



引文格式: 刘星宇, 朱立峰, 孙建伟, 等. 沟谷型泥石流特征参数的等代面积递归精细求解[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 272–284. DOI: 10.12401/j.nwg.2023166

Citation: LIU Xingyu, ZHU Lifeng, SUN Jianwei, et al. Precise Calculation for Characteristic Parameters of Valley-type Debris Flow Using a Method of Recursive Equivalent Area Substitution[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 272–284. DOI: 10.12401/j.nwg.2023166

沟谷型泥石流特征参数的等代面积递归精细求解

刘星宇¹, 朱立峰^{2,*}, 孙建伟¹, 贾煦¹, 刘向东¹, 黄虹霖¹,
程贤达¹, 孙亚柯¹, 胡超进¹, 张晓龙¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 为解决“沟谷型”泥石流在不规则断面处特征参数的精细求解问题, 笔者以曼宁公式为基础, 建立“等代”面积递归逼近的数学模型, 实现了最深泥位、流体速度、威胁范围的求解计算, 其结果比较符合实际。利用该模型在豫西某泥石流受威胁对象段任取 10 个断面进行研究分析: ①计算出 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇等降水概率工况下最深泥位、流速、行洪断面大小, 研究其随雨强大小的演变规律。②定量分析了各断面泄洪能力强弱。③结合泥石流强度判定标准对所选区域进行危险度分区, 划分了极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区。该模型不仅可以为预测泥石流各项指标提供基本参数, 而且可为灾害防治提供科学依据。研究成果对泥石流的精细化防治方面具有重要支撑作用。

关键词: 沟谷型泥石流; 特征参数; 等代面积; 递归逼近; 精细求解; 疏导能力

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0272-13

Precise Calculation for Characteristic Parameters of Valley-type Debris Flow Using a Method of Recursive Equivalent Area Substitution

LIU Xingyu¹, ZHU Lifeng^{2,*}, SUN Jianwei¹, JIA Xu¹, LIU Xiangdong¹, HUANG Honglin¹,
CHENG Xianda¹, SUN Yake¹, HU Chaojin¹, ZHANG Xiaolong¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey/Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of key parameters in predicting "valley-type" debris flow at irregular profiles, based on Manning's formula, this paper establishes an approaching mathematical model of "equivalent area substitution method", which completed calculation for the deepest mud level, the flow rate and the threat range. The result is close to reality. This paper select 10 profiles randomly in the affected area by debris flow in western Henan, by this model: ① the deepest mud level was calculated, the flow velocity, and the area size of the cross-flood profiles under the probability of rainfall once in 10 years, and in 20 years, 50 years, in 100 years.

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-08-22; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“熊耳山-伏牛山矿集区生态修复支撑调查”(ZD20220218)。

作者简介: 刘星宇(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害方面工作。E-mail: 1538311361@qq.com。

* 通讯作者: 朱立峰(1973-), 男, 正高级工程师, 长期从事地质灾害机理与防治研究。E-mail: 397871699@qq.com。

② Moreover, this paper has done some research for the law of evolution with different rain intensity, and quantitatively analyzed the flood discharge capacity of each profile. ③ Combined with the judgment standard of debris flow intensity, the selected areas were classified into extremely high-risk areas, high-risk areas, medium-risk areas, and low-risk areas. Furthermore, the model can not only provide basic parameters for predicting various indicators of debris flow, but also provide scientific basis for preventing and controlling disaster of debris flow. Finally, the results of this research have a certain significance in the refined prevention and control of debris flow.

Keywords: valley-type debris flow; characteristic parameters; equivalent area substitution; recursive approximation; precise calculation; iterative approximation

泥石流是由强降水、库坝溃决等多种诱发条件而形成的饱含泥沙、卵砾石、块石的特殊洪流, 历时短、强度高、破坏性大(Iverson, 1997; 康志成等, 2004; 黄崇福, 2009)。中国大陆山地面积占国土总面积的2/3以上, 地形复杂、气候多样, 已成为世界上泥石流最发育、分布最广、危害最严重的国家之一(杜榕桓, 1995)。典型者如2010年8月7日舟曲县暴发400年一遇的低频泥石流, 造成1463人遇难, 302人失踪, 直接经济损失达数亿元(朱立峰等, 2011)。近年来, 因厄尔尼诺现象引起超历史极值记录的极端降水事件屡有发生, 并常引发泥石流灾害, 仅2019~2021的3年间, 全国分别发生泥石流599、899和374起(数据来源国家统计局), 泥石流的持续高发及巨大危害使其越来越受到重视(韩征等, 2012), 系统开展泥石流的动力学特性分析, 对泥石流的危险度评价、危害范围确定具有重要意义(Asch et al., 2014; 杨晓宇, 2018)。

目前泥石流研究的热点集中于通过物理模拟和数值模拟, 研究其不同诱发条件下的启动机理及危险评价, 而对泥石流特征参数的精细求解却不甚关注, 但精确求出流速(V)、最深泥位(H)、行洪宽度(B)等特征参数是重现泥石流启动与致灾研究的基础与根本, 获取方法主要按照相关规范推荐的经验公式法(韦方强等, 2009; 张罗号等, 2015; 徐士彬等, 2018; 刘波等, 2021)以及数值模拟法。

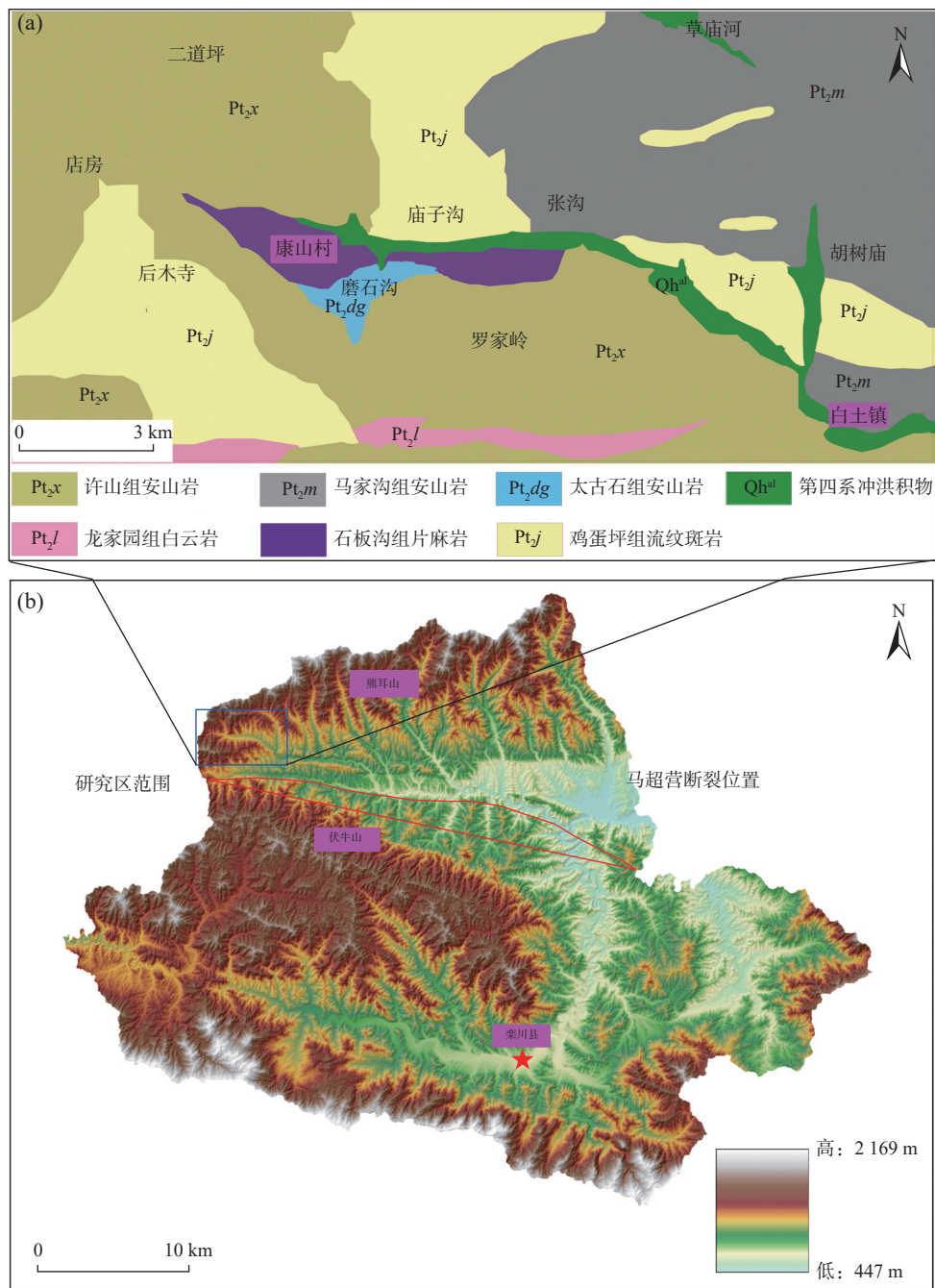
相关规范推荐的经验公式主要有弯道超高公式、基于量纲分析的经验公式、基于运动模型的半经验公式、改进型的曼宁公式等4类(王喜安等, 2020)。除曼宁公式有较好的适用性外, 其余算法均存在地域性强、普适性差、争议大等缺点(徐黎明等, 2013; 王喜安等, 2020)。数值模拟主要有神经网络法、有限差分法、深度积分法3类: 基于神经网络法计算泥石流的平均流速及泥位深度(柴春岭等, 2008; 于国强等,

2012; 徐黎明等, 2013); 利用FLO-2D(有限差分法)软件进行泥石流的泥深、流速的预测评价(丛凯等, 2019; 唐亚明等, 2021)。现行的模拟软件还有Mass-flow(倪化勇等, 2014)以及Arcgis深度积分法, 但其原理和FLO-2D类似。不论是经验公式还是数值模拟都未对沟谷的不规则断面进行精细刻画, 其结果误差较大, 难以为泥石流危险度评价和科学防治提供依据。

笔者以河南省栾川县康山村泥石流隐患沟为例, 从沟谷的不规则断面这一实际情况出发, 把流体力学的基本公式 $V=Q/A$ (Q 为洪峰流量, A 为断面面积)以及曼宁公式计算泥石流流速的方程联立求解, 用等效行洪断面面积代换实际面积, 并不断递归使等效面积逐步逼近实际面积, 建立可精确刻画不规则断面泥石流特征参数的求解方法, 探索泥石流特征参数的精细确定, 为泥石流科学防治提供支撑。

1 研究区概况

康山村泥石流沟位于河南省栾川县白土镇, 地处小秦岭东段余脉熊耳山西南部, 属中低山区, 区内地形切割强烈, 沟谷呈“V”字型, 植被覆盖度高, 坡体中下部出露中元古界长城系熊耳群安山岩、流纹斑岩、片麻岩, 坡体上部及坡面低洼处覆盖第四系残坡积物。受马超营断裂(图1b)6期次构造演化影响, 沟谷呈有利于泥石流形成的“哑铃状”, 控制流域面积29.36 km²(图2b)(刘星宇等, 2022), 叠加人类活动及气候的条件影响, 该沟已经具备了泥石流形成所需的地形、物源、水源等要素条件: 典型地貌及巨大的高差, 该沟长14 km, 海拔最高1671.4 m, 最低1000 m, 相对高差670 m, 最大纵坡降377‰; 储量巨大且稳定性极差的堆积物, 上游形成区沿沟堆积松散矿渣243×10⁴ m³; 充沛且集中的降水, 根据栾川县气象局资料, 区内降水



(a).康山村地质背景图；(b).栾川县地形地貌图

图1 研究区位置及地质背景图

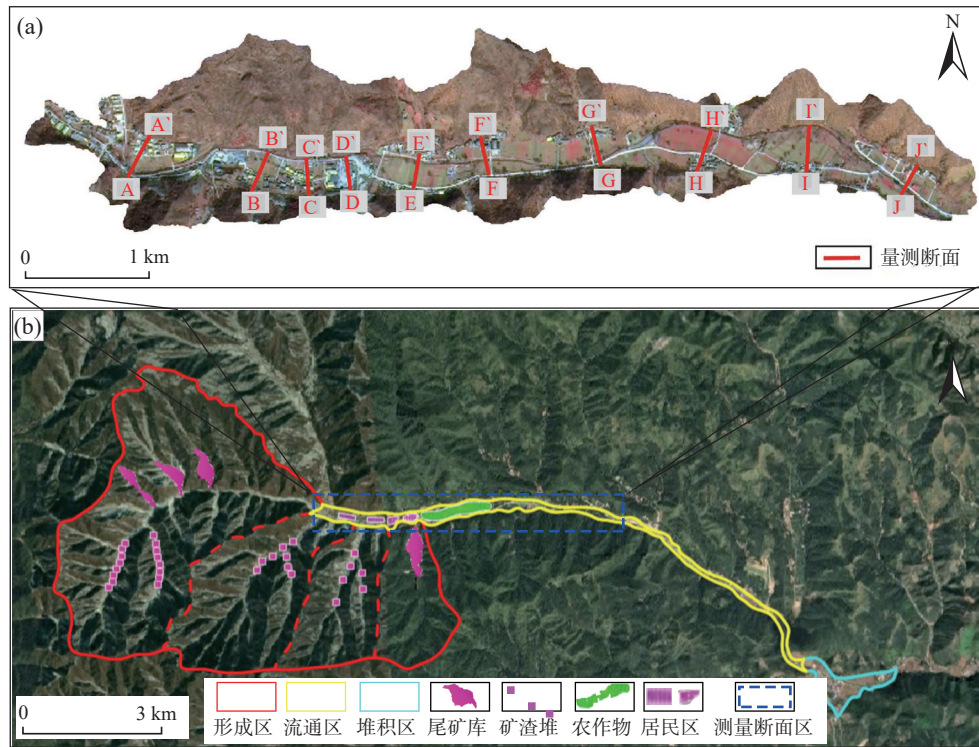
Fig. 1 The map of Geological condition and the location for study area

集中在7~9月,年最大降水量1129.9 mm(2010年),月最大降水量423.4 mm(2010年),24小时最大降水量155.3 mm(2010年),小时最大降水量49 mm(2010年)。2010年7月24日栾川县普降暴雨(小时降水量达49 mm),共诱发泥石流29处,其中死亡68人,失踪21人,经济损失19.8亿。康山村泥石流隐患沟其威胁对象在沟谷中游流通区(图2b),共涉及房屋

410间,人口1500人,耕地10.12 km²,水泥硬化道路7.3公里,简易桥梁两处,选矿厂3个。

2 模型建立

在承灾对象区域(图2b中蓝色虚线位置)获取10个典型断面高程及坐标数据(图2a),利用测量数据在



(a).研究区测量断面位置示意图; (b).康山村泥石流隐患沟发育特征示意图

图2 泥石流发育形态特征图和量测断面位置图

Fig. 2 The map of characteristics for debris flow developmental features and the location of the measurement profiles

曼宁公式以及洪峰流量计算公式的基础上构建可以求解流体深度、流速等关键参数的数学模型。

2.1 引入洪峰流量的计算方程

降水引发洪峰流量可按下式计算(高东光, 2005):

$$Q_h = 0.278 \left(\frac{S_p}{\tau^n} - \mu \right) F \quad (1)$$

$$\tau = K_3 \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{\alpha_1} \quad (2)$$

$$\mu = K_1 (S_p)^{\beta_1} \quad (3)$$

式中: Q_h 为清水洪峰流量(m^3/s); S_p 为雨强(mm/h); τ 为汇流时间 s ; n 为暴雨递减指数; μ 为损失参数; K_1 为地区参数; F 为汇流面积 km^2 ; L 为主河道长度/ km ; I 为主河道平均比降($\%$); α_1 为汇流参数; K_3 为地区参数; β_1 为指数。

物源失稳汇入主沟后形成泥石流后, 其重度和洪峰流量可采用公式(4)(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2000)及公式(5)(常士骝等, 2018)计算:

$$\gamma_c = \tan J + k_0 \cdot k_r \cdot k_l \cdot A^{0.11} \quad (4)$$

式中: γ_c 为泥石流容重(KN/m^3); J 为物源区平均坡度; k_0 为补给系数; k_r 为岩性系数; k_l 为稀释系数; A 为物源区储备方量与汇水面积比。(按照公式(4)所

引文献, k_0 取 1, k_r 取 1, k_l 取 0.9)。

$$Q = Q_h \left(1 + \frac{\gamma_c - 1}{\gamma_s - \gamma_c} \right) \quad (5)$$

式中: Q 为泥石流洪峰流量(m^3/s); γ_s 为沙粒的密度(KN/m^3)(取 $2.72 \text{ KN}/\text{m}^3$); 其余参数同前文一致。

2.2 引入流速计算的基础方程

引入曼宁公式(6)、流量流速的关系方程(7)、以及水力半径的计算方程(8):

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (6)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

$$R_h = \frac{A}{C} \quad (8)$$

式中: V 为断面流速(m/s); n 为河道糙率; R_h 为水力半径(m); I 为断面纵坡降($\%$); A 为断面面积(m^2); C 为湿周长度(m); 其余符号同前文。将公式(6~8)联立起来得到公式(9);

$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{A}{C} \right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (9)$$

2.3 构建数学模型

根据公式(1~9)结合研究区沟道形态, 在流量可求解的情况下, 只需将面积 A 、湿周 C 都用 H 表示, 则可建立 Q 和 H 的函数关系式, 以图 3 中 A-A' 断面为

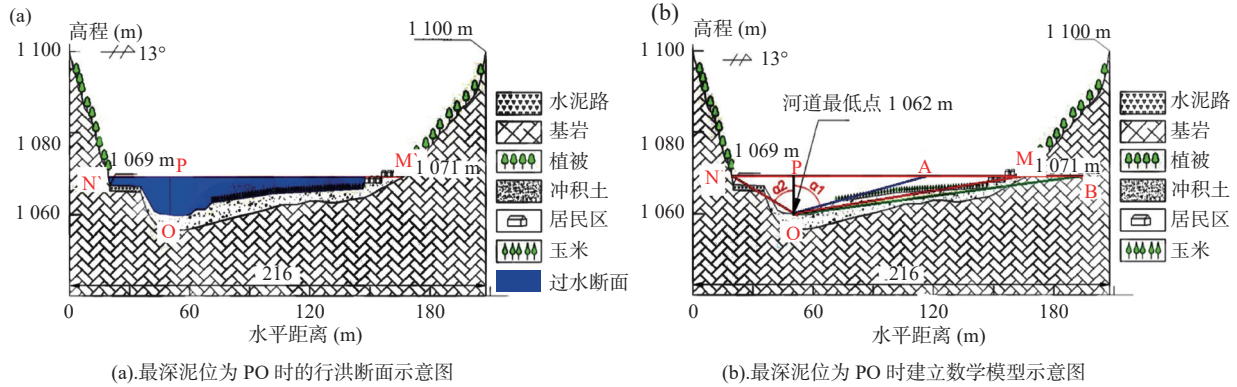


图3 AA'断面数学模型构建示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mathematical model construction for AA' profiles

例进行具体推导:

如图 3a 所示,假设在某个降水强度下,泥石流通过 AA'断面的面积大小为图中的蓝色部分,为不规则图形,实际最深泥位为 $H=PO$, PO 的右侧蓝色不规则区域面积记为 S_{POM} , 图 3b 中三角形 POA 的面积记为 S_{POA} , 三角形 POB 的面积记为 S_{POB} , 则有 $S_{POA} < S_{POM} < S_{POB}$, S_{POA} 和 S_{POB} 为直角三角形, 记 $\angle POA$ 或 $\angle POB$ 为 α , 则三角形 S_{POA} 和 S_{POB} 的面积 S 可表示为: $S = 0.5 \times H^2 \times \tan \alpha = S(\alpha)$, 对函数 $S(\alpha)$ 在求导数得 $S'(\alpha) = 0.5 \times H^2 \times \cos(\alpha)^{-2}$, 则函数 $S(\alpha)$ 在自变量 $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ 上是连续且单调递增的, $S(\alpha)$ 随 α 变化曲线如图 4 所示:

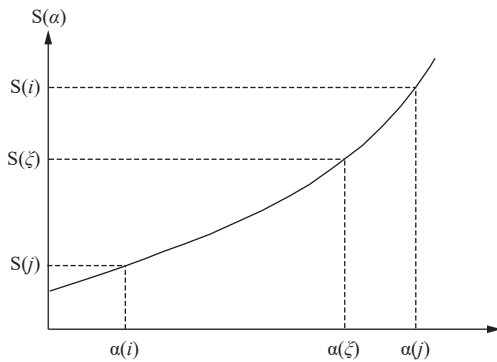


图4 数学模型中角度和断面面积函数关系图

Fig. 4 The relationship between the angle and crossing profiles area function in the mathematical mode

设图 3b 中 S_{POA} 对应的角度为 $\alpha(i)$, S_{POB} 对应的角度为 $\alpha(j)$, 结合图 4 断面面积 $S(\alpha)$ 随角度 α 的变化关系, 根据单调连续函数的介值定理一定可以找到一个 $\alpha(\xi)$, 其面积 $S(\xi)$ (或 S_{POM}) 等于图 3a 中实际不规则行洪断面面积 S_{POM} , 且该角度 $\alpha(\xi)$ 是唯一的, 记此时的角度为 α_{10} . 同理可以在图 3b 中找到一个三角形 S_{PON}

其面积等于图 3a 中实际的不规则行洪断面面积 S_{PON} , 记相应角度为 α_2 , 则 $PM = PO \times \tan \alpha_1$, $OM = \frac{PO}{\cos \alpha_1}$. $PN = PO \times \tan \alpha_2$, $ON = \frac{PO}{\cos \alpha_2}$. 则图 3a 中蓝色区域不规则行洪断面面积 $A = 0.5 \times PO \times PM + 0.5 \times PO \times PN$, 湿周 $C = OM + ON$. 令 $PO = H$ 则:

$$A = 0.5 \cdot H^2 \cdot (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) \quad (10)$$

$$C = H \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha_1} + \frac{1}{\cos \alpha_2} \right) \quad (11)$$

将 A 和 C 的表达式代入公式(9)化简得:

$$H = 1.542 \times \left(\frac{Q \times n \times \left(\frac{1}{\cos \alpha_1} + \frac{1}{\cos \alpha_2} \right)^{\frac{2}{n+1}}}{I^{\frac{2}{3}} \times (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2)^{\frac{5}{3}}} \right)^{\frac{n+1}{2}} \quad (12)$$

根据公式(12)可知, 对于断面 A , n 为糙率, 由沟谷地质特征决定, 为常数; I 为沟谷的纵坡降, 为常数; α_1 、 α_2 由沟谷形态决定, 是唯一的确定解, 则公式(12)即为洪峰流量 Q 和最深泥位 H 的函数关系式。根据公式(1~5)可知洪峰流量由雨强 S_p 决定, H 由 Q 决定, 因此 H 由雨强 S_p 决定。至此笔者建立了可以计算特定雨强下最深泥位的数学模型。

2.4 模型求解

如图 5 所示做 $\angle AOB$ 的角平分线, 得到 $\alpha_{1(i)} = \angle POM$, 做 $\angle COD$ 的角平分线, 得到 $\alpha_{2(j)} = \angle PON$, 代入公式(12)解出 $H(i)$, 代入公式(10)计算出模型断面模型计算面积, 然后在 CAD 中根据实测资料画出 1:1 模型, 然后用 CAD 中的 AREA 命令测量出 $H(i)$ 对应的实际面积, 在进行对比, 计算出两者面积的误差率 Δ_s , 如果 Δ_s 大于 10%, 且 PO 右侧模型计算面积 $POM >$ 测量实际面积 POM' 则再取 $\angle AOM$ 的角平分线, 反之取 $\angle BOM$ 的角平分线继续递归计算, PO 左侧亦

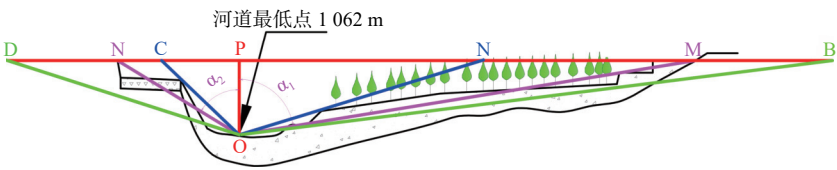


图5 模型递归计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of model iterative calculation

然,递归 n 次直至 Δ_s 小于 10%(为了控制递归次数兼顾工程需要)结束计算,令最终递归的 $\alpha_{1(i+n)}=\alpha_1$ 、 $\alpha_{2(j+n)}=\alpha_2$,此时的 $H(i+n)$ 即为泥石流在某雨强条件下洪峰过境时的最深泥位。

综上所述:根据公式(1~5),可知对于确定的汇水面积,沟谷形态可计算出确定的洪峰流量,利用公式(12)可递归计算出最深泥位,再根据公式(7)、公式(10)计算出断面面积、断面流速。则不规则沟谷断面的最深泥位、行洪断面面积、流速的大小可根据本模型进行精细求解。

3 预测评价

3.1 各断面不同降水概率条件下的参数计算

先以 AA'断面为例简要说明计算过程,经过实地

测量获取 AA'断面的坐标、高程数据如表 1 所示(采用坐标系为 2000 国家大地坐标系):

根据测量数据画出 1:1 剖面图,根据公式(1~5),雨强为 99 mm/h 时 AA'断面的泥石流洪峰流量为 $178.66 \text{ m}^3/\text{s}$,代入实测纵坡降 $I=0.225$,根据《工程地质手册》选取糙率 $n=0.445$,根据公式(12),递归出 AA'断面的 α_1 、 α_2 分别为 86.57° 、 47.96° ,此时最深泥位 $H=3.95 \text{ m}$;令 $R_h=H$,根据公式(6),流速 $V=1.68 \text{ m/s}$,根据公式(10),断面面积为 189 m^2 。同理可求出其他断面在不同降水条件下的具体数值(表 2):

根据表 2 可知,流速 100 年一遇最小为 1.34 m/s ,最大为 1.68 m/s ;50 年一遇最小为 1.21 m/s ,最大为 1.41 m/s ;20 年一遇最小为 1.05 m/s ,最大为 1.30 m/s ;10 年一遇最小为 0.99 m/s ,最大为 1.26 m/s 。最深泥位 100 年一遇最小为 3.95 m ,最大为 8.48 m ;50 年一遇

表 1 AA'断面测量数据表

Tab. 1 The table of measurement data for AA' profiles

点号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
X	3 770 586	3 770 593	3 770 601	3 770 608	3 770 629	3 770 635	3 770 638	3 770 669	3 770 715	3 770 735
Y	533 751	533 752	533 754	533 755	533 758	533 759	533 759	533 765	533 772	533 776
H	1 069	1 069	1 068	1 062	1 063	1 063	1 064	1 067	1 068	1 071

表 2 不同雨强条件下各断面的泥位、流速计算表

Tab. 2 Calculation table for mud level and flow velocity of each profiles under various rain conditions

降水概率	断面名称	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'	G-G'	H-H'	I-I'	J-J'
100年一遇	最深泥位(m)	3.95	6.03	6.11	8.48	6.45	4.45	7.05	4.97	5.28	5.38
	流速(m/s)	1.68	1.39	1.54	1.37	1.37	1.44	1.34	1.48	1.42	1.46
	断面面积(m^2)	189	224	229	195	246	249	287	395	460	481
50年一遇	最深泥位(m)	3.62	5.54	5.61	8.06	6.17	4.57	6.72	4.56	4.56	4.94
	流速(m/s)	1.35	1.30	1.41	1.20	1.25	1.26	1.30	1.37	1.21	1.38
	断面面积(m^2)	117	190	194	160	218	284	236	333	402	406
20年一遇	最深泥位(m)	3.23	5.25	4.99	7.51	5.51	3.99	5.98	4.06	4.06	4.39
	流速(m/s)	1.30	1.25	1.23	1.20	1.20	1.10	1.18	1.25	1.05	1.26
	断面面积(m^2)	93	145	153	124	159	228	188	264	319	320
10年一遇	最深泥位(m)	2.97	4.83	4.60	6.91	5.07	3.67	5.50	3.74	3.74	4.04
	流速(m/s)	1.26	1.18	1.11	1.76	1.13	0.99	1.10	1.15	0.93	1.18
	断面面积(m^2)	78	123	130	105	135	193	159	224	271	271

最小为 3.62 m, 最大为 8.05 m; 20 年一遇最小为 3.23 m, 最大为 7.51 m; 10 年一遇最小为 2.97 m, 最大为 6.91 m。其结果和同类文献资料计算的流速和泥位深度相比较, 量级一致, 大小接近。

3.2 泥石流泥痕深度、流速、行洪断面和降水量的响应分析

根据上述计算结果, 不同断面的行洪断面面积大小随雨强变化关系如图 6 所示, 流速、泥痕深度随雨

强变化响应关系如图 7 所示:

根据图 6、图 7 可知最深泥位、行洪断面面积均随降水量的增加而增加。除了 DD', 其余断面流速随降水量增加而增加, DD' 断面出现反常的原因是受沟谷的不规则断面影响, 当最深泥位增加时, 面积的增加率小于湿周的增加率, 造成了水力半径不一定随着雨强增加而增加, 流速也不一定随着雨强增加而增加。

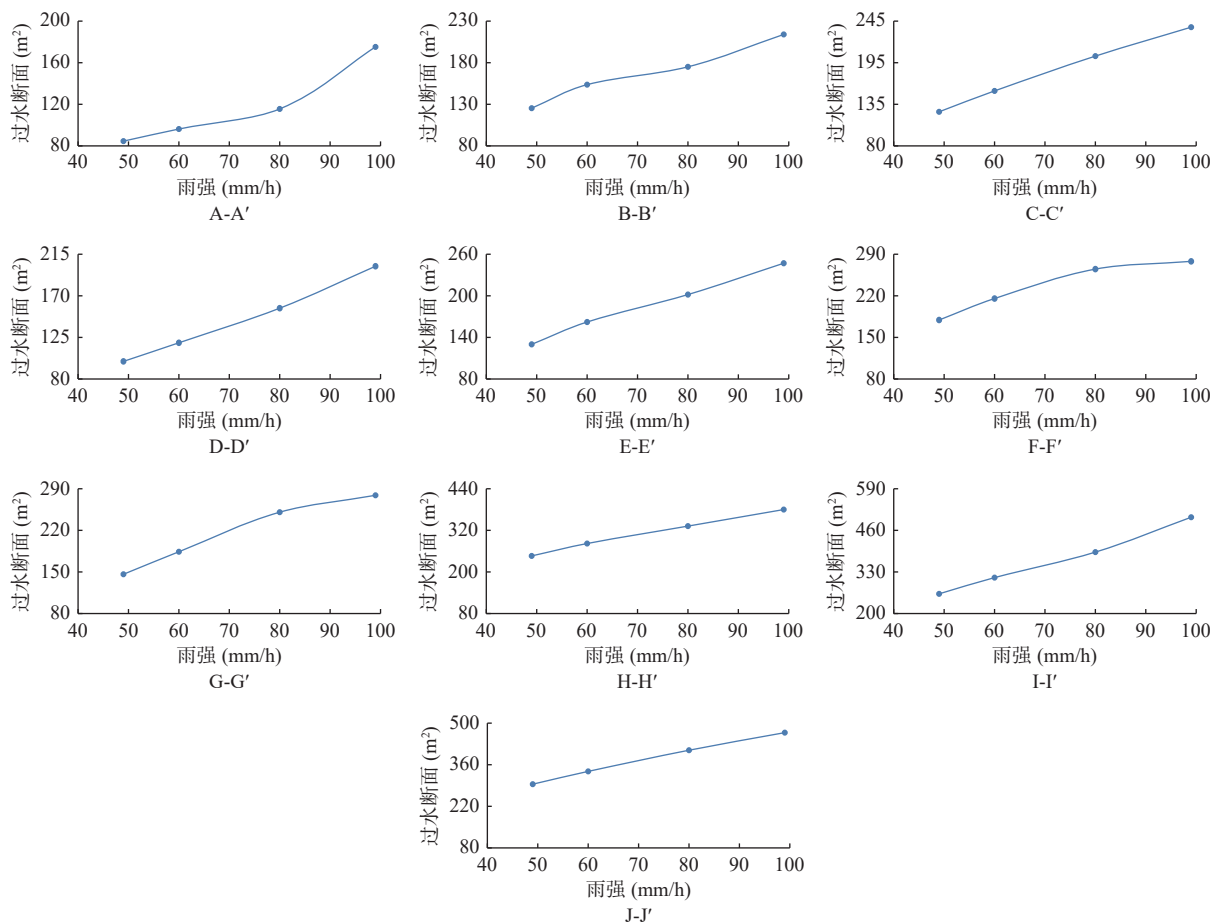


图6 行洪断面和雨强关系图

Fig. 6 The diagram for relationship of water crossing profiles under different rain intensity conditions

3.3 泥石流的强度分区以及承灾体的危险度评价

以 A-A' 断面为例对 100 年一遇降水强度下, 泥石流影响范围内泥石流的强度以及承灾体的危险度进行分区。唐亚明等(2021)在唐川等(1994)以及前人的研究基础上按照泥深和流速的综合关系, 提出了泥石流强度的判定标准(表 3)。

按照表 3 的判定标准进行泥石流强度分区, 山脚下泥石流未波及的地方划为未淹没区。如图 8 所示(图 8b~图 8c 为图 8a 粉色框选区按照 1:3 比例放大

示意图):

图 8a 中, $OP=3.95$ m 为 AA' 断面 100 年一遇降水强度的最深泥位, MN 为最高泥位面, 图 8b 中, 绿色区域的泥位深度 H 满足 $0 < H \leq 0.5$ m 且 $0 < V \cdot H \leq 0.5$ m²/s, 定为泥石流低强度区。图 8c 中, 黄色区域泥位深度 H 满足 $0.5 < H \leq 2.5$ m 且 0.5 m²/s $< V \cdot H \leq 2.5$ m²/s, 定为中强度区。图 8d 中红色区域泥位深度 H 满足 $H > 2.5$ m 或 $V \cdot H > 2.5$ m²/s, 定为高强度区。图 8b~图 8d 所示各分区的水平投影宽度分别为泥石流未淹

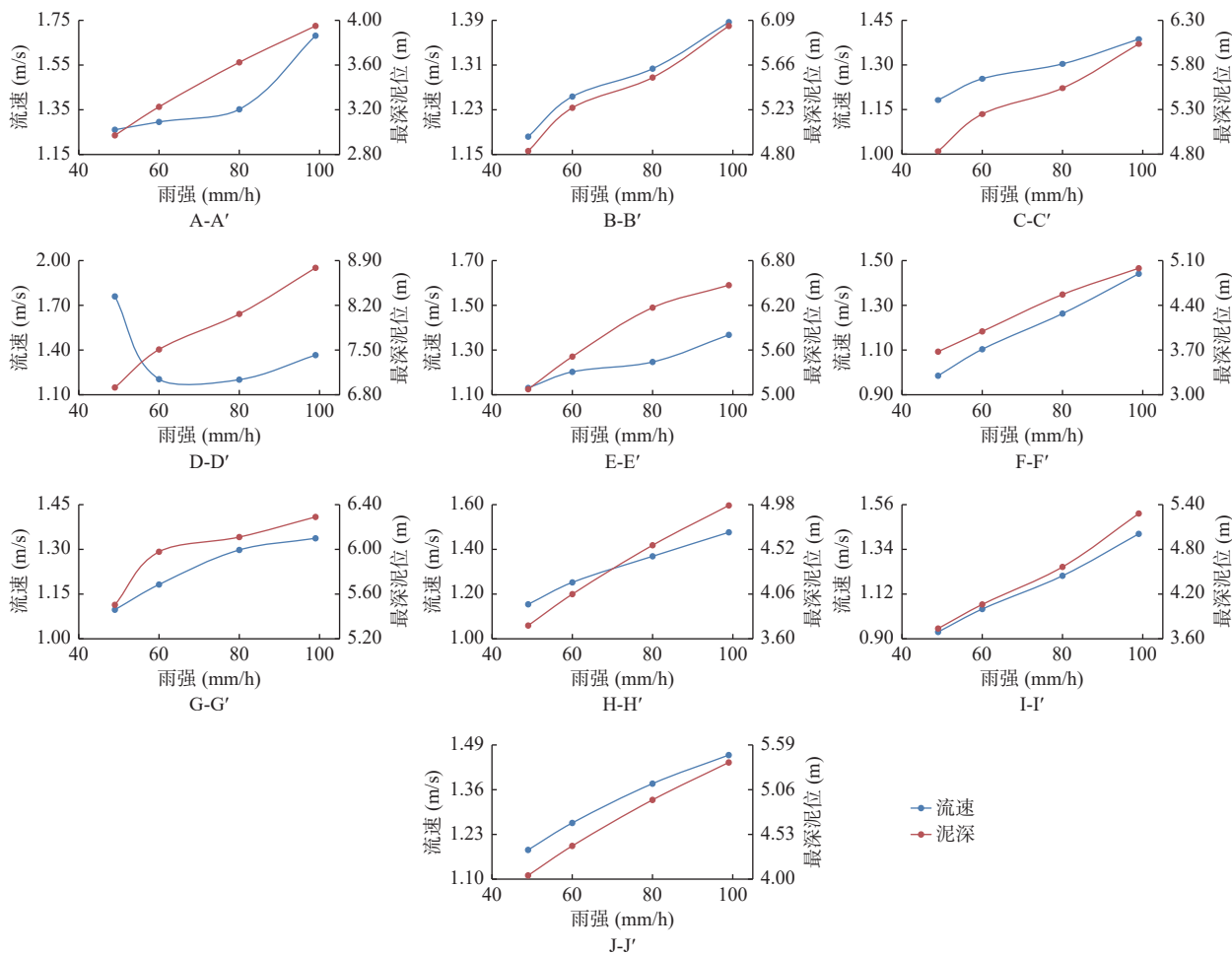


图7 流速、最深泥位和雨强关系图

Fig. 7 The diagram for relationship of flow velocity,deepest mud level under different rain intensity conditions

表 3 泥石流强度判定准则

Tab. 3 Judgment criteria for debris flow intensity

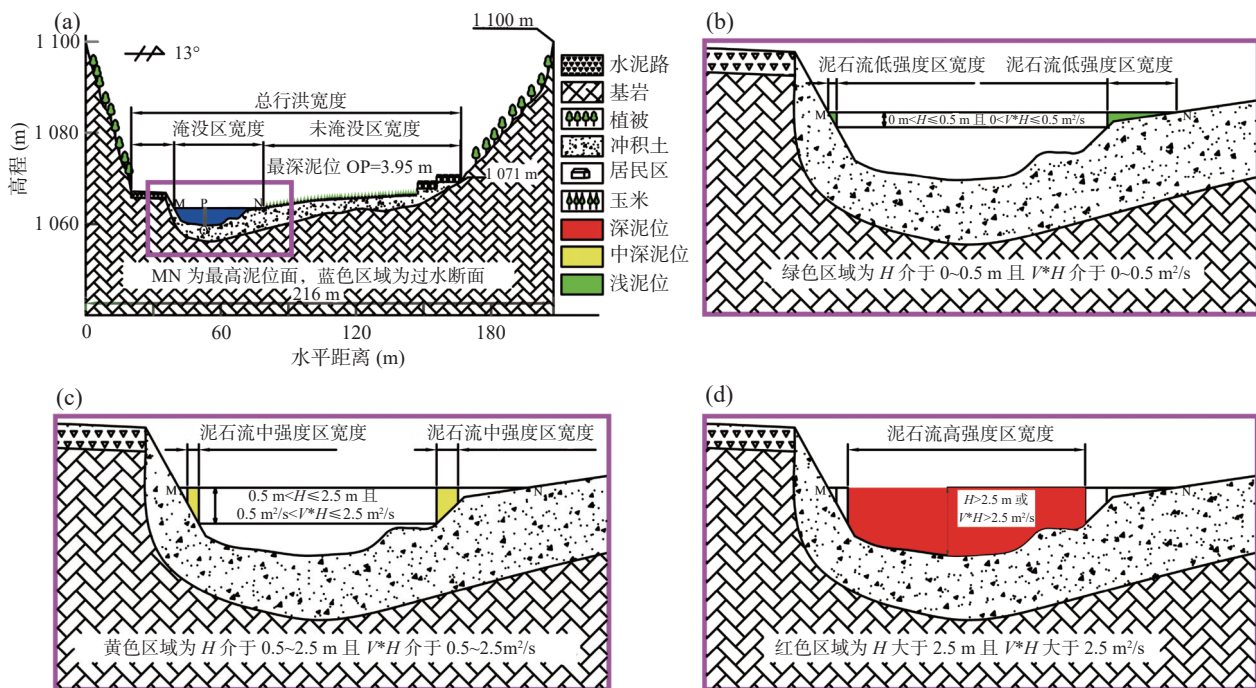
泥石流强度	泥深 H (m)	关系	泥深 H 与最大流速 V 的乘积(m^2/s)
高	$H \geq 2.5$	或	$V \cdot H \geq 2.5$
中	$0.5 < H \leq 2.5$	且	$0.5 < V \cdot H \leq 2.5$
低	$0 < H \leq 0.5$	且	$0 < V \cdot H \leq 0.5$

没区、低强度区、中强度区、高强度区的宽度。

同理计算出所有断面在不同降水强度下的最深泥位以及流速,并进行泥石流强度分区,得到整个测量区域在不同降水强度下的泥石流强度分区图。在分区图的基础上,根据承灾对象范围在分区图上的不同位置进行危险度评价:当受灾对象村庄范围落在泥石流未淹没区域时定为村庄低危险区、落在泥石流低强度区域时定为村庄中危险区、落在泥石流中强度区域时定为村庄高危险区、落在泥石流高强度区域时定为村庄极高危险区;当受灾对象农田范围落在泥石流

未淹没区域时定为农田低危险区、落在泥石流低强度区时定为农田中危险区、落在泥石流中强度区域时定为农田高危险区、落在泥石流高强度区域时定为农田极高危险区,如图9所示。

图9中,100年一遇、50年一遇、20年一遇和10年一遇降水强度条件下,村庄极高危险区面积分别为4457.72 m²、1807.01 m²、454.91 m²和245.51 m²;高危险区面积分别为7829.13 m²、9123.06 m²、7949.62 m²和5889.33 m²;中危险区面积分别为2235.66 m²、2769.04 m²、4344.91 m²和1557.06 m²;危险区总面积分别为



(a).最深泥位、淹没区、未淹没区、总行洪宽度示意图；(b).泥石流低强度区划分标准及其宽度示意图；(c).泥石流中强度区划分标准及其宽度；(d).泥石流高强度区划分标准及其宽度示意图

图8 AA'断面 100 年一遇降水工况下泥位深度分区示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the mud level depth division under the 100-year rainfall on the AA' profiles

14 522.51 m^2 、13 699.11 m^2 、12 749.44 m^2 和 7 691.9 m^2 。极高风险区域面积不断缩小,高风险区域和中危险区域面积先增加后减小,总危险区面积不断减小。高风险区域和中危险区面积先增加后减小的原因是受沟谷不规则断面的影响,当单个承灾体的极高风险区投影面积随雨强减小而减小时,高、中危险区投影面积并不会“等比例”减小,有的承灾体减小幅度大,有的幅度小;而且承灾体的高、中危险区面积不会“同节奏”减小,有的会减小,有的不变,有的会增加,从而造成高、中危险区的面积不会随雨强减小而减小。例如承灾体 A 在 100 年一遇降水强度下,其面积全部为极高风险区,在 50 年一遇降水强度下 80% 成为高风险区,20% 成为中危险区,而承灾体 B 在 100 年一遇、50 年一遇降水强度下,其面积均为高风险区,则随着雨强减小,承灾体 A 与 B 的总和呈极高风险区面积减小,高、中危险区面积增加的现象。

为了定量分析各断面在不同降水强度下泄洪能力强弱,用每个断面总淹没区宽度占总行洪宽度大小来表征泄洪能力,用深泥位区总淹没宽度占总行洪宽度大小来表征泄洪能力稳定程度,不同雨强下每个断面的淹没区宽度占整个行洪宽度的比例见图 10a,断

面深泥位区淹没宽度占整个行洪宽度的比例见图 10b:

通过图 10a 定量分析可知,AA'-DD'断面淹没区宽度占比均小于 50%,其泄洪能力较好;GG'-HH'断面占比介于 50%~70%,其泄洪能力次之;EE'-FF'断面,II'-JJ'断面占比大于 70%,其泄洪能力最弱。

通过图 10b 定量分析可知,AA'-DD'断面随着雨强变化,其深泥位区淹没宽度占比变化幅度最小,其疏导能力对雨强的敏感程度最低,稳定性更好,EE'-GG'断面其占比变化幅度次之,其疏导能力对于强的敏感度及稳定性次之,HH'、II'、JJ'断面幅度最大。其疏导能力对雨强的敏感程度最高,稳定性最差,结合实地调查可知 AA'-DD'断面泄洪深度及宽度相对较大,EE'-GG'断面深宽程度次之,HH'、II'、JJ'沟谷较浅,说明要增加排导能力的稳定性,沟谷断面的泄洪深度和宽度必须增加。

4 误差分析

结合上述模型,本研究是在实际河道的最低点两侧假设两个直角三角形,将这两个三角形对应的角度,

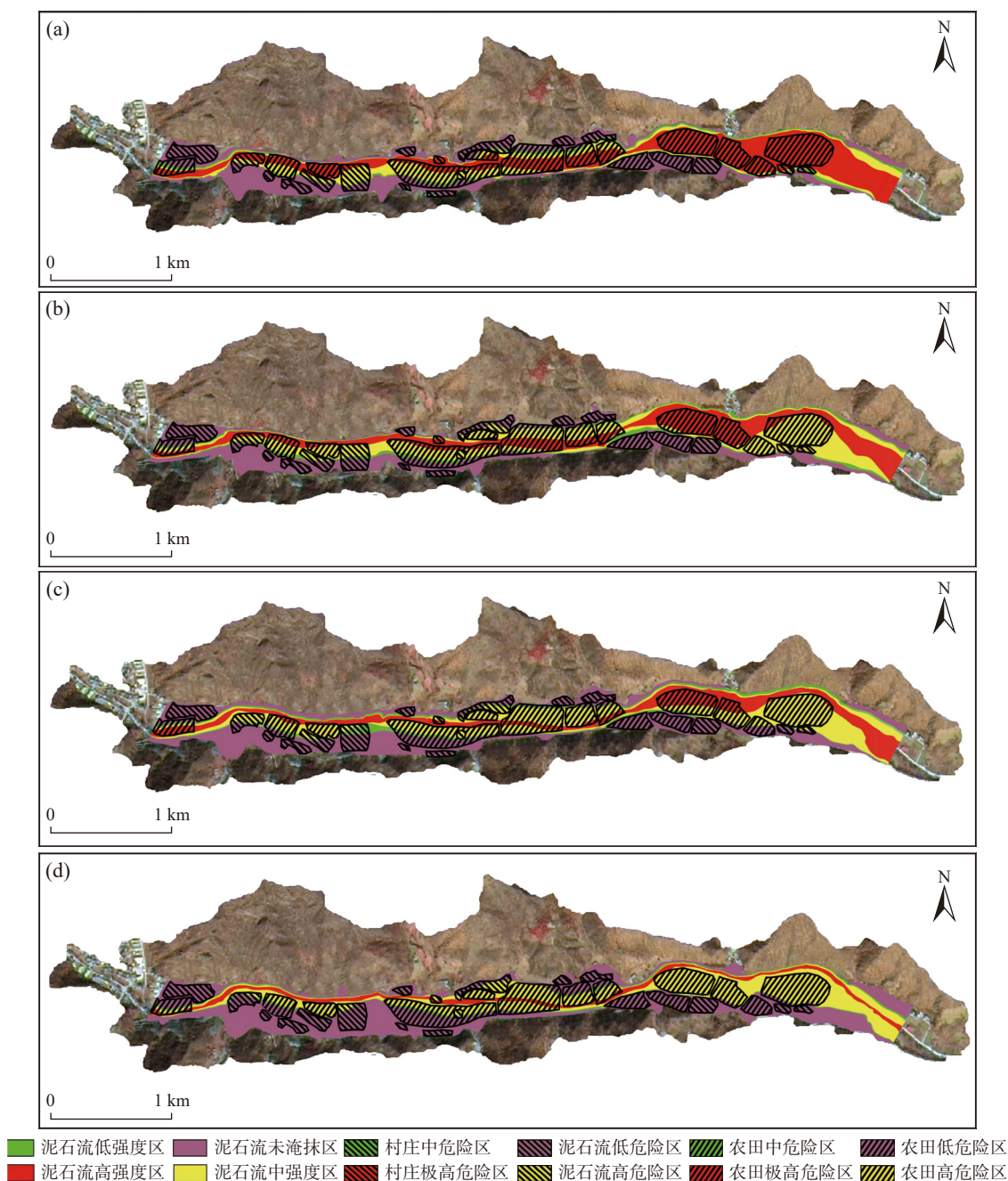


图9 各降水强度下测量断面区域危险度分区图

Fig. 9 Hazard zoning map of the measurement profiles area under various rainfall intensities

代入方程(10)解出最深泥位,采用二分法不断递归求解,让两个直角三角形的面积分别与两侧实际不规则断面面积不断逼近。计算精度由等效面积和实际面积的误差率控制。用表4将各断面在不同降水强度下所求角度及对应面积误差罗列如下:

经分析可以发现,该方法的断面面积误差率,100

年一遇降水强度最高为8%,最低为2.1%,平均误差为4.54%;50年降水强度最高为8.42%,最低为0.22%,平均误差为3.85%;20年降水强度最高为6.39%,最低为0.28%,平均误差为3.69%;10年一遇降水强度最高为9.04%,最低为2.07%,平均误差为5.98%,计算结果精度均符合工程要求。

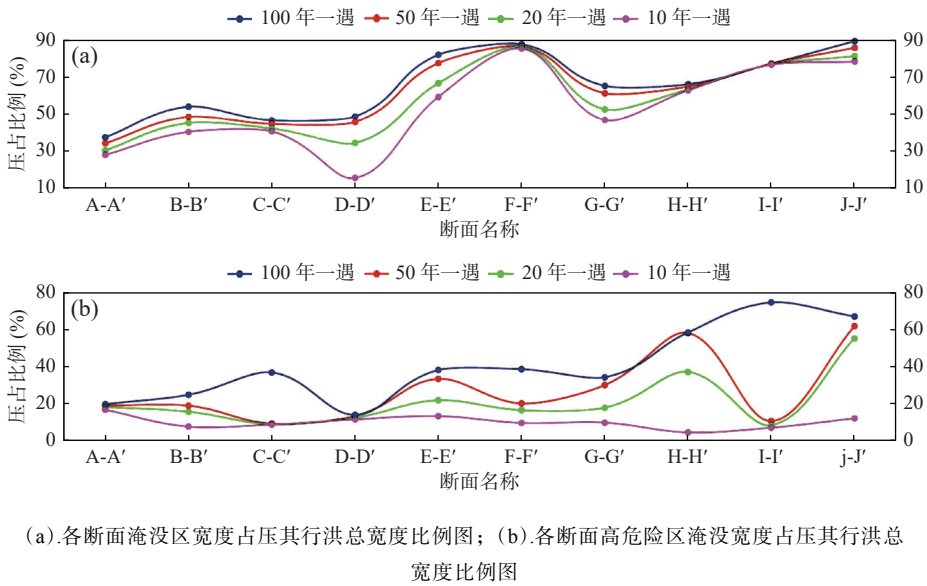


图10 各断面淹没区、高位区淹没宽度占压其行洪总宽度比例

Fig. 10 The ratio of the submerged area and high-level area width to the total flood width of each profiles

表 4 模型递归的最终角度以及面积误差表

Tab. 4 Final angle and area error table for model iterations

断面名称		A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'	G-G'	H-H'	I-I'	J-J'
100年一遇	$\alpha_1(^{\circ})$	86.57	84.97	37	53	83	83	70.88	88.14	88.24	87.7
	$\alpha_2(^{\circ})$	47.96	45.23	85.05	74.44	74	87	85.51	51	27	83.17
	CAD测量实际面积(m ²)	175	214	237	202	244	278	279	380	501	468
	模型求解的理论面积(m ²)	189	224	229	195	246	249	287	395	460	481
	面积误差(%)	6	4.7	3.5	3.5	6.1	2.1	3	4.1	8	3
断面名称		A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'	G-G'	H-H'	I-I'	J-J'
50年一遇	$\alpha_1(^{\circ})$	86.57	84.97	37	53	82	83	67	88.14	88.5	87.7
	$\alpha_2(^{\circ})$	47.96	45.23	85.05	74.44	74	87	83	51	27	83.17
	CAD测量实际面积(m ²)	116	175	199	157	202	265	251	332	392	409
	模型求解的理论面积(m ²)	117	190	194	160	218	284	236	333	402	406
	面积误差(%)	0.90	8.42	2.61	2.00	8.02	7.30	5.66	0.22	2.64	0.77
断面名称		A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'	G-G'	H-H'	I-I'	J-J'
20年一遇	$\alpha_1(^{\circ})$	86.57	84	37	53	82	84	67	88.14	88.5	87.7
	$\alpha_2(^{\circ})$	47.96	45.23	85.05	72	73.53	87	83	51	27	83.17
	CAD测量实际面积(m ²)	96	154	153	119	162	215	184	282	312	338
	模型求解的理论面积(m ²)	93	145	153	124	159	228	188	264	319	320
	面积误差(%)	3.52	5.60	0.28	4.21	1.98	5.66	2.04	6.39	2.13	5.10
断面名称		A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'	F-F'	G-G'	H-H'	I-I'	J-J'
10年一遇	$\alpha_1(^{\circ})$	86.57	84	37	53	82	84	67	88.14	88.5	87.7
	$\alpha_2(^{\circ})$	47.96	45.23	85.05	72	73.53	87	83	51	27	83.17
	CAD测量实际面积(m ²)	85	125	125	99	130	179	146	246	262	294
	模型求解的理论面积(m ²)	78	123	130	105	135	193	159	224	271	271
	面积误差(%)	7.22	2.07	4.03	6.16	3.78	7.40	8.71	9.04	3.48	7.86

5 结论

(1) 基于“等代面积”、“二分法递归逼近”思路建立的泥石流流通模型,可精细求解泥石流在不规则断面处的各项特征参数,并且计算精度可控制。其计算结果可进行泥位深度、威胁范围、危险大小预测评价,研究成果在科学精细化防灾减灾方面有较好的应用价值。

(2) 受沟谷不规则断面影响,断面面积增加率和湿周增加率的比值并不是正比例关系,因此流速并不一定会随着雨强增加而增加,只有泥深、行洪断面面积会随着雨强的增加而增加;不规则断面还引起各承灾体的高、中危险区面积不会随着雨强减小而“等比例”、“同节奏”减小,因此高、中危险区面积并不一定随雨强降中而降中,只有极高危险区、总淹没区面积会随雨强减小而减小。

(3) 通过对研究区各断面排导能力分析可知,可通过增加泄洪通道的深度和宽度,来增强沟谷对泥石流的疏导能力,降低其对雨强的敏感度,减轻泥石流对两岸承灾体的影响。

参考文献(References):

- 柴春岭, 陈守煜. 模糊优选神经网络模型在泥石流平均流速预测中应用研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6): 887-891.
- CHAI Chunling, CHEN Shouyu. Research on application of fuzzy optimization neural network model to debris flow average velocity forecasting[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(6): 887-891.
- 常士骠, 张苏民. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018, 691.
- CHANG Shibiao, ZHANG Sumin. Geological Engineering Handbook(The fifth Edition)[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018, 691.
- 丛凯, 李瑞冬, 毕远宏. 基于 FLO-2D 模型的泥石流治理工程效益评价[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 209-216.
- CONG Kai, LI Ruidong, BI Yuanhong. Benefit Evaluation of Debris Flow Control Engineering Based on the FLO-2D Model[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 209-216.
- 杜榕桓, 李鸿琰, 唐邦兴, 等. 三十年来的中国泥石流研究[J]. 自然灾害学报, 1995, (1): 64-73.
- DU Ronghuan, LI Honglian, TANG Bangxing, et al. Research on debris flow for thirty years in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, (1): 64-73.
- 高东光. 桥涵水文[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 76-87.
- GAO Dongguang. Hydrology and Hydraulics for Bridge Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 76-87.
- 韩征, 徐林荣, 苏志满, 等. 基于流域形态完整系数的泥石流容重计算方法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 100-105.
- HAN Zheng, XU Linrong, SU Zhiman, et al. Research on the method for calculating the bulk density of debris flow based on the integrity coefficient of watershed morphology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 100-105.
- 黄崇福. 自然灾害基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 41-50.
- HUANG Chongfu. A discussion on basic definition of natural disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 41-50.
- 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- KANG Zhicheng, LI Chuofen, MA Ainai, et al. Research on debris flow in China[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- 刘波, 胡卸文, 何坤, 等. 西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 150-160.
- LIU Bo, HU Xiewen, HE Kun, et al. Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 150-160.
- 刘星宇, 刘向东, 赵浩, 等. 豫西某金矿矿渣转化为泥石流物源的危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 29-39.
- LIU Xingyu, LIU Xiangdong, ZHAO Hao, et al. Risk assessment of source of debris flow from a gold slag heap in western Henan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 29-39.
- 倪化勇, 唐川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 606-613.
- NI Huayong, TANG Chuan. Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China[J]. Advance in Water Science, 2014, 25(4): 606-613.
- 唐亚明, 武立, 冯凡, 等. 泥石流风险减缓措施及经济决策——以山西吉县城北沟为例[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 227-238.
- TANG Yaming, WU Li, FENG Fan, et al. Risk Mitigation Measures and Economic Decisions on Debris Flow——Taking Beigou of Jixian County, Shanxi Province as an Example[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 227-238.
- 唐川, 周钜乾, 朱静, 等. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究[J]. 灾害学, 1994, (4): 7-13.
- TANG Chuan, ZHOU Juqian, ZHU Jing, et al. A Study on the risk zoning debris flow on alluvial fans by applying technology of

- numerical simulation[J]. *Journal of Catastrophology*, 1994, (4): 7–13.
- 王喜安, 陈剑刚, 陈华勇, 等. 考虑浆体黏度的泥石流流速计算方法[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(4): 56–61.
- WANG Xi'an, CHEN Jiangang, CHEN Huayong, et al. Calculation of Debris Flow Velocity in Consideration of Viscosity of Slurry[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(4): 56–61.
- 韦方强, 胡凯衡. 泥石流流速研究现状与发展方向[J]. *山地学报*, 2009, 27(5): 545–550.
- WEI Fangqiang, HU Kaiheng. Review and Trends on Debris Flow Velocity Research[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(5): 545–550.
- 徐黎明, 王清, 陈剑平, 等. 基于 BP 神经网络的泥石流平均流速预测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(1): 186–191.
- XU Liming, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. Forecast for Average Velocity of Debris Flow Based on BP Neural Network[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2013, 43(1): 186–191.
- 徐士彬, 钱德玲, 姚兰飞, 等. 基于结构两相流模型计算泥石流对路基的冲击力[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 373–376+394.
- XU Shibin, QIAN Deling, YAO Lanfei, et al. Calculation of impact force of debris flow on subgrade based on the model of conceptual two phase flow[J]. *Journal of HeFei University of technology(natural science edition)*, 2018, 41(3): 373–376+394.
- 杨晓宇. 合作市砂子沟泥石流形成条件及危险度评价[J]. *河北地质大学学报*, 2018, 41(3): 37–42.
- YANG Xiaoyu. Forming Conditions and Risk Assessment on Debris Flow of Shazigou in the Hezuo City[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2018, 41(3): 37–42.
- 于国强, 张茂省, 王根龙, 等. 支持向量机和 BP 神经网络在泥石流平均流速预测模型中的比较与应用[J]. *水利学报*, 2012, 43(S2): 105–110.
- YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, WANG Genglong, et al. Application and comparison of prediction models of support vector machines and back-propagation artificial neural network for debris flow average velocity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(S2): 105–110.
- 朱立峰, 赵成, 于国强, 等. 三眼峪特大泥石流堆积特征[J]. *西北地质*, 2011, 44(3): 30–37.
- ZHU Lifeng, ZHAO Cheng, YU Guoqiang, et al. Accumulation Characteristics of Sanyanyu Extremely Big Debris Flow[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(3): 30–37.
- 张罗号, 张红武, 张锦方, 等. 泥石流流速计算与模型设计方法[J]. *人民黄河*, 2015, 37(4): 18–24.
- ZHANG Luohao, ZHANG Hongwu, ZHANG Jingfang, et al. Calculation Method of Debris Flow Velocity and Debris Flow Model Design[J]. *Yellow River*, 2015, 37(4): 18–24.
- 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. China debris flow[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000.
- Asch, TH. W. J. VAN, Tang, C, Alkema, D, et al. An integrated model to assess critical rainfall thresholds for run-out distances of debris flows[J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(1): 299–311.
- Iverson, Richard M. The physics of debris flows[J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245–296.