

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0068

陈萌, 翁朝晖, 范杨臻, 等. 小流域截洪沟洪峰流量计算方法研究与比较[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 51-58. CHEN M, WENG Z H, FAN Y Z, et al. Study and comparison of calculation methods for flood peak discharge of cut off ditch in small watershed[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 51-58. (in Chinese)

小流域截洪沟洪峰流量计算方法研究与比较

陈萌¹, 翁朝晖¹, 范杨臻^{2,3}, 余明辉², 魏红艳²

(1. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

摘要: 截洪沟洪峰流量是截洪沟设计的重要参数。通过工程实例分析比较三种截洪沟洪峰流量计算方法, 研究了降雨历时、山洪容重和重现期对三种方法洪峰流量的影响, 并分析了各方法主要影响因素的显著程度。结果表明, 对于工程实例, 方法1(水土保持工程设计规范)和方法3(室外排水设计规范)的结果较接近, 更偏安全。洪峰流量随降雨历时的增大逐渐减小, 两者呈幂函数关系; 洪峰流量随山洪容重的增大而增大, 两者基本呈指数函数关系; 洪峰流量随重现期的增大基本呈对数增长趋势。方法1和方法3各因素的影响程度从大到小排序为汇流面积> 降雨历时> 径流系数> 重现期; 方法2(开发建设项目水土保持技术规范)各因素的影响程度从大到小排序为汇流面积> 径流系数> 重现期> 高含沙山洪容重。

关键词: 截洪沟; 洪峰流量; 降雨历时; 重现期; 山洪容重; 径流系数; 汇流面积

中图分类号: TV 122 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)03-0051-08

Study and comparison of calculation methods for flood peak discharge of cut-off ditch in small watershed

CHEN Meng¹, WENG Zhao-hui¹, FAN Yang-zhen^{2,3}, YU Ming-hui², WEI Hong-yan²

(1. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: The flood peak discharge of a cut-off ditch is an important parameter in cut-off ditch design. In this paper, we compared three calculation methods for flood peak discharge of cut-off ditches based on a project case. We studied the influence of rainfall duration, unit weight of torrential flood, and recurrence interval on flood peak discharge, and analyzed the significance degree of the influence factors. It was found that Method 1 (Code for design of soil and water conservation projects) and Method 3 (Code for design of outdoor drainage projects) had similar results for the project case and both leaned towards safety. The flood peak discharge would gradually decrease with the increase of rainfall duration, with a power function relation between them. The peak discharge would increase with the increase of unit weight of torrential flood, with an exponential function relation between them. The peak discharge showed a trend of logarithmic growth with the increase of recurrence interval. Catchment area had the largest influence on flood peak discharge for Methods 1 and 3, followed by rainfall duration and runoff coefficient, while the influence of recurrence interval on flood peak discharge was the smallest. Catchment area had the largest influence on flood peak discharge for Method 2 (Technical code on soil and water conservation of development and construction projects), followed by runoff coefficient and recurrence interval, while the influence of unit weight of torrential flood on flood peak discharge was the smallest for Method 2.

Key words: cut-off ditch; peak discharge; rainfall duration; recurrence interval; unit weight of torrential flood; runoff coefficient; catchment area

收稿日期: 2017-11-21 修回日期: 2018-02-08 网络出版时间: 2018-03-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180327.1621.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金(11502174; 11472198)

Funds: National Natural Science Foundation of China(11502174; 11472198)

作者简介: 陈萌(1989-), 女, 河南信阳人, 工程师, 博士, 主要从事防洪排涝和泥水环境等方面的工作。E-mail: dongyuecao@126.com

截洪沟是为了拦截排水地区坡面上部的径流而修建的排水沟道,用来保护某一地区或某项工程免受洪水造成的渍涝和冲刷。截洪沟的设计流量是一个重要的参数,它是确定截洪沟断面尺寸的重要依据。由于截洪沟的洪水流量过程线一般峰高量小,历时短,因此,可采用洪峰流量作为截洪沟的设计流量^[1]。

受降雨强度、地表粗糙度、山坡坡度、土壤结构等因素的影响,坡面产汇流是一个极为复杂的过程^[2,6]。因此,小流域截洪沟洪峰流量的计算方法较多,水利、市政、交通、水保等部门的相关规范以及地方标准中均有常用的推荐方法^[7-15]。刘俊萍等^[16]针对三个级别汇流面积的小流域截洪沟,比较了室外排水手册——雨水流量公式法和公路科学研究院经验公式法。郑佳重等^[17]比较了中国水利水电科学研究院水文研究所公式法(简称推理公式法)、中国公路科学研究院经验公式法(简称经验公式法)和《安徽省暴雨参数等值线图、山丘区产汇流分析成果和山丘区中、小面积设计洪水计算办法》(简称“84办法”),得出“84办法”在洪峰流量计算中的应用是合理可行的。以上研究比较了市政部门的雨水流量公式法、公路科学研究院经验公式法以及地方标准中的方法,而未涉及水保部门推荐的方法。钟鸣辉^[18]比较了水土保持规范中的两种计算方法,但仅考虑的是清水洪峰流量,未考虑高含沙山洪容重的影响,且未与其它部门常采用的方法进行比较。本文通过实例计算对水保部门常采用的水土保持工程设计规范中的方法(方法1)、开发建设项目水土保持技术规范中的方法(方法2)以及市政部门常采用的室外排水设计规范中的方法(方法3)进行比较,并分析降雨历时、山洪容重和重现期对截洪沟洪峰流量的影响规律以及各因素影响的显著程度,为截洪沟的合理设计提供思路和参考。

1 研究方法

本文首先通过工程实例,分别按照《水土保持工程设计规范》、《开发建设项目水土保持技术规范》和《室外排水设计规范》进行计算,并对三种方法的计算结果进行比较。其次,分析研究降雨历时对流量的影响,分别选取降雨历时为5、20、40、60、90和120 min进行分析;分析研究洪水容重对流量的影响,分别选取高含沙山洪容重为1.1、1.2、1.3、1.4和1.5 t/m³进行分析;分析研究重现期对三种方法流量的影响,分别选取重现期为3、5、10、15、20、30、50和100年进行分析。最后,通过SPSS软件,分析

和比较各方法的影响因素对截洪沟洪峰流量影响的显著程度。下面先对几种方法进行介绍。

1.1 方法1

依据《水土保持工程设计规范》(GB 51018-2014),永久截洪沟设计排水流量按下式计算^[19]。

$$Q_m = 16.67 \varphi q F \quad (1)$$

式中: Q_m 为设计洪峰流量(m³/s); φ 为径流系数; q 为设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度(mm/min); F 为山坡集水面积(km²)。

当缺乏自记雨量计资料时,可采用查降雨强度表法,利用标准降雨强度等值线图和有关转换系数进行计算,具体见式(2)。

$$q = C_p C_t q_{5,10} \quad (2)$$

式中: $q_{5,10}$ 为5年重现期和10 min降雨历时的标准降雨强度,可按工程所在地区,查中国5年一遇10 min降雨强度 $q_{5,10}$ 等值线图(mm/min); C_p 为重现期转换系数,为设计重现期降雨强度 q_p 同标准重现期降雨强度 q_5 的比值(q_p/q_5),按工程所在地区查表确定; C_t 为降雨历时转换系数,为降雨历时 t 的降雨强度 q_t 同10 min降雨历时的降雨强度 q_{10} 的比值(q_t/q_{10}),先查我国60 min降雨强度转换系数等值线图(C_{60}),再按工程所在地区的60 min转换系数(C_{60})查表取值。其中,降雨历时 t 为汇水区最远点到排水设施处的坡面汇流历时 t_1 与沟管汇流历时 t_2 之和(min)。

坡面汇流历时 t_1 可按下式计算:

$$t_1 = 1.445 \left[\frac{m_1 L_s}{f_s} \right]^{0.467} \quad (3)$$

式中: L_s 为坡面流的长度(m); i_s 为坡面流的坡降,以小数计; m_1 为地面粗糙系数,可按地表情况确定。

沟管汇流时间 t_2 按下式计算:

$$t_2 = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{160v_i} \quad (4)$$

式中: n 和 i 为分段数和分段序号; L_i 为第 i 段的长度(m); v_i 为第 i 段的平均流速(m/s)。

沟管的平均流速 v (m/s)可按下式计算^[20]:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (5)$$

式中: n 为沟管壁的粗糙系数; R 为水力半径(m), $R = A/X$, X 为过水断面湿周(m); I 为水力坡度,可取沟管的底坡(以小数计)。

1.2 方法2

依据《开发建设项目水土保持技术规范》(GB 50433-2008)进行计算^[21]。首先按公式(6)计算清水洪峰流量。

$$Q_B = 0.278k \cdot i \cdot F \quad (6)$$

式中: Q_B 最大清水流量(m^3/s); k 为径流系数; i 为平均 1 h 降雨强度(mm/h); F 为山坡集水面积(km^2)。

然后采用公式(7)和(8)计算高含沙洪峰流量。

$$Q_S = Q_B(1 + \varphi) \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{r_c - 1}{r_h - r_c} \quad (8)$$

式中: Q_S 为高含沙洪水洪峰流量(m^3/s); Q_B 为最大清水流量(m^3/s); φ 为修正系数; r_c 为高含沙山洪容重, 一般为 $1.1 \sim 1.5 \text{ t}/\text{m}^3$; r_h 为高含沙山洪中固体物质容重, 取 $2.65 \text{ t}/\text{m}^3$ 。

1.3 方法 3

依据《室外排水设计规范》(GB 50014-2006)(2014年版)进行计算^[22]。

$$Q = \Psi \cdot q \cdot F \quad (9)$$

式中: Q 为雨水设计流量(L/s); Ψ 为径流系数; q 为设计暴雨强度($\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$); F 为汇水面积(hm^2)。

式(9)中设计暴雨强度 q 采用下式计算:

$$q = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (10)$$

式中: A_1 为在重现期下的设计降雨的雨量; C 为雨力变动系数, 是反映设计降雨各历时不同重现期的强度变化程度的参数之一; P 为重现期(a); t 为降雨历时(min), 计算方法同 1.1 节相关公式; b 为参数。

2 实例分析

某工程区位于湖北省武汉市, 汇流面积约 0.19 km^2 , 防洪排水标准为 10 年一遇^[23,24]。根据《水利水电工程水土保持技术规范》(SL 575-2012)^[25], 陡峻的山地径流系数一般为 $0.75 \sim 0.9$, 计算时取 0.8 。截洪沟长约 1.56 km 。坡面流的坡降取有代表性山坡坡度的算术平均值, 约为 0.54 。

2.1 设计暴雨计算

截排水工程应按短历时设计暴雨计算设计排水流量, 截洪沟排水流量采用 1 h 雨量进行计算。采用湖北省水文水资源局 2008 年编制的《湖北省暴雨统计参数图集》成果, 工程区最大 1 h 点雨量的均值 $i = 45.8 \text{ mm}$, 变差系数 $C_v = 0.41$, 偏态系数 C_s 取 $3.5C_v$ 。根据 C_v 和 C_s 查表可得不同频率下最大 1 h 降雨量见表 1, 其中 10 年、20 年、50 年、100 年一遇最大 1 h 降雨量分别为 70.8 mm 、 82.3 mm 、 96.9 mm 和 107.6 mm 。工程区面积较小, 可用点暴雨代替面雨量, 故不作设计暴雨的点面折减。

表 1 最大 1 h 设计点雨量计算成果

重现期/年	100	50	30	20	15	10	5	3
频率(%)	1	2	3.3	5	6.7	10	20	33.3
降雨量/mm	107.6	96.9	88.8	82.3	77.6	70.8	59.0	49.6

2.2 暴雨强度计算

根据武汉市排水防涝系统规划设计标准, 武汉市短历时暴雨的暴雨强度应采用下式计算:

$$q = \frac{885 / (1 + 1.58 \lg(P + 0.66))}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (P = 0.5 \sim 10 \text{ 年}) \quad (11)$$

$$q = \frac{577(1 + 0.96 \lg P)}{(t + 2.26)^{0.432}} \quad (P = 10 \sim 50 \text{ 年}) \quad (12)$$

$$q = \frac{1057}{(t - 0.57)^{0.317}} \quad (P = 100 \text{ 年}) \quad (13)$$

式中: q 为设计暴雨强度 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; P 为重现期(年); t 为降雨历时(min)。

2.3 结果与分析

2.3.1 方法 1

方法 1 中, 降雨历时包括坡面汇流历时和沟管内汇流历时两部分。由于沟管内汇流历时需在截洪沟过水断面确定后, 根据流速计算得到。然而, 此时截洪沟设计流量尚未确定, 无法设计过水断面。因此, 需进行试算。先假设沟管内汇流历时 t_2 , 计算总汇流历时 t , 确定截洪沟的设计流量和断面尺寸; 再根据断面尺寸, 按曼宁公式计算沟管内的平均流速, 进而重新计算汇流历时。将计算得到的汇流历时和假设的汇流历时进行比较, 如果两者相差较大, 则需重新假设进行计算。经试算得到 10 年一遇标准下, 截洪沟的设计洪峰流量约为 $4.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3.2 方法 2

由 2.1 节可知, 10 年一遇 1 h 降雨强度为 70.8 mm , 即 $i = 70.8 \text{ mm}/\text{h}$ 。根据方法 2, 计算得到 10 年一遇设计标准下, 截洪沟的清水洪峰流量约为 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。高含沙山洪容重为 $1.2 \text{ t}/\text{m}^3$ 时, 高含沙洪峰流量约为 $3.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3.3 方法 3

经计算, 10 年一遇设计暴雨强度 q 为 $267.83 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$, 截洪沟的设计洪峰流量为 $4.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3.4 三种方法比较

通过对上述三种方法的结果进行比较, 可以得出 10 年一遇设计标准下, 根据方法 2《开发建设项目水土保持技术规范》计算得到的洪峰流量最小, 根据方法 1《水土保持工程设计规范》和方法 3《室外排

水设计规范》计算得到的洪峰流量较方法 2 大。方法 1 和方法 3 的结果较为接近, 约是方法 2 的 1.2 倍。因此, 对于该工程来说, 采用方法 1 和方法 3 计算得到的洪峰流量更偏安全。

3 影响因素对洪峰流量的影响分析

3.1 降雨历时对流量的影响

为了研究降雨历时对流量的影响, 分别取降雨历时为 5、20、40、60、90 和 120 min 进行分析。不同降雨历时下, 根据方法 1 和方法 3 计算得到的洪峰流量 Q_1 和 Q_3 如图 1 和图 2 所示。

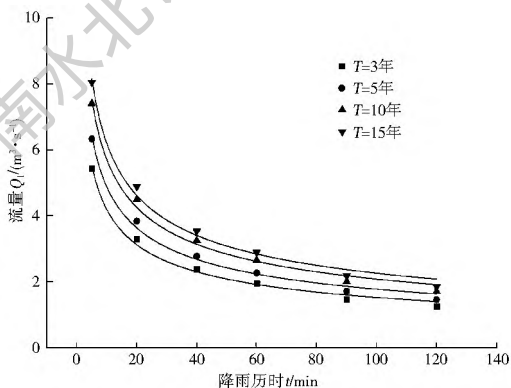


图 1 洪峰流量 Q_1 与降雨历时 t 的关系

Fig. 1 Relationship between peak discharge and rainfall duration in Method 1

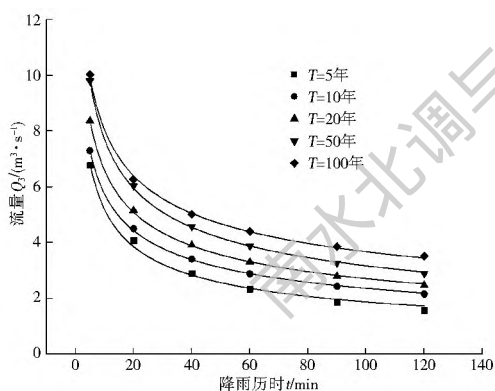


图 2 洪峰流量 Q_3 与降雨历时 t 的关系

Fig. 2 Relationship between peak discharge and rainfall duration in method 3

由图 1 和图 2 可知: 洪峰流量随降雨历时的增大逐渐减小, 两者呈幂函数关系。当降雨历时小于 60 min 时, 降雨历时对流量的影响较大; 当降雨历时大于 60 min 时, 降雨历时对流量的影响减弱。洪峰流量 Q_1 与降雨历时的关系可由式(14)–式(17)表示, 洪峰流量 Q_3 与降雨历时的关系可由式(18)–式(22)表示, 决定系数均在 0.99 以上, 拟合效果良好。

$$Q_1 = 12.421(1+t)^{-0.453} (T=3 \text{ 年}) (R^2 = 0.991) \quad (14)$$

$$Q_1 = 14.443(1+t)^{-0.453} (T=5 \text{ 年}) (R^2 = 0.991) \quad (15)$$

$$Q_1 = 16.898(1+t)^{-0.453} (T=10 \text{ 年}) (R^2 = 0.991) \quad (16)$$

$$Q_1 = 18.342(1+t)^{-0.453} (T=15 \text{ 年}) (R^2 = 0.991) \quad (17)$$

$$Q_3 = 15.628(1+t)^{-0.459} (T=5 \text{ 年}) (R^2 = 0.994) \quad (18)$$

$$Q_3 = 15.026(1+t)^{-0.401} (T=10 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (19)$$

$$Q_3 = 17.241(1+t)^{-0.401} (T=20 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (20)$$

$$Q_3 = 20.169(1+t)^{-0.401} (T=50 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (21)$$

$$Q_3 = 18.780(1+t)^{-0.353} (T=100 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (22)$$

3.2 高含沙山洪容重对流量的影响

为了比较不同高含沙山洪容重对洪峰流量的影响, 分别取山洪容重为 1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5 t/m³ 进行比较。根据方法 2 计算得到的高含沙洪峰流量与高含沙山洪容重的关系见图 3。

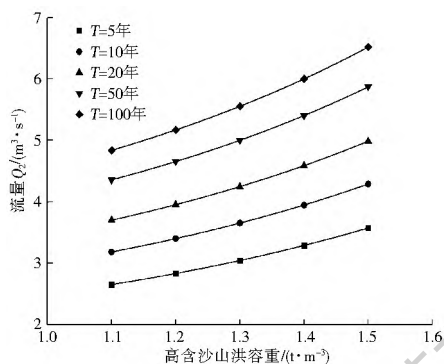


图 3 洪峰流量 Q_2 和高含沙山洪容重的关系

Fig. 3 Relationship between peak discharge and unit weight of torrential flood in Method 2

由图 3 可知: 不同重现期下, 洪峰流量均随山洪容重的增大而增大, 两者呈指数函数关系。洪峰流量与山洪容重的关系可由式(23)–式(27)表示, 决定系数均在 0.99 以上, 拟合效果良好。

$$Q_{2\text{高含沙}} = 1.533 + 0.215 \cdot \exp(1.5 \cdot r_c) \quad (T=5 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (23)$$

$$Q_{2\text{高含沙}} = 1.840 + 0.258 \cdot \exp(1.5 \cdot r_c) \quad (T=10 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (24)$$

$$Q_{2\text{高含沙}} = 2.139 + 0.3 \cdot \exp(1.5 \cdot r_c) \quad (T=20 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (25)$$

$$Q_{2\text{高含沙}} = 2.518 + 0.354 \cdot \exp(1.5 \cdot r_c) \quad (T=50 \text{ 年}) (R^2 = 0.999) \quad (26)$$

$$Q_{2\text{高含沙}} = 2.796 + 0.393 \cdot \exp(1.5 \cdot r_c) \quad (T = 100 \text{ 年}) \quad (R^2 = 0.999) \quad (27)$$

洪峰流量、山洪容重为 1.1 t/m³、1.3 t/m³ 和 1.5 t/m³ 几种情况的结果。

3.3 重现期对流量的影响

为了研究重现期对流量的影响,分别选取重现期为 3、5、10、15、20、30、50 和 100 年进行分析。由于相关规范仅给出了 3、5、10 和 15 年一遇的重现期转换系数,因此方法 1 仅计算了重现期为 3、5、10 和 15 年一遇的情况。根据方法 2 计算的流量分清水流量和高含沙洪水流量两种情况,此处仅以高含沙山洪容重 1.2 t/m³ 为例来计算高含沙洪水洪峰流量。将几种方法计算得到的洪峰流量 Q 与重现期 T 的关系绘于图 4,由图 4 可知:洪峰流量随重现期的增大基本呈对数增长趋势。当重现期小于 50 年时,重现期对流量的影响较大;当重现期大于 50 年时,重现期对流量的影响减弱。

表 2 不同方法下的设计洪峰流量结果

Tab. 2 Results of designed flood peak discharge by different methods

重现期 T / 年	方法 1	设计洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)				方法 3
		方法 2				
		清水流量	高含沙洪水流量			
		山洪容重 1.1 t/m ³	山洪容重 1.3 t/m ³	山洪容重 1.5 t/m ³		
3	2.93	2.1	2.24	2.57	3.01	2.99
5	3.42	2.5	2.66	3.06	3.59	3.44
10	4.05	3.0	3.19	3.67	4.30	4.07
15	4.39	3.28	3.49	4.01	4.71	4.41
20	-	3.48	3.70	4.25	4.99	4.66
30	-	3.75	3.99	4.58	5.38	5.03
50	-	4.1	4.36	5.01	5.88	5.49
100	-	4.55	4.84	5.56	6.53	5.84

由表 2 可知,使用方法 2 依据《开发建设项目水土保持技术规范》,当高含沙山洪容重为 1.5 t/m³ 时,高含沙洪水洪峰流量最大;根据该方法计算得到的清水洪峰流量最小;使用方法 1 根据《水土保持工程设计规范》和使用方法 3 根据《室外排水设计规范》计算得到的洪峰流量介于两者之间。方法 3 的结果略大于方法 1,但总体来说差别不大。当山洪容重较小时,根据方法 2 计算得到的高含沙洪峰流量小于方法 1 和方法 3;当山洪容重较大时,根据方法 2 计算得到的高含沙洪峰流量大于方法 1 和方法 3。即存在一个临界山洪容重,当实际山洪容重大于临界值时,推荐使用方法 2;当实际山洪容重小于临界值时,推荐使用方法 1 和方法 3。

以方法 3 的计算结果为基础,分析其它方法相对该方法的大小关系,详见表 3。由表 3 可知,方法 1 比方法 3 的结果小 0.4%~2.2%。方法 2 的清水洪峰流量比方法 3 的结果小 22.1%~29.8%;当高含沙山洪容重为 1.1 t/m³ 时,使用方法 2 计算的高含沙洪峰流量比方法 3 的结果小 17.1%~25.3%;当高含沙山洪容重为 1.3 t/m³ 时,使用方法 2 计算的高含沙洪峰流量比方法 3 的结果小 4.8%~14.2%;当高含沙山洪容重为 1.5 t/m³ 时,使用方法 2 计算的高含沙洪峰流量比方法 3 的结果大 0.7%~11.8%。此外,当洪水近似为清水以及山洪容重为 1.1、1.3 t/m³ 时,随着重现期的增大,方法 2 与方法 3 结果的差距呈逐渐减小的趋势;当高含沙山洪容重为 1.5 t/m³ 时,随着重现期的增大,方法 2

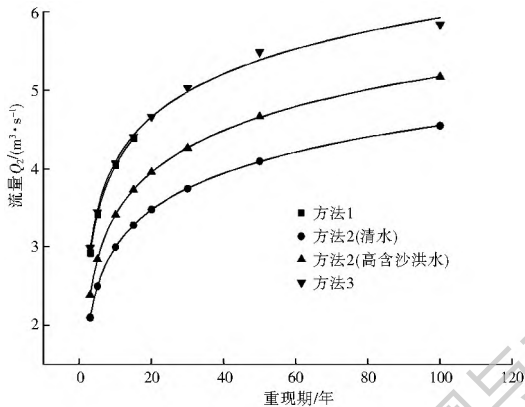


图 4 洪峰流量 Q 和重现期 T 的关系

Fig. 4 Relationship between peak discharge and recurrence interval

洪峰流量和重现期的具体关系可用式(28)–式(31)表达,决定系数均在 0.99 以上,拟合效果良好。

$$Q_1 = 2.2 + 0.822 \ln(T - 0.582) \quad (R^2 = 0.999) \quad (28)$$

$$Q_{2\text{清水}} = 1.528 + 0.658 \ln(T - 0.614) \quad (R^2 = 0.999) \quad (29)$$

$$Q_{2\text{高含沙}} = 1.738 + 0.749 \ln(T - 0.614) \quad (R^2 = 0.999) \quad (30)$$

$$Q_3 = 2.389 + 0.77 \ln(T - 0.874) \quad (R^2 = 0.995) \quad (31)$$

式中: Q_1 、 $Q_{2\text{清水}}$ 、 $Q_{2\text{高含沙}}$ 、 Q_3 分别表示方法 1、方法 2 清水、方法 2 高含沙水流和方法 3 的洪峰流量。

为了对比重现期对三种方法流量的影响,将不同重现期下,三种方法计算得到的截洪沟洪峰流量列于表 2。相同重现期下,根据方法 2 计算得到的流量与山洪容重有关。因此,表中分别给出了清水

与方法 3 结果的差距呈逐渐增大的趋势。

表 3 不同方法洪峰流量相对方法 3 的大小关系

Tab. 3 Flood peak discharge by different methods as compared with Method 3

重现期 T / 年	洪峰流量相对方法 3 的大小关系 (%)				
	方法 1	方法 2			
		清水流量	高含沙洪水流量		
		山洪容重 1.1 t/m ³	山洪容重 1.3 t/m ³	山洪容重 1.5 t/m ³	
3	- 2.17	- 29.81	- 25.28	- 14.21	0.71
5	- 0.81	- 27.42	- 22.74	- 11.29	4.14
10	- 0.52	- 26.31	- 21.55	- 9.93	5.73
15	- 0.44	- 25.60	- 20.80	- 9.07	6.75
20		- 25.39	- 20.57	- 8.81	7.05
30		- 25.45	- 20.64	- 8.88	6.96
50		- 25.32	- 20.50	- 8.73	7.15
100		- 22.11	- 17.08	- 4.80	11.76

方法 3 的结果略大于方法 1, 总体来说较为接近, 而与方法 2 的清水流量差别较大。分析其原因主要在于, 方法 1 和方法 3 均考虑的是设计重现期下、降雨历时内的平均降雨强度, 而方法 2 考虑的是设计重现期下、平均 1 h 降雨强度。本文例子中, 降雨历时小于 1 h。一般来说, 降雨历时越长, 降雨历时内的平均降雨强度越小。因此, 方法 2 计算得到的清水洪峰流量最小, 方法 1 和方法 3 的结果较方法 2 的清水流量大。

4 影响因素显著程度分析

影响截洪沟洪峰流量的主要因素有径流系数、重现期、降雨历时、汇流面积、高含沙山洪容重等。采用 SPSS 统计软件进行方差分析, 研究不同因素对截洪沟设计流量的影响程度。三种方法的影响因素及因素水平见表 4- 表 6 所示。各因素水平分别为: 径流系数取 0.3、0.5、0.7 和 0.9; 设计重现期取 3、5、10、15、20、30、50 和 100 年; 汇流面积取 0.1、0.2、0.4 和 0.8 km², 山洪容重取 1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5 t/m³; 降雨历时取 5、20、60、90 和 120 min。

表 4 方法 1 影响因素及因素水平

Tab. 4 Influence factors and factor levels of Method 1

影响因素	因素水平				
径流系数	0.3	0.5	0.7	0.9	
汇流面积/km ²	0.1	0.2	0.4	0.8	
重现期/年	3	5	10	15	
降雨历时/min	5	20	60	90	120

表 5 方法 2 影响因素及因素水平

Tab. 5 Influence factors and factor levels of Method 2

影响因素	因素水平				
径流系数	0.3	0.5	0.7	0.9	
汇流面积/km ²	0.1	0.2	0.4	0.8	
高含沙山洪容重/(t·m ³)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
重现期/年	3	5	10	15	20 30 50 100

表 6 方法 3 影响因素及因素水平

Tab. 6 Influence factors and factor levels of Method 3

影响因素	因素水平				
径流系数	0.3	0.5	0.7	0.9	
汇流面积/km ²	0.1	0.2	0.4	0.8	
降雨历时/min	5	20	60	90	120
重现期/年	3	5	10	15	20 30 50 100

三种方法影响因素的方差分析结果见表 7- 表 9。从表中可以看出, 三种方法各因素的 sig. 值均为 0, 小于 0.05; F 值均大于临界 F 值, 表明各因素对流量均有显著影响。同时, 通过比较 F 值的大小可知, 对于方法 1 和方法 3, 汇流面积对流量的影响最显著, 降雨历时次之, 接着是径流系数, 重现期对流量的影响最弱; 对于方法 2, 汇流面积对流量的影响最显著, 径流系数次之, 接着是重现期, 山洪容重的影响最弱。

表 7 方法 1 影响因素方差分析

Tab. 7 Analysis of variance of influence factors of Method 1

指标	方差来源	自由度	均方	F	Sig.
Q_1	径流系数	3	367.95	41.98	0
	重现期	3	56.68	6.47	0
	降雨历时	4	658.29	75.10	0
	汇流面积	3	1354.05	154.48	0

表 8 方法 2 影响因素方差分析

Tab. 8 Analysis of variance of influence factors of Method 2

指标	方差来源	自由度	均方	F	Sig.
Q_2	径流系数	3	1107.18	245.59	0
	重现期	7	176.13	39.07	0
	汇流面积	3	4074.43	903.79	0
	高含沙山洪容重	4	67.16	14.90	0

表 9 方法 3 影响因素方差分析

Tab. 9 Analysis of variance of influence factors of Method 3

指标	方差来源	自由度	均方	F	Sig.
Q_3	径流系数	3	1187.92	100.48	0
	重现期	7	147.83	12.51	0
	降雨历时	4	1594.32	134.86	0
	汇流面积	3	4371.53	369.78	0

5 结论

(1) 通过实例分析, 得出该工程在 10 年一遇设计标准下, 截洪沟的洪峰流量采用方法 2 根据《开发建设项目水土保持技术规范》计算得到的洪峰流量偏小, 采用方法 3《室外排水设计规范》和方法 1《水土保持工程设计规范》的结果较为接近, 更偏安全。

(2) 洪峰流量随降雨历时的增大逐渐减小, 两者呈幂函数关系。当降雨历时小于 60 min 时, 降雨历时长对流量的影响较大; 当降雨历时大于 60 min 时, 降雨历时长对流量的影响减弱。洪峰流量随山洪容重的增大而增大, 两者基本呈指数函数关系。洪峰流量随重现期的增大基本呈对数趋势增长, 当重现期小于 50 年时, 重现期对流量的影响较大; 当重现期大于 50 年时, 重现期对流量的影响减弱。

(3) 方法 3 的结果略大于方法 1, 总体来说较为接近; 方法 2 计算得到的清水洪峰流量最小, 方法 2 计算得到的高含沙洪水流量与方法 1、3 的相对大小关系与山洪容重有关。

(4) 对于方法 1 和方法 3, 汇流面积对截洪沟洪峰流量的影响最显著, 降雨历时次之, 接着是径流系数, 重现期对流量的影响最弱。对于方法 2, 汇流面积对流量的影响最显著, 径流系数次之, 接着是重现期, 高含沙山洪容重对流量的影响最弱。

(5) 本文的成果为其它截洪沟工程的科学合理设计提供方法和思路。由于截洪沟洪峰流量的影响因素众多且较为复杂, 因此, 本文的结论对于其它区域的适用性以及不同参数、不同地区对结论影响的规律有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] GB/T 50805-2012, 城市防洪工程设计规范[S]. (GB/T 50805-2012, Code for design of urban flood control project [S]. (in Chinese))
- [2] 向华, 刘青泉, 李家春. 地表条件对坡面产流的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(6): 774-782. (XIANG H, LIU Q Q, LI J C. Influences of slope surface conditions on the runoff generation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(6): 774-782. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2004.06.012.
- [3] 梁志权, 卓慕宁, 郭太龙, 等. 不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 638-642. (LIANG Z Q, ZHU O M N, GUO T L, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 638-642. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.04.014.
- [4] 赵小娥, 魏琳, 曹叔尤, 等. 强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 45-47, 107. (ZHAO X E, WEI L, CAO S Y, et al. Study on characteristics of overland flow with higher rain intensity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 45-47, 107. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1009-2242.2009.06.011.
- [5] 宋向阳. 地表糙度对坡面产汇流特征的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. (SONG X Y. The relation of soil surface roughness and runoff characteristic on slope farmland [D]. Yangling: Northwest A and F University, 2012. (in Chinese))
- [6] 张小娜, 冯杰. 粉砂壤土中大孔隙对坡地产汇流的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 332-336. (ZHANG X N, FENG J. Experimental research on the effects of macropores upon overland flow in silt loam soil[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2010, 31(3): 332-336. (in Chinese)) DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.2010.03.0332.
- [7] 黄日增. 城市小流域洪峰流量计算方法的研究[J]. 给水排水, 2009, 11(35): 39-42. (HUANG R Z. Research on the calculation method of flood peak discharge in urban small watershed [J]. Water and Wastewater Engineering, 2009, 11(35): 39-42. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-8471.2009.11.011.
- [8] 关仲. 坡面汇流法计算小河流域暴雨洪水(第一部分)[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 88-94. (GUAN Z. Calculation of storm flood in small river basin by the overland flow method (Part One)[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 88-94. (in Chinese))
- [9] 关仲. 坡面汇流法计算小河流域暴雨洪水(第二部分)[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 114-119. (GUAN Z. Calculation of storm flood in small river basin by the overland flow method (Part Two)[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(1): 114-119. (in Chinese))
- [10] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (ZHAN D J, YE S Z. Engineering hydrology (3rd ed.) [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2000. (in Chinese))
- [11] JT/GT D33-2012, 公路排水设计规范[S]. (JT/GT D33-2012, Specification for Drainage design of Highway [S]. (in Chinese))
- [12] 中国市政工程东北设计研究院. 给水排水设计手册(第7册: 城镇防洪). 第2版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute. Water supply & Drainage Design Manual (Section 7: Urban Flood) Second Edition[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [13] 中国市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册(第5册: 城镇排水). 第2版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (China Municipal Engineering Design and Research Institute. Water supply & Drainage Design Manual (Section 5: Urban Drainage) Second Edition[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [14] 徐德龙, 肖华. 小流域设计洪水推理公式计算方法探讨[J]. 人民长江, 2000, 31(7): 13-14. (XU D L, XIAO H. Study on ra

- tional method of design flood in small watershed[J]. Yangtze River, 2000, 31(7): 13-14. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2000.07.005.
- [15] 王博, 崔明霞. 城镇小汇水面积设计洪水计算方法比较[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 84-86, 93. (WANG B, CUI M X. Comparison of calculation methods for catchments area of design flood in town[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 84-86, 93. (in Chinese))
- [16] 刘俊萍, 韩君良. 小流域截洪沟洪峰流量计算方法的比较[J]. 中国水运, 2015, 15(3): 153-155. (LIU J P, HAN J L. Comparison of calculation methods of flood peak discharge of cut-off ditch in small watershed[J]. China Water Transport, 2015, 15(3): 153-155. (in Chinese))
- [17] 郑佳重, 朱梅, 黄双双, 等. “84 办法”在特小流域洪峰流量计算中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 63-65, 69. (ZHENG J Z, ZHU M, HUANG S S, et al. Application of 84 method in peak discharge calculation of extra small watershed[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 63-65, 69. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.06.014.
- [18] 钟鸣辉. 水土保持截排水工程设计标准比较[J]. 南昌工程学院学报, 2014, 33(4): 77-80. (ZHONG M H. A comparison of design standards of water interception and drainage in soil and water conservation[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2014, 33(4): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4869.2014.04.017.
- [19] GB 51018-2014, 水土保持工程设计规范[S]. (GB51018-2014, Code for design of soil and water conservation engineering[S]. (in Chinese))
- [20] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000. (LI W, XU X P. Hydraulics[M]. Wuhan: Wuhan University Press of Hydraulic and Electric Engineering, 2000. (in Chinese))
- [21] GB 50433-2008, 开发建设项目水土保持技术规范[S]. (GB50433-2008, Technical code on soil and water conservation of development and construction projects[S]. (in Chinese))
- [22] GB 50014-2006 (2014 年版), 室外排水设计规范[S]. (GB50014-2006 (version of year 2014), Code for design of outdoor wastewater engineering[S]. (in Chinese))
- [23] GB 50201-2014, 防洪标准[S]. (GB50201-2014, Standard for flood control[S]. (in Chinese))
- [24] SL 723-2016, 治涝标准[S]. (SL723-2016, Standard for waterlogging control[S]. (in Chinese))
- [25] SL 575-2012, 水利水电工程水土保持技术规范[S]. (SL575-2012, Technical specification on soil and water conservation for water conservancy and hydropower engineering[S]. (in Chinese))

(上接第 32 页)

- [25] 丁华, 邱卫国. 基于生态足迹的上海市水资源生态承载力评价[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 19-21. (DING H, QIU W G. Assessment on ecological carrying capacity of water resources in Shanghai City based on ecological footprint model[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 19-21. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2013.15.005.
- [26] 李燕, 张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 172-178. (LI Y, ZHANG X Q. Assessment on carrying capacity of water resources in Yangtze River economic zone based on principal component analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 172-178. (in Chinese) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.029.