,2006,13(5):227-231.

[19] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等.基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J].地理学报,2014,69(11):1595-1603.

[20] 欧阳硕龙,欧阳泽怡,陈永忠,等.南方低山丘陵区油茶林地地表径流特征研究[J].湖南林业科技,2018,45(3):1-4.

[21] Wu S F, Wu P, Feng H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2011,5(1):76-83.