

山区流域坡面汇流时间参数优化试验研究

彭清娥, 赵明辉, 史学伟, 黄 尔*

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

摘 要:山区流域坡体陡峻、植被覆盖变化大,暴雨作用下的洪水响应过程复杂,坡面汇流时间是洪水过程模拟的关键参数。目前应用最为广泛的坡面汇流时间公式,以坡面长度 L 、糙率 n 、有效降雨强度 i 及坡度 S 的恒定指数形式表征其对汇流时间 T 的变化,公式形式为: $T=L^{0.6}n^{0.6}i^{-0.4}S^{-0.3}$ 。降雨强度对汇流时间的影响,以降雨强度的恒定指数 -0.4 来表征其对汇流时间变化,而较少反映坡度与植被覆盖度的影响。本研究基于不同坡度、不同植被覆盖度条件下坡面汇流的系列试验,结合专业的数据统计软件,对相关数据进行分类处理,深入分析了坡面汇流时间参数的变化规律。研究表明:无植被情况,不同坡度对雨强指数存在一定影响,在 45° 及 30° 坡面上,雨强对坡面汇流时间影响的雨强指数拟合值约为 -0.40 ,这与常用的研究成果基本吻合,在 15° 及 5° 坡面上,雨强指数拟合值分别为 -0.30 及 -0.25 ,比常用雨强指数值略微偏大;有植被覆盖情况,不同植被覆盖度对雨强指数的影响十分明显, 45° 、 30° 及 15° 坡面,植被覆盖度50%以上时其雨强指数拟合值平均为 -0.63 ,明显小于常用雨强指数 -0.4 ,20%覆盖度情况下,雨强指数均值约为 -0.37 ,与常用雨强指数 -0.4 接近, 5° 坡面不同植被覆盖度对雨强指数影响不大,雨强指数基本在 $-0.25\sim-0.30$ 之间。

关键词:山区流域;人工模拟降雨;汇流时间;雨强指数

中图分类号:TV124

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0064-07

Experimental Study on Optimization of Flow Concentration Time Parameter in Mountainous Watershed

PENG Qing'e, ZHAO Minghui, SHI Xuewei, HUANG Er*

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

Abstract: The flood response process under heavy rains is extremely complicated due to steep slopes and variable vegetation coverage in mountainous area and the runoff convergence time in the slope has become a key parameter in flood process simulation. The most widely used flow concentration time formula at present is $T=L^{0.6}n^{0.6}i^{-0.4}S^{-0.3}$, where T is the flow concentration time, L is the slope length, n is the roughness, i is the effective rainfall intensity and S is the slope. The current studies generallyly use a constant index of rainfall intensity to characterize runoff convergence time while few study considers the slope and vegetation abundance effects. In this work we conducted a series of indoor experiments to study overland flow concentration under different slopes and vegetation coverage conditions. In addition, the variation rules of runoff convergence time parameters are analyzed as well. The results show that the fitting value of rain intensity index represented for the impact of rain intensity on confluence time is about -0.40 on the 45° and 30° slope, which is consistent with frequently-used results of previous research. However, when it comes to the 15° and 5° slopes, the fitting values of rain intensity index turn into -0.30 and -0.25 respectively, which is slightly larger than that used in the common approaches. The further investigation under conditions with vegetation suggests that rain intensity index changes obviously with the existence of vegetation: while on slopes of 45° , 30° and 15° , the average fitting value of rain intensity index falls to -0.63 when vegetation coverage is 50% or above, significantly less than the theoretical value of -0.4 ; the mean value of rain intensity index in 20% coverage is about -0.37 , almost the same as that in vegetation-free situation. In addition, rain intensity index under 5° slope condition for different vegetation coverage is relatively stable at values between -0.30 and -0.25 .

收稿日期:2017-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51639007);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: Pengqinge@126.com

* 通信联系人 E-mail: Huang_er@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-08-30 00:01:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180830.0001.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

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

Key words: mountainous watershed; artificial rainfall; flow concentration time; rainfall intensity index

目前,较为常用的分布式水文模型有美国的TOPMODEL等^[1]模型、SWAT等^[2]模型、欧洲的SHE模型^[3-4]、中国的新安江模型^[5]以及流溪河模型^[6-7]等。水文模型的开发与应用得到了广大水文工作者前所未有的青睐和关注。如Arpana等^[8]2015年进行的基于2阶自回归模型的似然函数在SWAT模型的标定和不确定度分析中的应用;Richard等^[9]2017年进行的用多输入多模型平均框架改进水文模型模拟。尽管如此,分布式水文模型目前的应用仍存在一定局限性,遥感资料还没有完全融入水文模型的结构中。本研究的主要目的正是试图将下垫面情况的遥感资料融入到分布式水文模型中,通过系列人工模拟降雨试验,对坡面汇流时间公式进行修正及参数优化,为建立适于山区流域强降雨情况下的分布式水文模型奠定基础。

山区流域坡体陡峻、植被覆盖变化大,暴雨作用下的洪水响应过程复杂,坡面汇流时间是洪水过程模拟的关键参数。如申红彬等^[10]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。李瑞林等^[11]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;同时在影响洪水量级预报精度的几个问题中指出,洪水量级的大小不仅取决于降水量的大小,与流域内干支流洪水遭遇叠加有很大关系,也即与各干支流的汇流时间关系甚为密切;坡面汇流时间将直接影响峰现时间及洪峰量级的预报精度。

目前有关坡面汇流时间的应用与研究中,较多以降雨强度的恒定指数形式表征其汇流时间变化,而较少反映坡度与植被覆盖度的影响。日本学者水上高久等^[12]研究的山区河流洪水汇流时间公式,其雨强指数为-0.35;美国佛罗里达大学的Melesse等^[13]2004年提出的基于汇流时间方法的空间分布式水文模型中,山坡流的汇流时间用运动波方程表示,其雨强指数为-0.4;台湾学者李光敦等^[14-15]研究的地貌瞬时单位线模型(KW-GIUH模型)中,汇流时间公式的推求,也是在运动波理论基础上,考虑各级序河网汇流状况,推求出各级序坡地流与渠流的汇流时间,其雨强指数为-0.4。作者通过室内人工模拟降雨试验来探讨不同雨强下坡度、植被覆盖度对坡面汇流

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。

模型修建时采用水泥抹面,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地面及铺设塑料草坪两种情况,不考虑产流,降雨量即为有效降雨量。本研究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,集流槽及三角形薄壁堰等见图2。

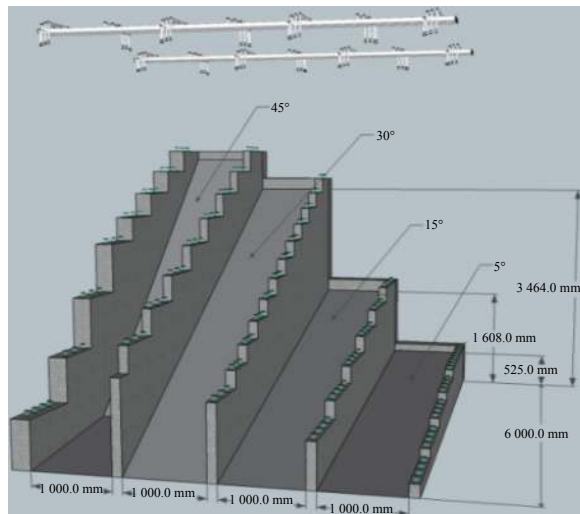


图1 降雨试验模型布置

Fig. 1 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。

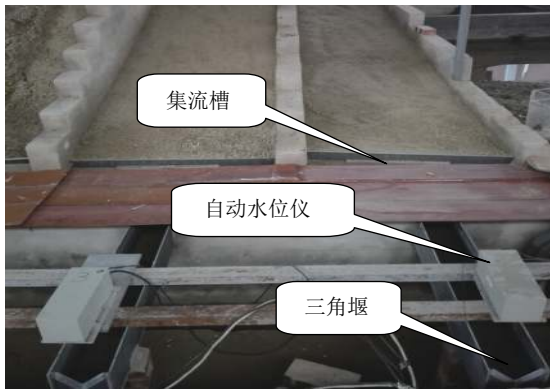


图 2 集流槽、三角堰及自动水位仪

Fig. 2 Collector slot, triangular weir and automatic water level instrument

作者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

本次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2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:水泥抹面及水泥抹面+塑料草坪,其中塑料草坪铺设占比有20%、50%、80%及100%,以此模拟植被不同覆盖度。

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。

本次试验主要在4种不同坡度坡面进行,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,尽量满足不下渗这一初始假设。试验对4种不同坡度坡面,以及不同植被覆盖度均进行了9种不同雨强降雨时各自达到汇流稳定时汇流时间的测量。同时,为保证试验数据的可靠性,每组试验都重复进行3次,以期建立各因子与汇流时间的关系式,真正实现汇流时间的分布式特点,提高分布式水文模型模拟精度。

2 试验结果分析

查阅文献可发现,汇流时间 T 和雨强 I 呈现出反比的关系,一般关系为: $T \propto I^{a_1}$,这里 a_1 为雨强指数,一般理论值为-0.4。

本试验研究的目的是有两点:其一是检验常用的降雨强度指数 a_1 在山区流域坡度、植被覆盖度发生较大变化情况下,其值为-0.4恒定值是否合理;其二,若不合理,结合试验数据给出具体的雨强指数 a_1 的确定方式。

本文重点通过室内人工模拟降雨试验研究不同坡面、不同植被覆盖度下雨强对坡面汇流时间的影响,明确雨强与坡面汇流时间的关系式。

每次降雨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。

2.1 坡度对坡面汇流时间的影响

山区流域地形地貌复杂,地形坡度的空间差异性较大,不同坡度下,雨强对汇流时间的影响指数是否保持恒定不变,正是下面试验研究的内容。本次试验是在4种不同坡面均无植被覆盖情况下进行的。每种坡面分别进行了9种不同雨强的降雨过程。

2.1.1 坡面汇流时间的提取

图3为4种不同坡度的不透水坡面,在人工模拟不同雨强降雨时坡面汇流达到稳定的整个汇流过程。通过上述不同坡面不同雨强下的汇流过程试验,提取出每种工况下汇流达到稳定时的汇流时间。

2.1.2 不同坡面雨强指数的拟合

从数据上看,4种不同坡度的坡面均呈现出随着雨强的增大汇流时间在逐渐变小的趋势。而不同坡面下雨强与汇流时间关系中的雨强指数是否保持一致,下面采用MATLAB对试验数据进行编程处理,如图4得出了不同坡面雨强指数 a_1 的拟合值。

从拟合结果看,在45°、30°、15°及5°坡面上,雨强指数的拟合结果分别为-0.41、-0.40、-0.30及-0.25;不同坡度的坡面对雨强指数存在一定影响。在45°及

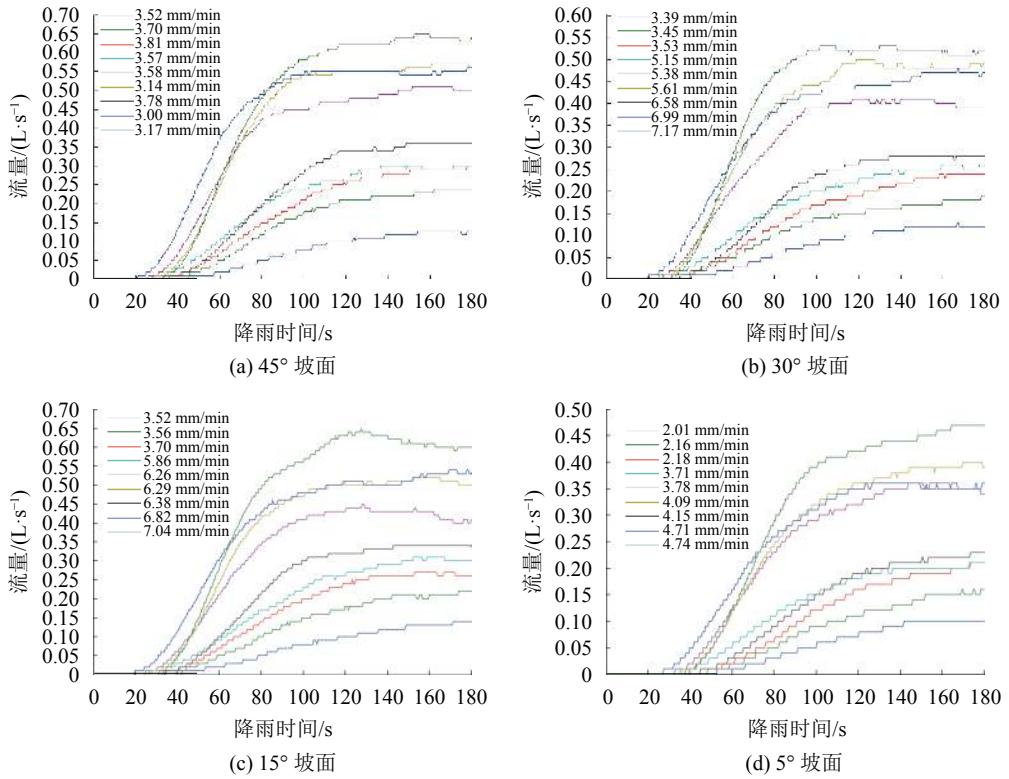


图 3 不同坡面不同雨强降雨汇流过程

Fig. 3 Overland flow process of different slope and rainfall intensity

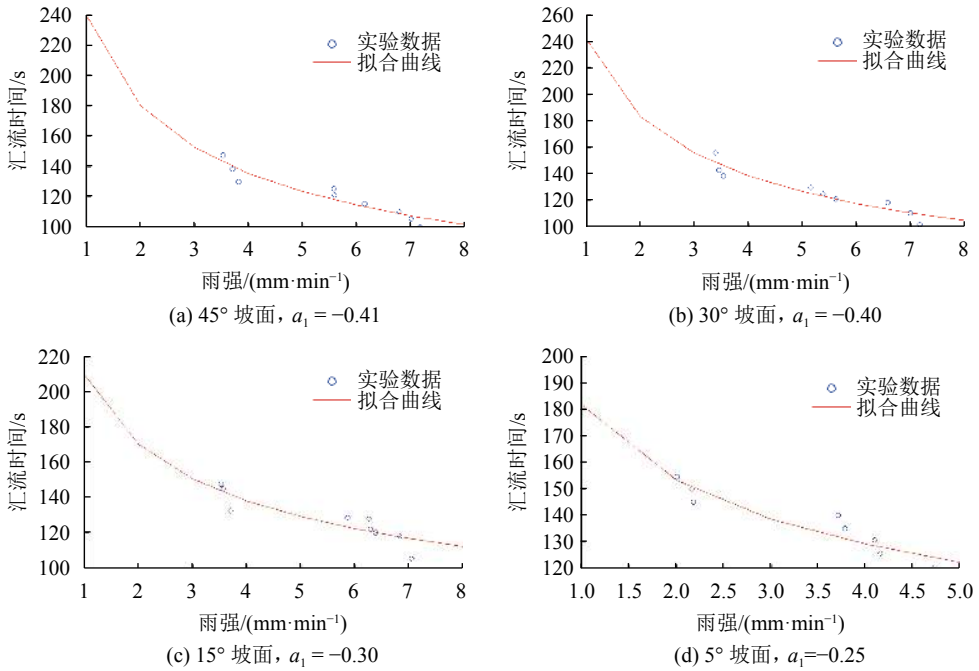


图 4 不同坡度下雨强指数拟合结果

Fig. 4 Results of rain intensity index fitting with different slope

30°坡面上, 雨强对汇流时间影响与现有理论相一致, 其指数拟合值 a_1 基本为 -0.40 ; 在15°及5°坡面上, 雨强对汇流时间影响与现有理论产生一定偏差, 其指数拟合值 a_1 分别为 -0.30 及 -0.25 。

2.2 植被覆盖度对汇流时间的影响

山区流域不仅其坡度具有较大空间差异性, 植被覆盖度由于受所处海拔高度、季节变化、人工耕作等影响, 在时间和空间上均存在很大差异。

前面从不同坡度方面探讨了影响汇流时间的雨强指数随坡度的变化,下面看看不同植被覆盖度对雨强指数是否存在影响。

试验进行了5种不同覆盖度情况,分别为100%草

皮、80%草皮、50%草皮、20%草皮及无草皮。试验草坪铺设情况见图5。

不同坡度不同植被覆盖度下各雨强对应的汇流时间试验结果见表1~4。

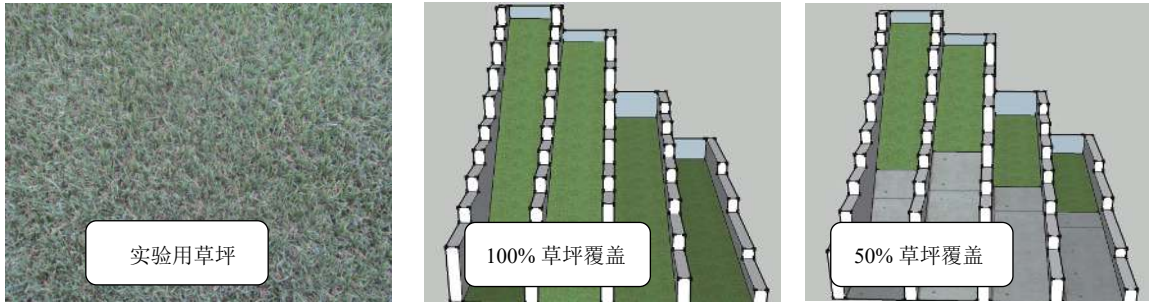


图 5 试验草坪铺设情况

Fig. 5 Test lawn laying situation

表 1 45°坡面不同植被覆盖度汇流时间统计

Tab. 1 Statistics of confluence time of different vegetation coverage on 45 degree slope

覆盖度	雨强/(mm·min ⁻¹)								
	3.52	3.70	3.81	5.57	5.58	6.14	6.78	7.00	7.17
100%草皮	245.0	235.5	218.0	189.0	175.5	161.0	158.5	145.0	140.5
80%草皮	232.0	210.5	198.5	173.5	169.0	151.0	148.5	136.0	128.5
50%草皮	220.0	202.5	190.0	165.5	160.0	146.5	140.0	131.0	126.0
20%草皮	155.5	150.5	145.0	142.0	137.5	130.0	125.5	120.0	115.0
无草皮	147.5	138.5	130.0	125.5	121.0	115.5	110.0	105.5	100.0

表 2 30°坡面不同植被覆盖度汇流时间统计

Tab. 2 Statistics of confluence time of different vegetation coverage on 30 degree slope

覆盖度	雨强/(mm·min ⁻¹)								
	3.39	3.45	3.53	5.15	5.38	5.61	6.58	6.99	7.17
100%草皮	254.5	248.0	240.0	208.5	192.0	185.5	162.5	151.0	145.5
80%草皮	240.5	232.5	210.0	185.5	179.5	168.0	158.0	142.5	136.0
50%草皮	230.0	216.0	202.5	173.0	169.5	158.0	142.5	135.0	130.0
20%草皮	168.5	157.0	149.5	138.0	132.0	129.0	120.5	115.5	105.0
无草皮	156.0	143.0	138.5	130.0	125.0	121.0	118.5	110.5	102.0

表 3 15°坡面不同植被覆盖度汇流时间统计

Tab. 3 Statistics of confluence time of different vegetation coverage on 15 degree slope

覆盖度	雨强/(mm·min ⁻¹)								
	3.52	3.56	3.70	5.86	6.26	6.29	6.38	6.82	7.04
100%草皮	268.5	252.0	246.0	210.5	193.0	183.5	178.5	175.0	165.5
80%草皮	252.5	240.0	220.5	195.5	185.0	180.5	171.0	163.0	155.0
50%草皮	200.5	220.0	175.5	163.0	172.0	150.5	146.5	135.5	130.0
20%草皮	155.5	158.0	145.5	140.0	136.0	130.0	123.5	125.0	109.5
无草皮	147.5	145.0	132.5	128.5	128.0	122.0	120.0	118.0	105.5

表 4 5°坡面不同植被覆盖度汇流时间统计

Tab. 4 Statistics of confluence time of different vegetation coverage on 5 degree slope

覆盖度	雨强/(mm·min ⁻¹)								
	2.01	2.16	2.18	3.71	3.78	4.09	4.15	4.71	4.74
100%草皮	282.0	278.5	275.0	245.5	238.5	230.0	225.5	220.0	218.5
80%草皮	275.5	268.0	260.0	235.5	230.0	220.5	215.5	210.0	200.0
50%草皮	260.0	250.5	235.5	225.0	220.5	213.0	200.5	190.0	185.5
20%草皮	170.5	162.0	158.5	150.0	142.5	140.0	135.5	130.0	125.5
无草皮	154.5	150.0	145.0	140.0	135.0	130.5	125.5	120.0	118.5

下面同样采用MATLAB对上述试验数据进行编程处理, 得出了不同坡面不同植被覆盖度情况下, 雨强指数 a_1 的拟合值。研究表明, 植被覆盖度对雨强指数存在较为显著的影响: 15°以上坡度坡面、50%覆盖度以上其雨强指数 a_1 值基本在-0.5~-0.7; 20%覆盖度与无草皮情况基本相当; 5°小坡度坡面不同植被覆盖度对雨强指数影响不大。这说明在山区流域不同坡度、植被覆盖度地区其降雨的响应过程存在明显差异, 选用汇流时间公式时需要调整雨强指数。

2.3 坡度与植被覆盖度变化条件下的汇流时间计算

查阅文献可知, 目前应用较多的汇流时间公式中雨强指数基本为恒定值, 见表5。从本文研究的结

果看, 无植被情况不同坡度对雨强指数存在一定影响, 在45°及30°坡面上, 雨强对汇流时间影响的雨强指数约为-0.40, 这与理论值基本吻合, 在15°及5°坡面上, 雨强指数 a_1 拟合值分别为-0.30及-0.25, 比理论值略微偏大; 不同植被覆盖度对雨强指数的影响十分明显, 45°、30°及15°坡面情况, 植被覆盖度50%以上时其雨强指数 a_1 拟合值平均为-0.63, 明显小于理论值-0.4, 20%覆盖度与无植被情况基本相当, 雨强指数均值约为-0.37, 5°坡面不同植被覆盖度对雨强指数影响不大, 雨强指数基本在-0.25~-0.30之间。这说明雨强与汇流时间的指数关系由于受坡度、植被覆盖度影响其值是变化的, 具体取值可参考表6。

表 5 坡面汇流时间公式中雨强指数的确定

Tab. 5 Determination of moderate intensity index of overland flow time formula

研究学者	汇流时间公式	雨强指数	备注
日本水上高久等 ^[12]	$T = CA^{0.22}I^{-0.35}$	-0.35	恒定值
美国Melesse等 ^[13]	$T = L^{0.6}n^{0.6}/i^{0.4}S^{0.3}$	-0.40	恒定值
台湾李光敦等 ^[14]	$T_{x_{oi}} = \frac{h_{osi}}{i_e} = \left(\frac{n_o \bar{L}_{oi}}{\bar{S}_{oi}^{1/2} i_e^{m-1}} \right)^{1/m}, m = 0.6$	-0.40	恒定值
作者本人	$T = KI^{a_1}S^{a_2}C^{a_3}n^{a_4}L^{a_5}$	a_1 参考表6	受坡度、植被变化

表 6 不同坡度、不同植被覆盖度下雨强指数 a_1

Tab. 6 Rainfall intensity index a_1 with different slope and different vegetation coverage

覆盖度	坡度/(°)			
	45	30	15	5
100%草皮	-0.69	-0.66	-0.68	-0.29
80%草皮	-0.67	-0.63	-0.55	-0.31
50%草皮	-0.66	-0.66	-0.51	-0.30
20%草皮	-0.32	-0.47	-0.34	-0.28
无草皮	-0.41	-0.40	-0.30	-0.25

从研究结果看, 对于地形地貌复杂的山区流域, 尤其植被覆盖度差异较大的流域, 其暴雨洪水的响应过程也会产生明显差异, 使用单一的雨强指数值

可能导致汇流时间产生较大偏差, 从而导致峰现时间及洪峰值的计算结果均与实际产生较大偏离; 在分布式水文模型的实际应用中, 可结合地形坡度及植被覆盖度给出相应的雨强指数, 形成分布式汇流时间, 这对极端强降雨情况下山洪的计算将尤为重要。

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, 本研究基于不同坡度、不同植被覆盖度条件下坡面汇流的系列试验, 深入分析了山区流域坡面汇流时间参数的变化规律。初步结论如下:

1) 无植被情况不同坡度对雨强指数存在一定影响, 在 45° 及 30° 坡面上, 雨强对汇流时间影响的雨强指数 a_1 拟合值约为 -0.40 , 这与前人常用的研究成果基本吻合, 在 15° 及 5° 坡面上, 雨强指数 a_1 拟合值分别为 -0.30 及 -0.25 , 比常用方法略微偏大。

2) 不同植被覆盖度对雨强指数的影响十分明显, 45° 、 30° 及 15° 坡面, 植被覆盖度50%以上时其雨强指数 a_1 拟合值平均为 -0.63 , 明显小于 -0.4 , 20%覆盖度与无植被情况基本相当, 雨强指数均值约为 -0.37 , 5° 坡面不同植被覆盖度对雨强指数影响不大, 雨强指数基本在 $-0.25 \sim -0.30$ 之间。

参考文献:

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Science Bulletin*, 1979, 24(1): 43–69.
- [2] Arnold J G. Large area hydrologic modeling and assessment—Part I: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73–89.
- [3] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European hydrologic system—System hydrologue European, ‘SHE’, a: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1): 45–59.
- [4] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European hydrologic system—System hydrologue European, ‘SHE’, b: Structure of a physically based, distributed modeling system[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1): 61–77.
- [5] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [6] 陈洋波. 流溪河模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] Chen Yangbo, Ren Qiwei, Huang Fenghua. Liuxihe model and its modeling to river basin flood[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(1): 33–50.
- [8] Datta A R, Bolisetti T. Second-order autoregressive model-based likelihood function for calibration and uncertainty analysis of SWAT model[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(2): 04014045.
- [9] Arsenault R, Essou G R C, Brissette F P. Improving hydrological model simulations with combined multi-input and multimodel averaging frameworks[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 22(4): 04016066.
- [10] 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.]
- [11] Li Ruilin. Some problems of flood prediction in Lianzhou City[J]. *Gx 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.]
- [12] 水上高久, 濂尾克美, 冯明祥. 山区小流域洪水汇流时间和短时间降雨强度与降雨历时的关系[J]. *水土保持科技情报*, 1985(4): 24–28.
- [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*, 2010, 40(4): 863–879.
- [14] Lee K T, Chen N C, Chung Y R. 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): 802–812.

(编辑 张琼)

引用格式: Peng Qing'e, Zhao Minghui, Shi Xuewei, et al. Experimental study on optimization of flow concentration time parameter in mountainous watershed[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 64–70. [彭清娥, 赵明辉, 史学伟, 等. 山区流域坡面汇流时间参数优化试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 64–70.]