

• 研究论文 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800194

植被对坡面汇流时间影响的试验研究

彭清娥, 刘兴年, 黄 尔, 杨克君*, 赵明辉

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点试验室, 四川 成都 610065)

摘 要:引发暴雨山洪的主要因素除大气降水特性以外还与下垫面森林植被状况有着密切的关系,流域植被对坡面汇流时间有着直接的影响。目前应用最为广泛的坡面汇流时间公式,以坡面长度、综合糙率、有效降雨强度及坡度的恒定指数形式表征其对汇流时间的影响,而植被对汇流时间的影响是隐含在综合糙率之中,从而无法直接利用有关植被的高精度遥感资料。本研究基于不同下垫面情况下不同坡度、不同雨强的坡面汇流系列试验,深入分析植被对坡面汇流时间的影响,引入植被覆盖度因子,结合统计分析方法,建立植被与坡面汇流时间的关系。研究表明:植被的种类(草或灌木)对坡面汇流时间影响存在一定差异,草植被下的坡面汇流时间大于相应条件灌木植被下的坡面汇流时间;植被覆盖度(草或灌木)对坡面汇流时间存在显著影响,坡面汇流时间随植被覆盖度的增大出现明显的增加;降雨强度、坡度对坡面汇流时间的影响也较为显著,坡面汇流时间随雨强及坡度的增大而出现明显的减小;草及灌木植被覆盖度指数随坡度及雨强变化规律基本相似,总体上草植被覆盖度指数略大于灌木植被覆盖度指数。随着雨强增大,植被覆盖度指数减小趋势较为明显;随着坡度变缓,植被覆盖度指数有所增大。本研究将植被因子从综合糙率中剥离出来,便于融合植被遥感数据,从而提高坡面汇流时间的计算精度。

关键词:植被种类;植被覆盖度指数;坡面汇流时间;人工模拟降雨

中图分类号:TV124

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)03-0185-08

Experimental Study on the Flow Concentration Influenced by Vegetation

PENG Qing'e, LIU Xingnian, HUANG Er, YANG Kejun*, ZHAO Minghui

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Chengdu 610065, China)

Abstract: Due to the steep slope of mountainous watersheds and large changes in vegetation, flood responses to rainstorms are complicated. At present, the most widely used formula is the constant index of slope length, effective roughness, effective rainfall intensity and slope. However, the effect of vegetation on the confluence time is implicit in the effective roughness, which makes impossible to directly use the high-precision remote sensing data of vegetation in calculation. In this study, a series of heavy rainfall induced confluence tests under different slopes and vegetation coverage were carried out. By introducing the vegetation coverage factor C and employing the statistical analysis method, the relationship between the flow confluence time on a slope and the vegetation coverage is established. The results showed that the influence of vegetation coverage on the flow confluence time was significant. The flow confluence time increased with the increase of vegetation coverage, and decreases with the increase of rainfall intensity and slope. The flow confluence time under turf vegetation was slightly larger than that under shrubs vegetation. In this study, the vegetation factor was separated from the effective roughness to facilitate the more effective use of vegetation remote sensing data. The calculation accuracy of the flow confluence time on the slope is improved.

Key words: vegetation type; vegetation coverage index; slope flow concentration time; artificial rainfall

引发暴雨山洪的主要因素除大气降水特性以外还与下垫面森林植被状况有着密切的关系。流域植

被对产汇流机制的影响效应是十分显著的。如刘占洲等^[1]在流域植被类型对洪水径流影响研究中发现

收稿日期:2018-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51539007);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402302)

作者简介:彭清娥(1971—),女,副研究员。研究方向:水力学及河流动力学。E-mail: Pengqing@126.com

*通信联系人 E-mail: yangkejun@163.com

网络出版时间:2018-05-05 19:21:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180505.1921.016.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

流域中的植被类型对其水文响应过程有重要影响; Wang等^[2]进行了汶川地震典型亚热带常绿森林径流与土壤流失及其与降雨、坡度和植被覆盖的关系研究; Li等^[3]进行水土流失风险分布图中的降雨与植被耦合指数研究; Fusun等^[4]进行不同植被类型对汶川地震滑坡径流和土壤侵蚀的影响研究; 郑绍伟等^[5]进行了长江上游森林影响流域水文过程模拟分析, 研究指出流域森林覆盖率的提高, 延迟了流域降水汇流时间, 同时削减洪峰流量; 王清华等^[6]在森林植被变化对径流及洪水的影响分析中发现森林覆盖率高的流域拦水能力较高, 能显著地削减洪峰、延缓洪水过程; 张发会等^[7]进行了长江上游低山丘陵区小流域森林植被变化对径流影响分析, 同样得出森林植被的变化可以调节森林水文过程; Jimenez等^[8]进行了植被覆盖变化对土壤渗透速率的影响研究; 崔岩等^[9]在森林对预防山洪暴发效益的研究中提出植被对引发山洪的临界条件产生很大影响; 何进知等^[10]进行森林植被对流域产汇流的影响分析得出, 由于森林植被的急剧减少引起流域产汇流特性变化。这些研究说明植被对洪水过程的影响不可忽视。

山区流域地形地貌复杂, 地形坡度的空间差异性较大, 由于受所处海拔高度、季节变化、人工耕作等影响, 植被种类及植被覆盖度在时间和空间上更是存在很大差异, 这也直接导致暴雨作用下流域坡面汇流时间的差异性, 坡面汇流时间是洪水过程模拟的关键参数, 将直接影响峰现时间及洪峰量级的预报精度。如申红彬等^[11]对当前坡面汇流计算方法的研究进展进行了较为系统的总结与分析, 认为根据水文响应单元在不同雨强条件下汇流时间的变化, 调整其汇流参数以反映坡面汇流的非线性效应, 对于流域坡面汇流的分布式模拟更具有实际意义。李瑞林^[12]在连州市洪水预报作业中几个问题的探讨中提出, 人为活动对流域下垫面的影响带来的流域汇流时间的改变是影响峰现时间预报精度的关键问题之一。因此, 探明植被与坡面汇流时间的关系, 能进一步提高暴雨洪水的预报精度。

目前应用最为广泛的坡面汇流时间公式, 基于运动波理论推求而来, 如美国佛罗里达大学Melesse等^[13]提出的基于汇流时间方法的空间分布式水文模型, 以及台湾学者Lee^[14-15]等研究的地貌瞬时单位线模型中均采用这一公式。公式以坡面长度、糙率、降雨强度及坡度的恒定指数形式表征其汇流时间变化, 植被对汇流时间的影响隐含在综合糙率之中。随着3S技术的不断发展, 有关流域植被的遥感资料将不断完善, 公式仍以综合糙率的形式表征植被对汇流时间的影响略显不够。如何充分利用高精度的遥感资料, 进一步完善分布式水文模型, 正是本研究的终

极目标。本文通过室内人工模拟降雨系列试验, 重点探讨植被对坡面汇流时间的影响。

1 试验概况

1.1 模型设计

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点试验室室内的人工降雨区实施。模型场地长7.6 m, 宽5 m, 几何投影面积27 m²。根据坡面流及山区河流一般坡度, 共布置有5°、15°、30°和45°这4种不同坡度的坡面, 各坡面投影区域为6 m×1 m。

模型修建采用水泥抹面, 基本无雨量下渗, 即不考虑雨量下渗情况。本次试验目的是研究不同坡度、雨强、植被覆盖度与坡面汇流时间的关系, 试图建立分布式坡面汇流时间公式, 进一步完善分布式水文模型。模型下垫面主要考虑水泥抹面、塑料草坪及塑料灌木三种情况, 不考虑产流, 降雨量即为有效降雨量。本成果可直接适用于城市化不透水地表径流的计算。

模型试验场地上方安装有室内人工模拟降雨装置。在各斜坡的出口均修有一个集流槽, 槽长1 m、宽40 cm、深22 cm; 在集流槽后面紧接着一个直角三角形薄壁堰, 三角堰堰口使用高精度自动水位仪记录。

模型试验整体布置如图1所示。

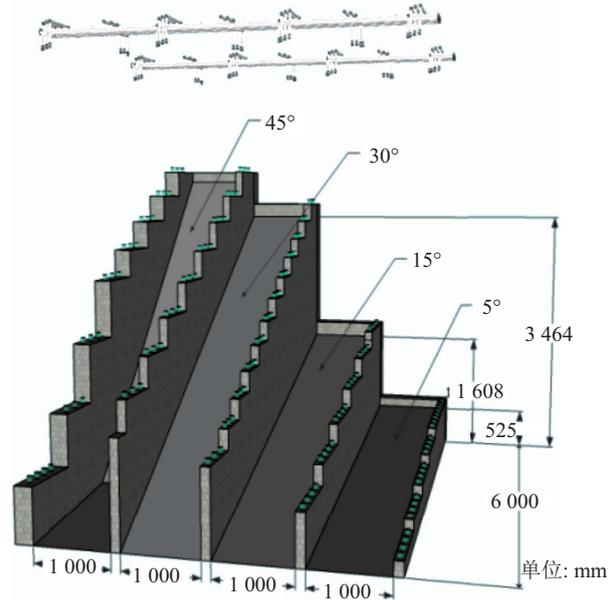


图1 降雨试验模型布置

Fig. 1 The model layout of rainfall experiment

1.2 试验设备简介

1.2.1 室内人工降雨系统

试验所用人工降雨系统主要用于模拟降雨试验, 该系统可利用4个阀门的相互组合来调节雨强大小, 进行试验所需不同降雨雨强的控制, 雨强范围约1~7 mm/min。

经过雨量的反复校核, 为了满足试验的需要, 选

取了9个不同雨强工况进行试验。

1.2.2 LH-1自动水位仪

试验对于堰上水头的测量采用精密的LH-1自动水位仪。该水位仪由武汉大学水电学院研发,LH-1自动水位仪是用于模型、水槽水位测量的精密智能仪器,集成了二个微核嵌入式网络接口及软件,可多台LH-1自动水位仪分布布置进行测控,本试验采用了4台自动水位仪,同时对4个坡面汇流过程进行实时记录。LH-1自动水位仪,测量精度达0.05 mm,采点周期最小可设定为0.5 s。

每一次降雨试验的测量从降雨系统开始降水起到汇流稳定(即水位仪的读数保持稳定)为一个测量周期,4组坡面同时进行。

1.3 试验方案设计

下垫面设计:试验考虑了以下3种下垫面情况。水泥抹面;水泥抹面+塑料草坪;水泥抹面+塑料灌木。其中水泥抹面为无植被情况;水泥抹面+塑料草坪为模拟草植被不同覆盖度情况,如100%草、80%草+20%裸地、50%草+50%裸地、20%草+80%裸地及100%裸地;水泥抹面+塑料灌木为模拟灌木植被不同覆盖度情况,如100%灌木、80%灌木+20%裸地、50%灌木+50%裸地、20%灌木+80%裸地及100%裸地;塑料草坪与塑料灌木为模拟不同种类植被对汇流时间影响的情况,试验用塑料草坪及灌木见图2。



(a) 试验用草坪



(b) 试验用灌木

图2 试验下垫面设计简况

Fig. 2 Experiment arrangement of the underlying surface

坡面坡度:结合山区流域地形特点,模型布置有5°、15°、30°和45°这4种不同坡度的坡面。

降雨雨强:经过对降雨系统装置雨强的校核,结合该研究的总目标,建立极端强降雨情况下基于栅格的全分布式水文模型,试验选取了9种不同雨强工况进行试验,雨强范围1~7 mm/min。

试验对4种不同坡度坡面,以及不同下垫面情况均进行了9种不同雨强降雨的坡面汇流试验,每次试验开始前都对下垫面充分润湿,以减少下渗雨量对试验精度的影响。每一次降雨试验的测量从降雨系统开始降水起到汇流稳定(即水位仪的读数保持稳定)为一个测量周期,4组坡面同时进行。每次降雨试验过程中雨强保持不变,汇流达到稳定后,此次降雨试验结束。每次降雨过程中汇流是否达到稳定,主要通过前面介绍的三角堰堰口的高精度自动水位仪的记录来判断,每次开始降雨前控制三角堰水位与堰口持平,降雨开始瞬间水位仪开始记录,由于降雨雨强不变,一定时间后坡面汇流流经堰口流出会达到一个稳定状态,即水位仪实时记录的数据从初始值逐渐增大最后达到基本不变,此次降雨汇流过程达到稳定,然后通过三角堰堰口水位计算出汇流过程的流量过程;不同雨强的降雨汇流试验通过选择开启不同降雨阀门后重复上述试验进行。同时,为保证试验数据的可靠性,每组试验都重复进行3次。

2 坡面汇流试验结果分析

流域内的降水经过扣除损失形成净雨后从流域各处向流域出口断面汇集的过程称为汇流过程^[1]。流域汇流包括两个阶段:1)净雨进入河道之前的汇流过程为坡地汇流,分为坡面、土壤和地下水汇流;2)河道内洪水波由上游向下游传播的过程为河道汇流。其中,坡面汇流与河道汇流一起共同组成地表径流。本文以坡面汇流为研究对象,通过室内模拟人工降雨试验,重点探讨植被种类及植被覆盖度对坡面汇流时间的影响。

2.1 坡面汇流时间试验结果及初步分析

坡面汇流时间是洪水过程模拟的关键参数,人为活动对流域下垫面的影响带来的流域汇流时间的改变是影响峰现时间预报精度的关键问题之一。结合上述系列汇流试验过程,提取出各工况坡面汇流时间如表1~4。下面结合试验数据初步分析雨强、植被等对坡面汇流时间的影响。

2.1.1 同一坡面雨强对汇流时间的影响

首先,分析45°坡面试验情况。45°坡面不同下垫面及不同雨强下汇流时间试验结果见表1。表中每行汇流时间试验数据恰为对应的同一下垫面在不同雨强下的汇流时间。通过横向比较每行汇流时间数据发现,任一相同下垫面情况,随雨强的增大其汇流时间均出现较为明显的减小趋势,说明45°坡面情况下,雨强对汇流时间的影响较为显著。

表 1 45°坡面汇流时间统计
Tab. 1 Flow concentration time on 45° slope

下垫面	植被覆盖度/%	降雨强度/(mm·min ⁻¹)								
		3.52	3.70	3.81	5.57	5.58	6.14	6.78	7.00	7.17
草皮覆盖	100	245.0	235.5	218.0	189.0	175.5	161.0	158.5	145.0	140.5
	80	232.0	210.5	198.5	173.5	169.0	151.0	148.5	136.0	128.5
	50	220.0	202.5	190.0	165.5	160.0	146.5	140.0	131.0	126.0
	20	155.5	150.5	145.0	142.0	137.5	130.0	125.5	120.0	115.0
	0(裸地)	147.5	138.5	130.0	125.5	121.0	115.5	110.0	105.5	100.0
灌木覆盖	100	238.5	210.0	202.5	172.5	168.0	155.5	138.0	135.5	134.0
	80	220.5	198.5	185.5	165.5	161.0	140.0	130.5	128.0	122.5
	50	199.0	176.5	172.0	157.5	148.0	132.5	128.0	122.2	120.0
	20	152.0	145.0	140.5	135.0	130.0	126.5	120.5	115.0	110.0
	0(裸地)	147.5	138.5	130.0	125.5	121.0	115.5	110.0	105.5	100.0

表 2 30°坡面汇流时间统计
Tab. 2 Flow concentration time on 30° slope

下垫面	植被覆盖度/%	降雨强度/(mm·min ⁻¹)								
		3.39	3.45	3.53	5.15	5.38	5.61	6.58	6.99	7.17
草皮覆盖	100	254.5	248.0	240.0	208.5	192.0	185.5	162.5	151.0	145.5
	80	240.5	232.5	210.0	185.5	179.5	168.0	158.0	142.5	136.0
	50	230.0	216.0	202.5	173.0	169.5	158.0	142.5	135.0	130.0
	20	168.5	157.0	149.5	138.0	132.0	129.0	120.5	115.5	105.0
	0(裸地)	156.0	143.0	138.5	130.0	125.0	121.0	118.5	110.5	105.0
灌木覆盖	100	247.0	242.5	236.0	185.5	173.5	168.0	148.5	140.0	135.0
	80	232.5	225.0	212.5	178.5	168.0	155.5	138.0	130.5	125.0
	50	210.5	186.0	180.5	168.5	155.0	143.0	139.5	129.5	124.0
	20	168.5	153.5	142.0	135.5	132.0	130.0	122.5	121.0	109.5
	0(裸地)	156.0	143.0	138.5	130.0	125.0	121.0	118.5	110.5	105.0

表 3 15°坡面汇流时间统计
Tab. 3 Flow concentration time on 15° slope

下垫面	植被覆盖度/%	降雨强度/(mm·min ⁻¹)								
		3.52	3.56	3.70	5.86	6.26	6.29	6.38	6.82	7.04
草皮覆盖	100	268.5	252.0	246.0	210.5	193.0	183.5	178.5	175.0	165.5
	80	252.5	240.0	220.5	195.5	185.0	180.5	171.0	163.0	155.0
	50	200.5	220.0	175.5	163.0	172.0	150.5	146.5	135.5	130.0
	20	155.5	158.0	145.5	140.0	136.0	130.0	123.5	125.0	109.5
	0(裸地)	147.5	145.0	132.5	128.5	128.0	118.5	110.0	118.0	105.5
灌木覆盖	100	255.5	248.0	220.5	200.0	185.5	180.0	172.0	168.0	159.5
	80	242.5	232.0	208.0	190.5	180.5	175.0	167.0	159.5	150.0
	50	185.5	180.0	168.5	152.0	168.5	142.0	135.5	130.0	125.5
	20	150.5	156.0	138.5	132.5	134.0	120.0	115.5	121.0	108.5
	0(裸地)	147.5	145.0	132.5	128.5	128.0	118.5	110.0	118.0	105.5

表4 5°坡面汇流时间统计
Tab. 4 Flow concentration time on 5° slope

下垫面	植被覆盖度/%	降雨强度/(mm·min ⁻¹)								
		2.01	2.16	2.18	3.71	3.78	4.09	4.15	4.71	4.74
草皮覆盖	100	282.0	278.5	275.0	245.5	238.5	230.0	225.5	220.0	218.5
	80	275.5	268.0	260.0	235.5	230.0	220.5	215.5	210.0	200.0
	50	260.0	250.5	235.5	225.0	220.5	213.0	200.5	190.0	185.5
	20	170.5	162.0	158.5	150.0	142.5	140.0	135.5	130.0	125.5
	0(裸地)	154.5	150.0	145.0	140.0	135.0	130.5	125.5	120.0	118.5
灌木覆盖	100	275.5	263.0	252.0	240.0	225.5	220.0	218.0	210.5	205.5
	80	268.5	256.0	242.0	230.5	220.5	215.0	208.0	200.5	195.0
	50	251.5	241.0	230.5	210.5	200.5	199.0	185.5	174.5	172.0
	20	162.5	158.0	150.5	145.5	140.0	138.0	130.0	125.0	120.0
	0(裸地)	154.5	150.0	145.0	140.0	135.0	130.5	125.5	120.0	118.5

进一步分析30°、15°及5°坡面试验数据发现,在各个坡面同样对于任一相同下垫面情况,随雨强的增大其汇流时间均出现较为明显的减小趋势。这说明各个坡面雨强对汇流时间的影响均较为显著。

2.1.2 同一坡面植被对汇流时间的影响

同样先分析45°坡面试验情况。表1中每列数据代表同一雨强下不同植被覆盖情况对汇流时间的影响。从纵向比较每列汇流时间数据可知,在草覆盖情况,同一坡面同一雨强下,不同草植被覆盖度对汇流时间有较为显著的影响,坡面汇流时间均随着草植被覆盖度的减小而减小;在灌木覆盖情况,不同灌木植被覆盖度对汇流时间也存在显著的影响,坡面汇流时间随着灌木植被覆盖度的减小而显著减小;进一步对比同一雨强下相同覆盖度的草和灌木所对应的汇流时间发现,草植被情况下坡面汇流时间普遍大于灌木植被情况,这说明植被的种类对汇流时间也存在一定影响。

进一步分析30°、15°及5°坡面试验数据同样可发现类似的规律。因此,根据试验数据初步分析可得,植被的种类对汇流时间存在一定影响,而植被覆盖度对汇流时间有较为显著的影响。

2.1.3 不同坡面坡度对汇流时间的影响

前面分析了各个坡面下雨强及植被对汇流时间的影响。初步分析发现,4种不同坡面下雨强及植被对汇流时间的影响规律基本相似。下面分析不同坡面试验情况,即其它条件相同情况下坡度对汇流时间的影响。试验设计的9种雨强实际分为大、中、小三类,每类雨强相对接近,通过对每类数据进行均化处理后,不难发现坡度与汇流时间的关系。表5为各坡面不同植被情况下根据雨强分类均化处理后的坡面汇流时间。观察分析表5可发现,不论是草植被还是灌木植被下,坡度对汇流时间还是存在较为显著的影响,坡面汇流时间随着坡度的减小而显著增大。

表5 不同坡面汇流时间雨强分类统计结果

Tab. 5 Statistical results of flow concentration time for rain intensity classification

下垫面	植被覆盖度/%	45°			30°			15°			5°		
		降雨强度/(mm·min ⁻¹)			降雨强度/(mm·min ⁻¹)			降雨强度/(mm·min ⁻¹)			降雨强度/(mm·min ⁻¹)		
		3.68	5.76	6.98	3.46	5.38	6.91	3.59	6.14	6.75	2.12	3.86	4.53
草皮覆盖	100	232.8	175.2	148.0	247.5	195.3	153.0	255.5	195.7	173.0	278.5	238.0	221.3
	80	223.3	169.8	142.8	237.6	186.5	149.3	246.6	191.3	168.0	273.2	233.3	214.9
	50	208.9	160.9	135.0	221.9	172.3	140.7	218.2	174.4	150.2	258.3	224.1	200.3
	20	177.3	146.9	126.3	187.3	149.9	124.8	175.8	148.6	128.3	206.2	181.8	161.2
	0(裸地)	144.5	128.6	112.7	152.1	129.2	112.5	147.3	130.2	115.3	156.8	139.7	125.8
灌木覆盖	100	177.8	143.0	120.5	193.8	150.5	126.3	191.5	156.8	138.8	206.7	181.8	166.3
	80	209.3	160.4	131.4	232.6	171.5	136.2	234.4	185.3	162.7	259.5	225.3	206.3
	50	192.0	150.8	125.2	207.8	161.4	131.1	202.8	168.1	144.6	248.3	212.7	189.3
	20	164.2	138.3	119.3	173.5	144.0	124.3	163.2	141.5	122.7	199.0	172.3	151.2
	0(裸地)	142.3	125.6	110.2	150.3	128.9	114.5	145.0	126.9	113.1	153.4	138.2	123.2

因此,结合试验数据初步分析可得,降雨强度、植被覆盖度及坡度对坡面汇流时间存在较为显著的影响,植被种类(草或灌木)对坡面汇流时间也存在一定的影响。

2.2 植被对坡面汇流时间的影响指数

山区流域地形地貌复杂,地形坡度的空间差异性较大,植被种类及植被覆盖度等由于受所处海拔高度、季节变化、人工耕作等影响,在时间和空间上更是存在很大差异。随着3S技术的不断发展,有关流域植被等下垫面变化的遥感资料也将不断更新完善,如何将遥感资料融入到分布式水文模型中,正是本文研究关注的问题。

目前应用最为广泛的基于运动波理论推求而来的汇流时间公式,如美国佛罗里达大学Melesse等^[13]提出的基于汇流时间方法的空间分布式水文模型,以及台湾学者Lee^[14-15]等研究的地貌瞬时单位线模型中均采用这一公式。公式如下:

$$T = L^{0.6} n^{0.6} / i^{0.4} S^{0.3} \quad (1)$$

式中: T 为汇流时间, s; L 为地面流长度, m; n 为糙率; i 为净雨强度, m/s; S 为坡度。

公式以坡面长度、糙率、降雨强度及坡度的恒定指数形式表征其对汇流时间的变化,而植被对汇流

表 6 不同坡度、雨强下草植被覆盖度指数 a_0

Tab. 6 Vegetation coverage index a_0 with different slope and different rainfall intensity of turf

45°		30°		15°		5°	
降雨强度/(mm·min ⁻¹)	a_0						
3.52	0.18	3.39	0.18	3.52	0.21	2.01	0.23
3.70	0.18	3.45	0.2	3.56	0.20	2.16	0.23
3.81	0.18	3.53	0.18	3.70	0.20	2.18	0.23
5.57	0.13	5.15	0.16	5.86	0.16	3.71	0.21
5.58	0.13	5.38	0.15	6.26	0.15	3.78	0.21
6.14	0.11	5.61	0.14	6.29	0.15	4.09	0.21
6.78	0.12	6.58	0.11	6.38	0.17	4.15	0.22
7.00	0.10	6.99	0.11	6.82	0.13	4.71	0.22
7.17	0.10	7.17	0.11	7.04	0.15	4.74	0.22

表6中任一植被覆盖度指数 a_0 都对应某一坡度及雨强下植被覆盖度与汇流时间的关系。分析结果发现,在45°及30°坡面,随着雨强增大草植被覆盖度指数 a_0 减小趋势非常明显,雨强3.3~3.8 mm/min情况下 a_0 值约为0.18,雨强5.1~5.6 mm/min情况下 a_0 值约为0.14,雨强6.1~7.2 mm/min情况下 a_0 值约为0.11; 15°坡面,随着雨强增大草植被覆盖度指数 a_0 也有一定减小趋势,雨强3.3~3.7 mm/min情况下 a_0 值约为0.20,雨强5.8~7.1 mm/min情况下 a_0 值约为0.15; 5°坡面情况,随着雨强增大草植被覆盖度指数 a_0 变化不大,雨强2.0~4.8 mm/min情况下 a_0 约为0.22。总体上

时间的影响是隐含在糙率之中,不能充分利用现有遥感资料,因此,现有公式以综合糙率的形式表征植被对汇流时间的影响略显不够。由前述初步分析知,植被种类对坡面汇流时间有一定影响,植被覆盖度对坡面汇流时间存在显著影响,因此,引入植被覆盖度因子,探讨植被覆盖度因子 C 与汇流时间 T 的关系: $T \propto C^{a_0}$,对建立完善分布式坡面汇流时间公式具有重要的意义。其中, T 为汇流时间, s; C 为植被覆盖度; a_0 为植被覆盖度指数。

结合表1~4中试验数据,分别对同一坡度、同一雨强下的不同植被覆盖度与汇流时间数据系列进行拟合,得出每一坡度及雨强下的植被覆盖度指数,然后进一步分析植被覆盖度指数是否受降雨强度及坡度等影响;同时由于试验进行了草及灌木两种植被种类情况,因此数据处理时也是对草及灌木数据分开进行,以便对比分析不同种类植被的植被覆盖度指数是否存在差异。下面采用专业的数据统计软件spss逐一对表1~4中同一坡度、同一雨强及同一植被种类情况下的植被覆盖度与汇流时间关系进行曲线回归拟合,由于植被覆盖度与汇流时间的函数形式为幂函数,为计算需要故将100%覆盖度情况近似取为95%, 0%覆盖度情况取为5%。

草植被覆盖度与汇流时间的关系拟合结果见表6。

看,草植被覆盖度指数 a_0 随坡度减小而有所增大,随着雨强增大而减小(大坡度下减小更加显著)。

灌木植被覆盖度与汇流时间的关系拟合结果见表7。同样分析结果发现,在45°及30°坡面,随着雨强增大灌木植被覆盖度指数 a_0 减小趋势非常明显,雨强3.3~3.8 mm/min情况下 a_0 值约为0.17,雨强5.1~5.6 mm/min情况下 a_0 值约为0.11,雨强6.1~7.2 mm/min情况下 a_0 值约为0.08; 15°坡面,雨强3.3~3.7 mm/min情况下 a_0 值约为0.18,雨强5.8~7.1 mm/min情况下 a_0 值约为0.14; 5°坡面情况,随着雨强增大灌木植被覆盖度指数 a_0 变化很小,雨强2.0~4.8 mm/min情况下 a_0 约为

表7 不同坡度、雨强下灌木植被覆盖度指数 a_0 Tab. 7 Vegetation coverage index a_0 with different slope and different vegetation coverage of shrub

45°		30°		15°		5°	
降雨强度/(mm·min ⁻¹)	a_0						
3.52	0.17	3.39	0.16	3.52	0.19	2.01	0.22
3.70	0.14	3.45	0.18	3.56	0.18	2.16	0.21
3.81	0.15	3.53	0.18	3.70	0.17	2.18	0.21
5.57	0.11	5.15	0.13	5.86	0.15	3.71	0.20
5.58	0.11	5.38	0.12	6.26	0.14	3.78	0.19
6.14	0.09	5.61	0.10	6.29	0.15	4.09	0.20
6.78	0.07	6.58	0.07	6.38	0.16	4.15	0.20
7.00	0.08	6.99	0.07	6.82	0.11	4.71	0.20
7.17	0.09	7.17	0.08	7.04	0.14	4.74	0.20

0.20; 灌木植被覆盖度指数 a_0 随坡度减小而有所增大。

对比分析表6与7结果发现,草植被与灌木植被情况下覆盖度指数 a_0 随雨强及坡度变化的响应基本相似,草植被覆盖度指数略大于相应情况下的灌木植被覆盖度指数。

3 结论

山区流域由于其坡度、植被覆盖度等下垫面存在较大的时空差异性,导致其对暴雨洪水的响应过程也产生一定差异,坡面汇流时间是洪水过程模拟的关键参数,人为活动对流域下垫面的影响带来的流域汇流时间的改变是影响峰现时间预报精度的关键问题之一。通常研究以坡面长度、糙率、降雨强度及坡度的恒定指数形式表征其汇流时间变化,而植被对汇流时间的影响是隐含在糙率之中。本研究基于不同下垫面情况进行不同坡度、雨强下坡面汇流的系列试验,引入植被覆盖度因子,分析了植被对坡面汇流时间的影响。初步结论如下:

1) 植被的种类(草或灌木)对坡面汇流时间影响存在一定差异,其它条件相同情况下,草植被下的坡面汇流时间大于灌木植被下的坡面汇流时间。

2) 植被覆盖度(草或灌木)对坡面汇流时间存在显著影响,其它条件相同情况下,坡面汇流时间随植被覆盖度的增大出现明显的增加。

3) 降雨强度、坡度对坡面汇流时间的影响也较为显著。其它条件相同情况下,坡面汇流时间随雨强的增大出现明显的减小;随坡度的增大出现明显的减小。

4) 草及灌木植被覆盖度指数随坡度及雨强变化规律基本相似,总体上草植被覆盖度指数略大于灌木植被覆盖度指数。植被覆盖度指数 a_0 随着雨强增大减小趋势较为明显;随坡度变缓而有所增大。

5) 本研究将植被因子从综合糙率中剥离出来,便于融合植被遥感数据,从而提高坡面汇流时间的计算精度。

参考文献:

- [1] Liu Zhanzhou, Ao Tianqi, Wan Yu'an. Study on the effect of basin vegetation types on flood runoff[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2014, 20(9):1-4. [刘占洲, 敖天其, 万育安. 流域植被类型对洪水径流影响研究[J]. *水利科技与经济*, 2014, 20(9):1-4.]
- [2] Wang J, Sun G, Shi F, et al. Runoff and soil loss in a typical subtropical evergreen forest stricken by the Wenchuan earthquake: Their relationships with rainfall, slope inclination, and vegetation cover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(1):65-74.
- [3] Li X, Zhang X, Zhang L, et al. Rainfall and vegetation coupling index for soil erosion risk mapping[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(3):213-220.
- [4] S Fusun, W Jinniu, L Tao, et al. Effects of different types of vegetation recovery on runoff and soil erosion on a Wenchuan earthquake-triggered landslide, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 68(2):138-145.
- [5] Zheng Shaowei, Mu Changlong, Chen Zuming, et al. Simulations and analysis on the effects of forest on the hydrological processes in the upper reaches of Yangtze river[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11):3046-3056. [郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 等. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析[J]. *生态学报*, 2010, 30(11):3046-3056.]
- [6] Wang Qinghua, Li huaien, Lu Kefeng, et al. Analysis of affection of forest vegetation change on watershed runoff and flood[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2004, 15(2):21-24. [王清华, 李怀恩, 卢科峰, 等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(2):21-24.]
- [7] Zhang Fahui, Chen Linwu, Wu Xuexian, et al. An analysis of

- influences of forest vegetation changes on the runoff in small watersheds in hilly areas in the upper reaches of the Yangtze river[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2007, 28(2): 49–53. [张发会, 陈林武, 吴雪仙, 等. 长江上游低山丘陵区小流域森林植被变化对径流影响分析[J]. *四川林业科技*, 2007, 28(2): 49–53.]
- [8] Jiménez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. Infiltration rate in andisols: Effect of changes in vegetation cover (Tenerife, Spain)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 61(3): 153–158.
- [9] Cui Yan, Liu Jinying. Study on the benefits of forest to prevent flash flood[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2001, 29(1): 6–7. [崔岩, 刘金英, 杨文娟. 森林对预防山洪暴发效益的研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2001, 29(1): 6–7.]
- [10] He Jimzhi, Li Shuibao, Jiang Yongkui, et al. Analysis of the watershed runoff yield and concentration on the variation of the forest cover[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001, 2(2): 69–72. [何进知, 李舒宝, 蒋永奎, 等. 森林植被对流域产汇流的影响分析[J]. *水力发电学报*, 2001, 2(2): 69–72.]
- [11] Shen Hongbin, Xu Zongxue, Zhang Shuhan. Review on the simulation of overland flow in hydrological models[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3): 467–475. [申红彬, 徐宗学, 张书函. 流域坡面汇流研究现状述评[J]. *水科学进展*, 2016, 27(3): 467–475.]
- [12] Li Ruilin. Some problems of flood prediction in Lianzhou City[J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2010(4): 22–24. [李瑞林. 连州市洪水预报作业中几个问题的探讨[J]. *广西水利水电*, 2010(4): 22–24.]
- [13] Melesse A M, Graham W D. Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(4): 863–879.
- [14] Lee Kwantun. Derivation of variable IUH corresponding to time-varying rainfall intensity during storms[J]. *Hydrological Sciences*, 2008, 53(2): 323–337.
- [15] Chang C H, Lee K T. Analysis of geomorphologic and hydrological characteristics in watershed saturated areas using topographic-index threshold and geomorphology-based runoff model[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(6): 802–812.

(编辑 张 琼)

引用格式: Peng Qing'e, Liu Xingnian, Huang Er, et al. Experimental study on the flow concentration influenced by vegetation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 185–192. [彭清娥, 刘兴年, 黄尔, 等. 植被对坡面汇流时间影响的试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 185–192.]