

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.009; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.009.

陈龙, 余斌. 黄土地区沟谷型泥石流单沟及区域预警[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2):191-197.

Chen Long, Yu Bin. Early warning of mudflows in single-gully and area in the loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2):191-197.

黄土地区沟谷型泥石流单沟及区域预警

陈龙, 余斌

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: [目的] 提出黄土地区沟谷型泥石流的单沟及区域预警模型, 为黄土地区泥石流预警提供参考。 [方法] 通过收集文献资料, 对泥石流形成的降雨条件、地形条件、地质条件数据进行了分析, 采用通用泥石流预警方法演变的泥石流预警模型对黄土部分地区泥石流进行了单沟及区域预警, 并与基于临界降雨强度的预警方法对比。 [结果] 单沟预警中, 泥石流预警模型对黄土地区 47 次泥石流事件进行预警的成功率约 90%; 区域预警中, 泥石流预警模型对西峰区、镇原县及延安市进行预警的成功率接近 100%; 利用综合降雨临界值对黄土地区泥石流进行简便降雨预警的成功率约 90%。 [结论] 采用泥石流预警模型对黄土地区泥石流进行单沟及区域预警相比于其他研究中基于临界降雨强度的预警方法考虑因素更全面, 有更高的准确率, 预警结果更细致。

关键词: 泥石流; 预警模型; 临界降雨; 单沟

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0191-07

Early warning of mudflows in single-gully and area in the loess region

Chen Long, Yu Bin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: [Objective] This study proposes a single-channel and regional early warning model for gully-type mudflows in loess areas, which provides a reference for early warning of mudflows in loess region. [Methods] Data related to mudflow formation, including rainfall conditions, topographic conditions and geological conditions, were collected from the literature for analysis. The mudflow early-warning model was developed by using the generalized mudflow early-warning method to provide single-gully and regional early warning for mudflows in some areas of the Loess Plateau. Moreover, the model was compared with the early-warning method that is based on the critical rainfall intensity. [Results] In single-gully early warning, the success rate of the mudflow early-warning model for 47 mudflow events in the loess region was approximately 90%. In regional early warning, the success rate of the mudflow early-warning model for Xifeng District, Zhenyuan County, and Yan'an City was almost 100%. The success rate of the simplified rainfall early-warning model for mudflows in the loess region was approximately 90% by using the integrated precipitation threshold value. [Conclusion] Compared with previous studies, where the mudflow early-warning method is based on the critical rainfall intensity, the model developed in this study that is meant for single-gully and regional early warning of mudflows in the loess region comprehensively considers the crucial factors, has high accuracy and ensures detailed early-warning results.

Keywords: mudflow; early-warning model; critical rainfall; single-ditch

收稿日期: 2024-04-28

修回日期: 2024-06-24

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 国家自然科学基金“强震区泥石流形成演进机制与动态监测预警研究”(U21A2032)

第一作者: 第一作者: 陈龙(2000—), 男, 四川雅安人, 硕士研究生, 研究方向为泥石流灾害预警。E-mail: 2787064292@qq.com

通信作者: 通信作者: 余斌(1966—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 主要从事泥石流灾害防治与研究工作。E-mail: yubin08@cdut.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

泥石流是一种含有大量泥沙的特殊洪流,它既是泥石流的一个类型,又是水土流失的一种形式^[1]。黄土高原的主要地形地貌包括梁、塬、峁以及沟谷,黄土泥石流主要发生在塬上或者沟谷中,可将其分为坡面型泥石流和沟谷型泥石流^[2]。频繁的泥石流活动会给人们的生命财产带来重大损失,例如天水罗玉沟 1965 年泥石流,冲倒房屋 3 800 间,据不完全统计,在这次泥石流中受灾的达 1 556 户,严重的 548 户,造成了重大人员伤亡,因此有必要开展泥石流灾害的单沟及区域预警研究,这对减轻灾害,特别是减少人员伤亡具有重大意义。

泥石流灾害的预警目前主要是考虑泥石流发生的降雨条件,刘孝盈^[3]根据印度尼西亚各地区经验公式获得预警和躲避泥石流的降雨临界线,为印度尼西亚火山爆发导致泥石流预警提供科学方法。区域性临界降雨量是目前黄土地区泥石流预警的主要方法,张仲福^[4]提出了陇东各县区不同时间段的泥石流临界雨量;马东涛等^[5]提出在陇东地区形成泥石流的临界雨强为 10, 20, 35 mm/h,为陇东地区泥石流的区域性简便降雨预警提供了依据;吴晓娟^[6]提出在延安地区沟谷型泥石流暴发的临界降雨强度为 32 mm/h,为延安地区泥石流的区域性简便降雨预警提供了依据。

目前泥石流灾害预警的方法大多仅考虑泥石流发生的降雨条件,缺乏泥石流形成的地形和地质条件。余斌等^[7]提出沟床起动泥石流预报模型,为泥石流的预警提供了新方法,但该方法是用于一般的泥石流,还不能直接用于泥石流。

本文通过收集文献资料,对泥石流形成的降雨条件、地形条件、地质条件数据进行分析,重点研究黄土地区泥石流的地质条件特点,引入黄土地区特殊的地质条件,对沟床起动泥石流预报模型^[7]进行简化,利用该模型对黄土部分地区泥石流进行单沟及区域预警,并得到较好的效果,可以为黄土地区泥石流防灾减灾提供科学依据。

1 泥石流预警方法

泥石流灾害形成的影响因素包括岩土性质、地形、降雨、构造作用、植被因素、人为因素等,其中岩土性质、地形及降雨是泥石流形成的重要因素^[8-9]。高强度、短历时的强降雨是沟谷型泥石流形成的动力条件,在强降雨的作用下,沟道表面产生径流,沟蚀、坡蚀加剧,暴雨形成的径流挟带沟道表面的松散堆积物,沟头、沟岸崩塌、滑坡和泻溜中的土体在水流冲刷下,很容易解体形成细小的黄土颗粒,与原有沟道物源一起形成泥石流^[8-9]。

沟谷型泥石流与沟谷型泥石流的形成机理^[7]一样:即短历时强降雨产生山洪侵蚀沟道物源,形成泥石流或泥石流。因此可以采用沟谷型泥石流预警模型的基本形式,将沟谷泥石流预警模型改进为泥石流预警模型:

$$P = \frac{RT^{0.2}}{G^{0.5}} \geq C_r \quad (1)$$

式中: P 为预警值; R 为降水因子; T 为泥石流形成区地形因子; G 为地质因子; C_r 为判据临界值。判据临界值有 3 个,分别是 $C_{r1}=0.28$, $C_{r2}=0.35$ 和 $C_{r3}=0.47$,当 $P < C_{r1}$, $C_{r1} < P < C_{r2}$, $C_{r2} < P < C_{r3}$, $P > C_{r3}$ 时,分别对应蓝、黄、橙、红 IV 级预警^[10],其地形、地质、降雨条件分别表达如下:

1.1 地形条件

无量纲的地形条件表达式如下^[7]:

$$T = J \cdot \left(\frac{A}{L^2}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right)^{0.2} \quad (2)$$

式中: T 为泥石流形成区地形因子; J 为泥石流形成区沟床纵比降; A 为泥石流形成区面积(km^2); L 为泥石流形成区沟道长(km); A_0 为单位面积($=1 \text{ km}^2$)。

1.2 地质条件

形成泥石流的地质条件可以由泥石流形成区岩性的平均坚固系数(F_0)等参数表示^[11]:

$$G = F_0 C_1 C_2 C_3 C_4 \quad (3)$$

式中: G 为地质因子; F_0 为泥石流形成区岩性平均坚固系数; C_1, C_2, C_3, C_4 分别为构造(断裂带)、地震烈度、物理风化和化学风化修正因子(具体取值见文献^[11])。

泥石流的地质条件实际为泥石流的物源条件,与物源的粒径大小有关^[12],黄土地区泥石流沟道形成区物源主要为松散黄土沙粒,根据文献^[11]的坚固系数表中含水黄土的坚固系数取值, $F_0=0.3$,且不再用其他影响因素修正, $G=F_0=0.3$ 。

1.3 降雨条件

在降雨作用下可以形成两类泥石流:A 型是连续低强度降雨后再遇高强度的暴雨诱发的泥石流;B 型是仅由高强度暴雨诱发的泥石流^[8]。

高强度、短历时的暴雨是沟谷型泥石流形成的诱发因素,这类泥石流的临界降雨量可以表示为^[7]:

$$R = \frac{B + 12.5I}{R_0 C_v} \quad (4)$$

式中: R 为降水因子; B 为泥石流暴发前期累积降雨量(mm); I 为泥石流激发 1 h 降雨量(mm); R_0 为当地年平均降雨量(mm); C_v 为当地 10 min 降雨变差系数。其中泥石流暴发前期累积降雨量 B 包含最后激发泥石流的 1 h 降雨量。

2 单沟预警模型

2.1 数据来源

本文收集了甘肃省陇东、兰州市、天水市,陕西省咸阳市、榆林市、延安市,共计 47 条发生泥石流沟道的地形条件、地质条件及降雨条件数据(表 1)。

表1 泥流基本参数
Table 1 Basic parameters of mudflows

编号	名称	地区	日期 (年-月-日)	A/km^2	J	L/km	T	B/mm	I/mm	R_0/mm	C_V	R	P	文献
1	吕二沟	秦州区	1959-08-14	8.36	0.09	4.71	0.052	17.2	17.2	650	0.55	0.65	0.66	[13]
2	吕二沟	秦州区	1961-06-09	8.36	0.09	4.71	0.052	15.5	15.5	650	0.55	0.59	0.59	[13]
3	吕二沟	秦州区	1963-08-19	8.36	0.09	4.71	0.052	21.3	21.3	650	0.55	0.80	0.81	[13]
4	团山沟	子洲县	1968-07-15	0.18	0.14	0.63	0.043	29.0	29.0	450	0.55	1.58	1.54	[13]
5	团山沟	子洲县	1969-05-11	0.18	0.14	0.63	0.043	39.3	39.3	450	0.55	2.14	2.09	[13]
6	团圆沟	绥德县	1961-08-01	0.49	0.10	1.10	0.035	59.0	59.0	508	0.50	3.14	2.93	[13]
7	想她沟	绥德县	1961-08-01	0.45	0.10	1.50	0.017	53.3	53.3	508	0.50	2.83	2.29	[13]
8	大砂沟	盐场堡	1966-08-08	102.50	0.02	30.00	0.004	50.0	50.0	300	0.68	3.31	2.03	[14]
9	南小河沟	西峰区	1954-08-19	30.62	0.03	11.80	0.012	9.2	9.2	550	0.55	0.41	0.31	[14]
10	董庄沟	西峰区	1976-07-16	1.12	0.09	1.60	0.040	19.0	19.0	550	0.55	0.85	0.81	[8]
11	董庄沟	西峰区	1959	1.12	0.09	1.60	0.040	10.4	10.4	550	0.55	0.46	0.45	[14]
12	甘沟	淳化	1960-07-26	12.90	0.32	12.90	0.041	10.8	10.8	601	0.55	0.44	0.46	[8]
13	韭园沟	绥德县	1977-08-04	70.70	0.01	18.00	0.006	88.7	39.0	508	0.50	2.27	1.49	[13]
14	李家沟	榆林市	1959-08-05	0.87	0.07	2.70	0.008	20.0	15.1	450	0.60	0.77	0.54	[13]
15	李家沟	榆林市	1961-07-30	0.87	0.07	2.70	0.008	30.5	26.6	450	0.60	1.35	0.94	[13]
16	鸣玉池	彬县	1963-07-16	2.60	0.04	5.15	0.005	26.9	21.1	554	0.55	0.95	0.60	[9]
17	王家沟	彬县	1959-09-05	0.87	0.20	4.33	0.009	14.0	8.5	554	0.55	0.39	0.28	[9]
18	王家沟	彬县	1960-07-04	0.87	0.20	4.33	0.009	43.9	24.4	554	0.55	1.14	0.81	[9]
19	二道沟	永寿县	1960-08-03	0.41	0.12	4.20	0.002	36.6	36.6	593	0.60	1.39	0.75	[9]
20	二道沟	永寿县	1960-07-21	0.41	0.12	4.20	0.002	36.0	15.3	593	0.60	0.64	0.35	[9]
21	丰裕沟	彬县	1958-07-23	1.18	0.15	4.70	0.008	17.6	17.6	554	0.55	0.78	0.55	[9]
22	丰裕沟	彬县	1958-09-24	1.18	0.15	4.70	0.008	5.3	5.3	554	0.55	0.24	0.17	[9]
23	嘴头沟	淳化	1960-07-26	2.60	0.11	12.40	0.002	19.6	17.6	601	0.55	0.72	0.39	[9]
24	罗玉沟	天水市	1965-07-07	75.30	0.08	20.00	0.036	46.8	32.5	650	0.55	1.27	1.19	[14]
25	洪水沟	西固区	1964-07-20	12.15	0.10	5.50	0.066	26.7	22.0	300	0.68	1.48	1.57	[14]
26	洪水沟	西固区	1964-08-12	12.15	0.10	5.50	0.066	37.2	21.2	300	0.68	1.48	1.57	[14]
27	洪水沟	西固区	1964-08-19	12.15	0.10	5.50	0.066	22.5	13.6	300	0.68	0.94	1.00	[14]
28	南小河沟	西峰区	1956-07-02	30.62	0.03	11.80	0.012	38.0	16.1	550	0.55	0.79	0.60	[14]
29	南小河沟	西峰区	1956-07-09	30.62	0.03	11.80	0.012	41.6	41.6	550	0.55	1.86	1.40	[14]
30	南小河沟	西峰区	1956-08-07	30.62	0.03	11.80	0.012	16.6	12.9	550	0.55	0.59	0.44	[14]
31	南小河沟	西峰区	1960-08-02	30.62	0.03	11.80	0.012	59.2	27.2	550	0.55	1.32	1.00	[14]
32	董庄沟	西峰区	1965-07-18	1.12	0.09	1.60	0.040	12.0	11.1	550	0.55	0.50	0.48	[8]
33	董庄沟	西峰区	1958-07-14	1.12	0.09	1.60	0.040	19.6	12.3	550	0.55	0.57	0.55	[14]
34	董庄沟	西峰区	1956-07-03	1.12	0.09	1.60	0.040	21.1	16.4	550	0.55	0.75	0.72	[14]
35	泥河沟	淳化	1987-08-04	10.50	0.54	7.90	0.145	23.9	23.9	601	0.55	0.98	1.21	[8]
36	泥河沟	淳化	1988-07-24	10.50	0.54	7.90	0.145	44.5	41.5	601	0.55	1.71	2.12	[8]
37	东沟	淳化	1959-08-05	71.20	0.18	17.20	0.102	17.4	17.4	601	0.55	0.71	0.82	[8]
38 ^⑥	辛店沟	绥德县	1956-08-08	3.95	0.17	3.65	0.067	25.3	25.3	508	0.50	1.35	1.43	[13]
39 ^⑥	十八亩台	西峰区	1984-07-30	3.64	0.18	3.51	0.067	15.5	15.5	550	0.55	0.69	0.74	[8]
40 ^⑥	赵家川	西峰区	1985-07-28	290.00	0.05	28.74	0.059	17.0	17.0	550	0.55	0.76	0.79	[8]
41	后意沟	富县	2002-08-20	9.90	0.02	7.10	0.006	98.4	58.3	735	0.45	2.50	1.65	[6]
42	候家庄沟	子长县	2000-08-23	5.10	0.03	3.20	0.021	82.9	49.1	596	0.50	2.33	1.96	[6]
43	十里坪村	宜川县	2003-08-29	0.60	0.06	1.75	0.011	101.9	60.3	711	0.40	3.01	2.21	[6]
44	联办煤矿	黄陵县	2001-07-27	5.10	0.05	2.78	0.046	85.2	50.4	631	0.45	2.52	2.48	[6]
45	脑畔山	安塞县	2004-08-26	1.90	0.05	2.00	0.027	75.8	44.9	573	0.5	2.22	1.97	[6]
46	合家沟	吴起县	1999-07-29	4.80	0.03	3.90	0.013	72.8	43.1	539	0.55	2.06	1.58	[6]
47	秀延河	安塞县	1997-09-15	9.60	0.03	4.10	0.027	62.8	37.2	660	0.50	1.60	1.42	[6]

注:⑥代表 J, L 由公式(8),(9)计算得到;表中参数 A, J, L, T 均由全流域代表形成区。

由于部分文献中泥石流事件缺乏激发降雨量及逐小时降雨量,因此需要根据总降雨量、降雨历时及平均降雨等数据推测前期降雨值 B 和激发降雨值 I 。

形成沟谷型泥石流的降雨主要为短历时的强降雨,本文收集黄土地区强降雨数据,主要采用其中的短历时强降雨数据分析黄土地区的降雨历时与激发降雨量(即泥石流激发 1 h 降雨量)的关系。根据 2013 年 7 月 8 日—23 日延安市以及 2013 年 6 月 19 日—7 月 26 日天水市降雨过程得出 23 场降雨数据。

将 23 场降雨划分为包含主要降雨阶段及激发降雨量(将一场降雨的最大 1 h 降雨量作为激发降雨量)的不同时段降雨,根据各时段的降雨数据拟合得到黄土地区激发降雨量系数(总降雨量与激发降雨量的比值)与降雨历时的关系:

$$I' = 0.82(t/t_0)^{-0.41} \quad 2 \text{ h} \leq t \quad (5)$$

$$I' = 0.62 + 0.38[2 - (t/t_0)] \quad 1 \text{ h} < t < 2 \text{ h} \quad (6)$$

式中: I' 为激发降雨量系数; t 为引发泥石流的降雨历时(h); t_0 为单位时长(=1 h)。

激发降雨量可由下式计算:

$$I = I'N \quad (7)$$

式中: I 为泥石流激发 1 h 降雨量(mm); N 为总降雨量(mm)。

在确定前期降雨量 B 和激发降雨量 I 时,当降雨时间接近 1 小时, B 和 I 值相等,且等于总降雨量;当降雨时间大于 1 h 则 B 值为总降雨量一半,而 I 由公式(5)–(7)计算,并且为保证 $B \geq I$,当计算所得 $I > B$ 时,取 $B = I$ 。

表 1 中部分文献没有划分泥石流形成区,因此以全流域代替形成区获得地形条件参数。表 1 中有 3 条泥石流沟道缺少沟床纵比降及主沟长度数据,通过收集甘肃省共 60 条泥石流沟道地形条件参数^[14],统计流域面积、沟床纵比降及主沟长度,得出沟床纵比降与流域面积关系,及主沟长度与流域面积关系:

$$J = 0.25(A/A_0)^{-0.27} \quad (8)$$

$$L = 1.89(A/L_0)^{-0.48} \quad (9)$$

式中: J 为泥石流形成区沟床纵比降; A 为泥石流形成区面积(km²); L 为泥石流形成区沟道长(km); L_0 为单位长度(=1 km)。

由公式(8)–(9)计算出没有详细纵比降与主沟长度的 3 条泥石流沟道的 J 及 L ,见表 1 中编号 38,39,40。

2.2 单沟预警模型

根据公式(1)及 3 个判据临界值,得出三条 1 h 预警模型临界线,根据临界线及表 2 中 47 条泥石流预警值 P 进行单沟泥石流预警,如图 1 所示。陇东地区

形成泥石流的临界雨强主要为 10, 20, 35 mm/h^[5],陇东地区形成泥石流临界降雨因子也在图 1 中,其上下限计算方法如下:

根据公式(4),假设为 1 h 降雨这种最不利情况,则 B 近似为 I ,此时公式(4)演变为:

$$R = 13.5I/(R_0C_V) \quad (10)$$

式中: R 为降水因子; I 为泥石流激发 1 h 降雨量(mm); R_0 为当地年平均降雨量(mm); C_V 为当地 10 min 降雨变差系数。

47 条泥石流的最大 R_0C_V 值为 357.5,最小 R_0C_V 值为 204,由此计算得到临界降雨强度分别为 10, 20, 35 mm/h 的 R 值上下限,如图 1 所示。

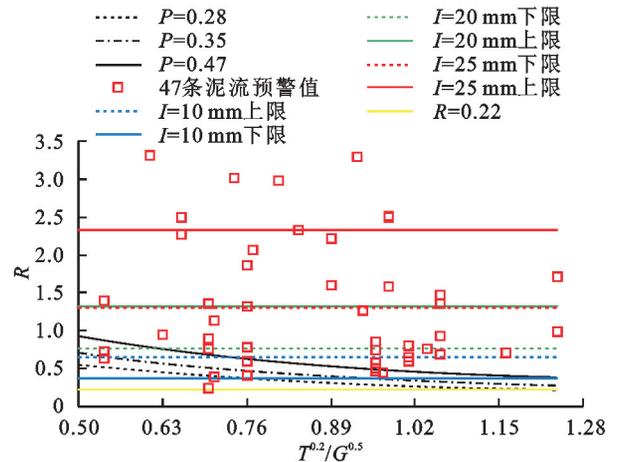


图 1 47 条泥石流单沟预警

Fig. 1 Single ditch warning for 47 mudflows

刘孝盈^[3]得出印度尼西亚日惹泥石流黄色预警线经验公式,参照本文降雨参数形式修改后获得日惹泥石流预警线:

$$R' = B + 4.5I \quad (11)$$

式中: R' 为日惹综合降雨临界值(=245 mm); B 为泥石流暴发前期累积降雨量(mm); I 为泥石流激发 1 h 降雨量(mm)。

通过统计印度尼西亚日惹 1995—2015 年共 20 a 的年降雨量,得到日惹年均降雨量 R_0 为 2 279 mm,该地区雨季旱季分明,参照黄土地区变差系数,日惹 10 min 降雨变差系数 C_V 取值 0.5,由公式(4,12)得 R 为 0.22,如图 1 所示。

根据图 1 统计在经验判断线 $I = 10$ mm 下限及以上的泥石流共 46 个,占比 97.9%;在经验判断线 $I = 20$ mm 下限及以上的泥石流共有 32 个,占比 68.1%;在经验判断线 $I = 35$ mm 下限及以上的泥石流共有 21 个,占比 44.7%。在 1 h 预警模型临界线 0.28, 0.35, 0.47 及以上的泥石流预警值分别有 46, 44, 39 个,占比分别为 97.9%, 93.6%, 83%。在日惹经验判断线 $R = 0.22$ 及以上的泥石流预警值有 47 个,占比 100%。由此可

见,相较于 10, 20, 35 mm 的经验判断线, 1 h 预警模型临界线能归纳更多的降雨预警泥流发生事件, 且预警更精准^[12]; 相较于日惹经验判断线 $R=0.22$, 本文共三条 1 h 预警模型临界线, 并且其上(中)下限之比更小(不超过 2), 临界线更为靠近, 预警更精准^[12]。

3 区域预警模型

3.1 数据来源

本文收集了镇原县、西峰区及延安市共 24 次泥

流事件对应的泥流参数^[6,8,14], 3 个地区的地形参数平均值 T_a 由对应区域的泥流地形参数算术平均值获得, 根据公式(1), (4) 计算得到各区域的综合临界降雨值 R^* (R^* 的定义与计算方法见下一节), 见表 2。

3.2 区域预警模型

短历时强降雨诱发的沟谷型泥流的临界降雨量可由综合降雨临界值 R^* 表示^[15]:

$$R^* = B + 12.5I = C_r G^{0.5} R_0 C_v / T^{0.2} \quad (12)$$

式中: R^* 为综合降雨临界值(mm)。 C_r 有 3 个临界值, R^* 对应也有 3 个临界值。

表 2 西峰区、镇原县及延安市泥流参数

Table 2 Mud flow parameters in Xifeng District, Zhenyuan County, and Yan'an City

编号	名称	地区	日期	B/mm	I/mm	T_a	R_0/mm	C_v	R_1^*/mm	R_2^*/mm	R_3^*/mm	文献
1	南小河沟		1954-08-19	9.2	9.2							[14]
2	南小河沟		1956-07-02	38.0	16.1							[14]
3	南小河沟		1956-07-09	41.6	41.6							[14]
4	南小河沟		1956-08-07	16.6	12.9							[14]
5	南小河沟		1960-08-02	59.2	27.2							[14]
6	董庄沟	西峰区	1976-07-16	19.0	19.0	0.04	550	0.55	86.45	108.06	145.11	[8]
7	董庄沟		1959	10.4	10.4							[14]
8	董庄沟		1965-07-18	12.0	11.1							[8]
9	董庄沟		1958-07-14	19.6	12.3							[14]
10	董庄沟		1956-07-03	21.1	16.4							[14]
11	十八亩台		1984-07-30	15.5	15.5							[8]
12	赵家川		1985-07-28	17.0	17.0							[8]
13	纸坊沟		1957-07-24	112.0	112.0							
14	纸坊沟		1958-07-22	35.5	35.50							
15	郭河	镇原县	1973-08-29	39.0	32.53	0.02	500	0.57	95.58	119.47	160.43	[14]
16	西阳		1973-08-29	39.0	32.53							
17	三合		1973-08-29	39.0	32.53							
18	后意沟		2002-08-20	98.4	58.3							
19	候家庄		2000-08-23	82.9	49.1							
20	十里坪		2003-08-29	101.9	60.3							
21	联办煤矿	延安市	2001-07-27	85.2	50.4	0.02	500	0.5	53.03	66.29	89.02	[6]
22	脑畔山		2004-08-26	75.8	44.9							
23	合家沟		1999-07-29	72.8	43.1							
24	秀延河		1997-09-15	62.8	37.2							

注: I 由公式(5)~(7)计算得来; R_0, C_v 根据等值线图插值得来。

本文利用综合降雨临界值 R^* 对西峰区、镇原县、延安市的泥流事件进行区域预警。根据各区域综合降雨临界值 R^* , 得到 3 个地区的区域预警模型, 如图 2—4 所示。

沟谷型泥流同样需要一定强度的降雨形成超渗产流, 因此其 1 h 降雨量需要超过最小 1 h 降雨量 I_m ^[16]:

$$I_m = 0.017 R^* \quad (13)$$

式中: I_m 为最小 1 h 降雨量(mm)。

由公式(13)得西峰区、镇原县、延安市的最小 1 h 降

雨量 I_m (与 R^* 对应 3 个值), 见图 2—4 中水平段。

张仲福^[4] 给出了陇东地区各县区泥流临界降雨强度, 可用于区域性泥流预警, 其中镇原县泥流临界降雨强度为 45.8 mm/h, 西峰区泥流临界降雨强度为 51.2 mm/h, 如图 2—3 所示。

吴晓娟^[6] 给出延安市沟谷型泥流发生的临界降雨强度为 32 mm/h, 如图 4 所示。由图 2—4 可见, 相较于仅考虑降雨强度的区域泥流预警, 本文采用的区域性泥流预警模型能归纳更多的降雨预警泥流发生事件, 在小区域性的泥流预警中更为有效。

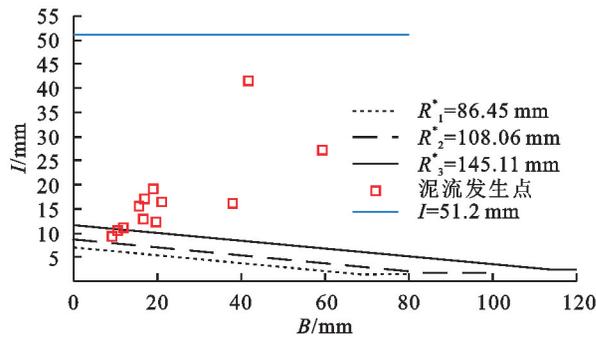


图 2 西峰区区域预警模型

Fig. 2 Regional early warning model for Xifeng District

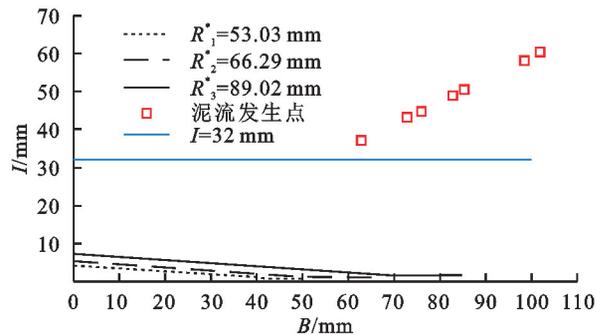


图 4 延安市区域预警模型

Fig. 4 Regional early warning model in Yan'an City

4 简便降雨预警模型

根据表 1 中数据计算得到黄土地区地形条件参数算术平均值为 0.034, 年平均降雨量算术平均值为 556.36 mm, 10 min 降水变差系数算术平均值为 0.54, 由公式(1, 4, 12)计算得到黄土部分地区综合临界降雨值 R_1^* , R_2^* , R_3^* 分别为 90.4, 113.1, 151.8 mm, 由公式(13)计算得到黄土部分地区最小 1 h 降雨量 I_{m1} , I_{m2} 与 I_{m3} 分别为 1.54, 1.92, 2.58 mm。黄土部分地区简便降雨预警模型如图 5 所示。马东涛等^[5]、刘孝盈^[3]的陇东泥流临界雨强和日惹泥流预警线见图 5(日惹火山爆发后产生的松散物质主要为火山灰, 虽与黄土不同, 但可以参考)。

在图 5 中 R_1^* , R_2^* 及 R_3^* 以上的泥流事件占比分别为 97.9%, 97.9%, 87.2%, 而在 $I = 10$ mm, $I = 20$ mm 及 $I = 35$ mm 以上的泥流事件占比分别为 93.6%, 57.4%, 31.9%, 在日惹泥流预警线以上的泥流事件占比 23.4%, 可见本文得到的简便降雨预警模型能归纳更多的降雨预警泥流发生事件, 并且模型临界线更加靠近, 预警更为精细^[12]。尽管日惹泥流预警值在图 5 中显得非常大, 但图 1 中因为引入了当地年平均降雨量和变差系数, 消除了地区差异, 使得该临界值可以预测本文中全部的泥流。因此引入地区年平均降雨量和变差系数以消除地区差异, 对于泥流的预警很重要, 本文的简便预警模型在本文的研究

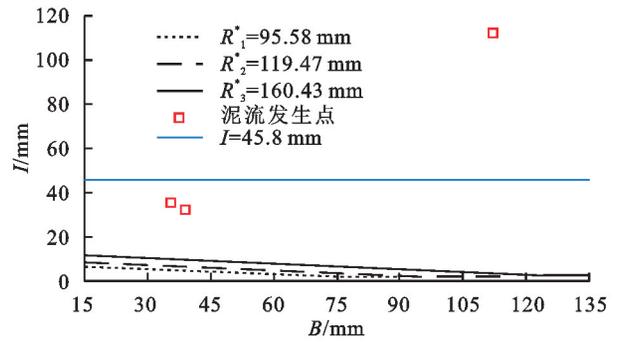


图 3 镇原县区域预警模型

Fig. 3 Regional early warning model in Zhenyuan County

区以外使用时, 需要考虑地区差异。

图 1 及图 5 中, 彬县丰裕沟 1958 年 9 月 24 日泥流事件在预警线以下, 其 2.3 h 总降雨量 9.2 mm, 降水因子 R 仅为 0.24, 显著低于了其他泥流事件的降雨量, 也远低于每小时 10 mm 的最低经验降雨量。分析原因可能是降雨测量误差, 导致降雨量小于实际降雨量, 因此预警失败。图 5 中前期降雨及激发降雨大多数数据由公式(5)~(7)推算得到, 因此呈一定比例关系。

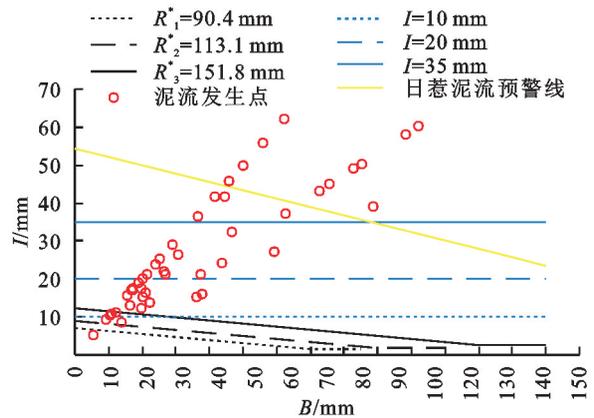


图 5 黄土部分地区简便降雨预警模型

Fig. 5 A simple rainfall warning model for some loess regions

5 结论

通用泥石流预警模型的地质条件在黄土地区即为松散黄土沙粒, 地质因子 G 为 0.3, 较容易被洪水起, 降雨临界值较低。

泥流预警模型对黄土地区 47 次单沟泥流事件进行预警的成功率约 90%, 高于其他研究中方法的成功率, 泥流预警模型的预警效果较好。

以县域为单位的西峰区、镇原县及延安市泥流区域预警, 泥流预警模型成功率接近 100%, 高于其他研究中方法。

利用综合降雨临界值进行黄土地区泥流简便降雨预警的成功率约 90%, 高于其他研究中方法的成功率, 利用综合降雨临界值进行黄土地区泥流简便降

雨预警效果较好。

由于本文沟谷型泥石流事件缺少 10 min 降雨数据,采用 1 h 降雨数据进行泥石流预警,而沟谷型泥石流主要由短历时强降雨引发,采用 10 min 降雨数据进行泥石流预警可能会有更好的预期效果,这还需要在今后的工作中进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 马东涛,崔鹏,张金山,等.黄土高原泥石流灾害成因及特征[J].干旱区地理,2005,28(4):435-440.
Ma D T, Cui P, Zhang J S, et al. Formation causes and features of mudflows in the Loess Plateau, China[J]. Arid Land Geography, 2005,28(4):435-440.
- [2] 马鹏辉,彭建兵.论黄土地质灾害链(二)[J].自然灾害学报,2022,31(3):15-24.
Ma P H, Peng J B. On loess geohazards chain (2)[J]. Journal of Natural Disasters, 2022,31(3):15-24.
- [3] 刘孝盈.印度尼西亚的泥石流预警预报系统[J].中国水土保持,1995(3):17-19.
Liu X Y. Prediction and warning system of debris flow in Indonesia[J]. Soil and Water Conservation in China, 1995(3):17-19.
- [4] 张仲福.陇东黄土高原泥石流灾害临界雨量研究[J].地质灾害与环境保护,2020,31(3):18-24.
Zhang Z F. The research on the critical rainfall of mudflow disaster in the Loess Plateau of East Gansu[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020,31(3):18-24.
- [5] 马东涛,祁龙,邓晓峰.甘肃环县东山黄土泥石流综合治理[J].山地学报,2000,18(3):217-220.
Ma D T, Qi L, Deng X F. Synthetical control of loess-slurry flow hazards in Dongshan, Huanxian County, Gansu, China[J]. Journal of Mountain Science, 2000,18(3):217-220.
- [6] 吴晓娟.延安地区泥石流(泥流)形成机理研究[D].西安:西北大学,2014.
Wu X J. Research about the mechanism of debris flow (loess mudflow) in Yan'an area[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [7] 余斌,朱渊,王涛,等.沟床起动型泥石流预报研究[J].工程地质学报,2014,22(3):450-455.
Yu B, Zhu Y, Wang T, et al. Prediction model for occurrence of debris flows in channels with runoff initiation mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(3):450-455.
- [8] 赵之旭,聂福彪,张万福.黄土塬区沟道流域泥石流的形成因素与防治对策[J].防护林科技,2005,7(4):33-35.
Zhao Z X, Nie F B, Zhang W F. Forming factors and controlling countermeasures of debris flow of gully valley in plateau loess[J]. Protection Forest Science and Technology, 2005,7(4):33-35.
- [9] 周明.咸阳黄土高原泥石流的形成因素及土壤侵蚀类型[J].人民黄河,1996(2):31-33.
Zhou M. The formation factors and soil erosion types of mudflows in the Loess Plateau of Xianyang[J]. Yellow River, 1996(2):31-33.
- [10] 陈文鸿,余斌,柳清文,等.北京山区泥石流的单沟预报[J].长江科学院院报,2023,40(1):94-100,115.
Chen W H, Yu B, Liu Q W, et al. Forecast of single ditch debris flow in mountainous areas of Beijing[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(1):94-100,115.
- [11] 余斌,褚胜名,朱渊,等.风化作用对沟谷型泥石流发育环境的影响研究[J].水土保持通报,2013,33(6):51-56.
Yu B, Chu S M, Zhu Y, et al. Impacts of weathering on formation of gullied debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(6):51-56.
- [12] 余斌,杨凌崑,刘清华,等.基于沟床宽度与颗粒粒径的泥石流精细化预报模型[J].地球科学,2020,45(4):1447-1456.
Yu B, Yang L W, Liu Q H, et al. A precise prediction model on debris flows caused by runoff mechanism based on channel width and particle size[J]. Earth Science, 2020,45(4):1447-1456.
- [13] 王万忠.黄土沟道小流域的泥石流特征和防治[J].水土保持通报,1984(1):19-23.
Wang W Z. The characteristics and preventions of mudflows in small watersheds of loess channels[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1984(1):19-23.
- [14] 李鸿琰,曾思伟,李英才,等.甘肃泥石流[M].北京:人民交通出版社,1982.
Li H L, Zeng S W, Li Y C, et al. Debris flow in Gansu Province[M]. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [15] 余斌,朱渊,王涛,等.沟床起动型泥石流的 10 min 降雨预报模型[J].水科学进展,2015,26(3):347-355.
Yu B, Zhu Y, Wang T, et al. Research on the 10-minute rainfall prediction model for debris flows[J]. Advances in Water Science, 2015,26(3):347-355.
- [16] 匡莹,余斌,陈龙,等.基于无人机测量的泥石流固体颗粒图像识别与泥石流预警[J].山地学报,2023,41(5):733-747.
Kuang X, Yu B, Chen L, et al. Recognition of geomaterials composition by UAV measurements and its application to early warning of debris flow[J]. Mountain Research, 2023,41(5):733-747.