

李成, 高帅, 于宁宇, 等. 陕西省地质灾害气象预报预警指标研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 82–86. [LI Cheng, GAO Shuai, YU Ningyu, et al. Study on Meteorological Forecast and Warning Index of Geological Disasters in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 82–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.013.]

陕西省地质灾害气象预报预警指标研究*

李成^{1,2,3}, 高帅^{1,2,3}, 于宁宇⁴, 程晓露^{1,2,3}, 徐岩岩^{1,2,3}

(1. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安, 710054; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安, 710054; 3. 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安, 710054; 4. 长安大学, 陕西 西安, 710054)

摘要: 陕西省南北地质环境条件差异大, 地质灾害类型不同, 目前采用相同时间段的累计降雨量进行地质灾害预报预警科学性不足。为探索适合于陕西省地质灾害气象预报及监测预警指标, 以2001—2019年4 060起滑坡资料、致灾雨量数据和实时监测数据为基础, 分析了降雨同地质灾害发生的相关性, 分析了陕西省不同地区降雨同土壤含水率的关系、土壤含水率同地质灾害之间的关系, 提出了陕西省地质灾害气象预报预警指标建议, 研究结果为开展陕西省地质灾害气象预报预警提供了科学依据。

关键词: 地质灾害; 降雨; 土壤含水率; 预报预警; 陕西

中图分类号: P641.4; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0082-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.013

构成地质灾害体的物质组成、结构类型、滑动机制等不同, 降雨对其产生的影响机制也不相同^[1-5]。对于浅表层堆积体滑坡来说, 通常是通过短时强降雨来诱发, 即灾害发生的当日降雨起主导作用, 而对于一些较深层的滑坡来说, 它的发生是经过多次降雨的入渗导致的, 也就是前期累积降雨起主导作用, 不同的文献对于前期降雨的时长有不同的界定^[6-11], 通常选取的时长为10 d、30 d以及更长的包括半年、一年等, 针对不同的地区不同的问题有不同的选择。陕西省省级地质灾害气象预报预警采用的是前10 d累计降雨量, 但陕西省南北地貌具有很大反差, 陕北、陕南地区地质灾害类型不同, 采用相同时间段的累计降雨量进行地质灾害预报预警科学性不足^[12-13], 因此, 本文通过典型灾害事例和降雨、土壤含水率实测数据进行综合分析, 最终找出适合于陕西省的最优地质灾害气象预报预警指标。

1 降雨同地质灾害相关性分析

选取2001—2019年19年间陕西省4 060起滑坡资料和致灾雨量数据, 提取计算每起地质灾害前10 d日综合降雨量、前10 d加权累积降雨量、前10 d累积降雨量、前5 d累积降雨量、前3 d累积降雨量、灾害发生当天降雨量等6个特征, 计算不同统计类型降雨量和地质灾害发生之间的相关性。

当日降雨量权重系数向量为:

$$W = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]。 \quad (1)$$

前3 d累计降雨量权重系数向量为:

$$W = [1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]。 \quad (2)$$

前5 d累计降雨量权重系数向量为:

$$W = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0]。 \quad (3)$$

前10 d累计降雨量权重系数向量为:

$$W = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]。 \quad (4)$$

前n日累计降雨量计算公式为:

$$P = \sum_{n=1}^m P_n。 \quad (5)$$

式中: P_n 为第n日降雨量, $m=3, 5, 10$ 。

前10 d加权累积降雨量权重系数向量为:

$$W = [1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1]。 \quad (6)$$

当日降雨量权重最大, 为1。前10 d加权累积降雨量计算公式:

$$P = \sum_{n=0}^9 (P_n) \times (10 - n) \times 0.1。 \quad (7)$$

前10 d日综合降雨量的权重系数向量为:

$$W = [1, 0.8, 0.82, 0.83, 0.84, 0.85, 0.86, 0.87, 0.88, 0.89]。 \quad (8)$$

当日降雨量权重最大, 为1, 权重递减因子可取0.7~0.9, 这里取0.8。前10 d日综合降雨量计算公式为:

$$P = \sum_{n=0}^9 (P_n \times 0.8^n)。 \quad (9)$$

降雨量和地质灾害相关系数计算公式为:

* 收稿日期: 2022-12-16 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金“基于滑带土水文动态响应的黄土滑坡地貌演化预测模型研究”(42201011)

第一作者简介: 李成(1979-), 男, 汉族, 宁夏固原人, 正研级高级工程师, 主要从事地质灾害防治和矿山地质环境保护方面研究。E-mail: 158013192@qq.com

$$r(r_k, C_k) = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i^k - \bar{r}^k)(C_i^k - \bar{C}^k)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (r_i^k - \bar{r}^k)^2)(\sum_{i=1}^n (C_i^k - \bar{C}^k)^2)}} \quad (10)$$

式中: r_k 为第 k 个特征的量值(如日降雨量大小), C_k^k 为 r_k^k 特征对应的灾害发生的频数(如日降雨量为 100 时发生的灾害次数与这种降雨量出现的次数的比值)。 \bar{r}^k 为特征的均值; \bar{C}^k 为频数的均值。

经计算得出, 陕南地区地质灾害的发生同当日降雨量相关性最高, 为 0.864 7, 次之依次为前 10 d 加权降雨量、日综降雨量、累计 3 d 降雨量、累计 5 d 降雨量、前期累计量; 陕北、关中地区则以前 10 d 加权累计降雨量相关性最高, 为 0.845 1, 次之依次为日综降雨量、累计 5 d 降雨量、前期累计量、累计 3 d 降雨量和当日降雨量(表 1)。

表 1 地质灾害与降雨量相关性统计表

降雨特征	相关性	
	陕北地区	陕南地区
当日	0.693 1	0.864 7
累积 3 d	0.721 4	0.798 0
累积 5 d	0.754 2	0.775 6
前期累积量	0.726 0	0.700 8
前 10 d 加权	0.845 1	0.841 0
日综	0.793 0	0.820 3

计算结果和陕西省实际情况相符, 陕北地区大部分处于黄土高原, 黄土地区降雨入渗较慢, 蒸发亦慢, 降雨引发的地质灾害是在黄土持续软化强度降低的过程中发生, 在大多数情况下是一个较为缓慢的过程, 跟前期降雨量关系最为密切。而陕南地区地质灾害大多为堆积层滑坡, 降雨入渗快, 蒸发快, 大多数地质灾害受当日降雨量的影响最大。

2 土壤含水率同降雨的关系分析

(1) 陕南地区。陕南地区以镇安县典型地质灾害事件为例, 2022 年 7 月 22 日, 镇安县单日降雨量达 52.7 mm, 通过分析该时段镇安县隐患点 1 所安装的含水率计实测数据, 可得到以下信息: 单日降雨达 52.7 mm 后, 使得不同埋深的土壤含水率很快就达到某一数值且持续一段时间, 随着降雨的停止, 土壤含水率开始以较快速度下降, 但埋深越大, 饱和状态保持的时间越长。土壤含水率下降到接近降雨前水平所需的时长, 埋深 20 cm 处超过 16 h, 埋深 40 cm 处超过 24 h, 埋深 60 cm 处超过 36 h, 埋深 80 cm 处超过 44 h, 说明一次短时强降雨对土壤含水率最大可影响到超过 44 h 以后(图 1)。

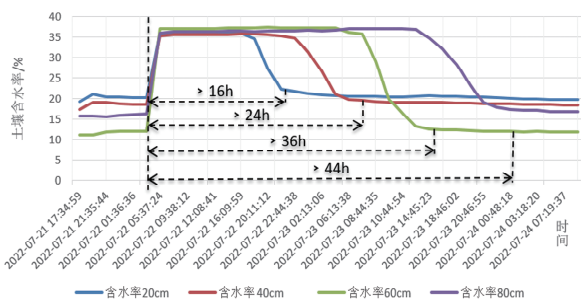


图 1 镇安县隐患点 1 土壤含水率时间过程曲线

2022 年 8 月 25—30 日, 镇安县出现连阴雨天气, 累计雨量达到 100 mm, 最大日降雨量为 8 月 29 日的 44 mm。通过分析镇安县隐患点 2 所安装的土壤含水率计数据, 得到以下信息: 在连阴雨以及 29 日单日 44 mm 降雨的条件下, 土壤含水率于 29 日急剧上升, 但未达到饱和状态, 随着降雨停止, 不同埋深的土壤含水率均开始较为缓慢下降, 直至 9 d 后的 9 月 9 日, 土壤含水率仍未降低至 8 月 29 日水平。说明一轮持续降雨对土壤含水率最长可影响到超过 9 d 以后(图 2)。

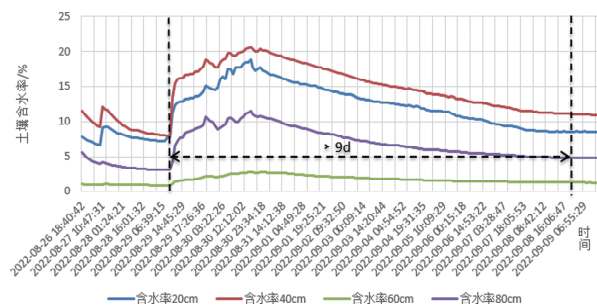


图 2 镇安县隐患点 2 土壤含水率时间过程曲线

以镇安县及周边县区实际发生的 9 起地质灾害为例, 可看出大部分灾害发生时当日降雨量较大, 但也不乏当日降雨很小, 而前 10 d 累计降雨较大的情况, 如镇安县金陵寺镇房店村滑坡、镇安县回龙镇滑坡等(表 2)。

(2) 陕北地区。陕北地区以佳县典型地质灾害事件为例, 2022 年 7 月 9—11 日期间, 佳县累计雨量超过 110 mm, 其中 7 月 11 日单日雨量达到 92 mm, 通过分析佳县一处隐患点所安装的土壤含水率计数据, 可得到以下信息: 7 月 11 日单日 92 mm 降雨后, 埋深 40 cm 土壤含水率起始上升时间滞后于降雨起始时间, 上升速度较快, 随着降雨停止, 土壤含水率缓慢下降, 根据下降趋势, 如果没有后续降雨, 土壤含水率将于 30 d 左右后恢复至原来水平。

埋深 60 cm 的土壤含水率上升起始时间滞后于埋深 40 cm 土壤含水率上升起始时间, 随着降雨停止更加缓慢地下降, 如果没有后续降雨, 土壤含水率将于 60 d 左右后恢复至原来水平。埋深 80 cm 的土壤含水率上升起始时间滞后于埋深 60 cm 土壤含水率上升起始时间, 随着降雨停止缓慢下降, 下降速率相较 60 cm 土壤含水率下降速度更慢, 如果没有后续降雨, 土壤含水率大致将于 67 d 左右后恢复至原来水平。说明佳县地区一轮短期降雨对土壤含水率最长可影响到超过 2 个月(图 3)。

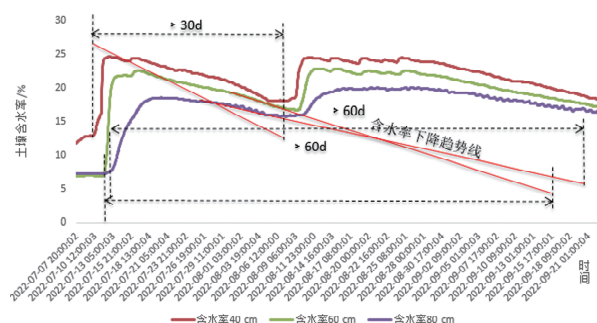


图 3 佳县一处隐患点土壤含水率时间过程曲线

表2 镇安县及周边县区9起地质灾害发生时降雨量统计表

灾情	当日 /mm	前3 d /mm	前5 d /mm	前10 d /mm	前10 d 日综合 /mm	前10 d 加权 /mm
商州区江山村滑坡	86.70	87.50	86.70	161.30	111.60	124.02
商州区杨斜镇李湾村滑坡	31.20	45.2	100.8	140.40	75.76	92.56
柞水县乾佑街办石镇滑坡	34.70	61.30	61.30	202.40	88.91	106.62
镇安县月河镇川河口村滑坡	46.50	46.60	48.90	114.80	57.49	57.33
镇安县永乐街办镇城滑坡	111.90	132.80	175.30	199.90	153.64	163.21
镇安县王家坪社区滑坡	63.20	116.80	145.70	169.10	124.09	134.91
镇安县庄河村三组滑坡	89.20	102.00	145.00	172.00	124.91	133.88
镇安县金陵寺镇房店村滑坡	3.10	10.50	15.50	120.50	36.72	50.29
镇安县回龙镇滑坡	15.00	50.00	71.00	163.00	68.49	78.70

表3 陕北子洲、绥德等地区11起地质灾害发生时降雨量统计表

灾情	当日 /mm	前3 d /mm	前5 d /mm	前10 d /mm	前15 d /mm	前25 d /mm	前30 d /mm	前25 d 加权累计 /mm
清涧县李家塔崩塌	0	80.1	177.6	177.6	209.8	250.7	250.9	197.23
绥德县名州镇龙湾村崩塌	0	178	179	206	232	253	254	200.7
绥德县名州镇龙湾村崩塌	0	60	179	206	232	233	254	206.85
绥德县四十里铺白家山崩塌	0	0	0	286	290	293	320	231.7
绥德县四十里铺崔家圪崂	3	0	0	239	286	293	317	204.8
绥德县石家湾镇崩塌	0	1	1	2	30	227	231	90.35
子洲县马蹄沟镇崩塌	17.2	19	19	49.7	55.7	198.6	217.2	86.16
子洲县周家硷镇崩塌	13.9	0.4	0.4	8.5	40.2	48.8	56.3	35.2
子洲县马岔镇滑坡	89	112	117	124	124	143	144	183.85
子洲县驼耳巷乡驼耳巷村	124	15	15	20	54	70	72	140.25
子洲县苗家坪周检村滑坡	166	43	43	49	94	105	105	203.85

以榆林市子洲、绥德等地区实际发生的11起地质灾害为例,可看出大部分灾害发生时当日降雨量较小,大部分地质灾害发生前,前5 d~前15 d累计降雨量较大,但部分地质灾害发生前,前20 d累计降雨量均较小而前25 d累计降雨量较大,如绥德县石家湾镇崩塌、子洲县马蹄沟镇崩塌,验证了陕北地区前期致灾降雨有效时限可达25 d以上的结论(表3)。

通过分析可知,陕南地区一次短时强降雨,易使土壤含水率快速上升至饱和状态,雨停后又快速下降,降雨对土壤含水率的影响可达到2 d左右。陕南地区一轮连阴雨易使土壤含水率快速上升至饱和状态,雨停后土壤含水率较为缓慢地下降,降雨对土壤含水率的影响可达到9 d以上。陕北地区一次短时强降雨,易使浅层土壤含水率快速上升,但起始上升的时间滞后于降雨峰值,雨停后较为缓慢地下降,降雨对浅层土壤含水率的影响可达到30 d左右。陕北地区一轮连阴雨易使不同深度的土壤含水率快速上升,雨停后土壤含水率较为缓慢地下降,降雨对土壤含水率的影响可达到60 d以上。

3 土壤含水率同地质灾害关系分析

(1)陕南地区。陕南地区以2021年8月22日发生在镇安县永乐镇街道办镇城社区一起滑坡为例,2021年8月10—22日期间,镇安县累计降雨达245 mm,其中8月12日单日降雨量55 mm,8月19日单日降雨量40 mm,8月22日单日降雨量

达95.8 mm。

灾害发生时,埋深50 cm处土壤含水率为54%,埋深80 cm处土壤含水率为56.5%,埋深120 cm处土壤含水率为58.7%,上述土壤含水率可作为灾害发生的警戒含水率数值。根据镇安县土壤含水率曲线可知,埋深50 mm处土壤含水率自8月12日降雨以来,一直维持在高位运行,同降雨的相关性不明显,直至8月22日达到警戒数值,灾害发生。埋深80 cm处土壤含水率8月12日降雨后迅速上升,并维持在高位较长时间,随着降雨停止缓慢下降,同降雨的相关性较明显,8月19日降雨时再次迅速上升,8月22日达到警戒数值,灾害发生。埋深120 cm处土壤含水率8月12日降雨后迅速上升,并维持在高位较短时间,随着降雨停止快速下降,同降雨的相关性非常明显,8月19日降雨时再次迅速上升,然后快速下降,8月22日降雨时再次迅速上升达到警戒数值,灾害发生(图4)。

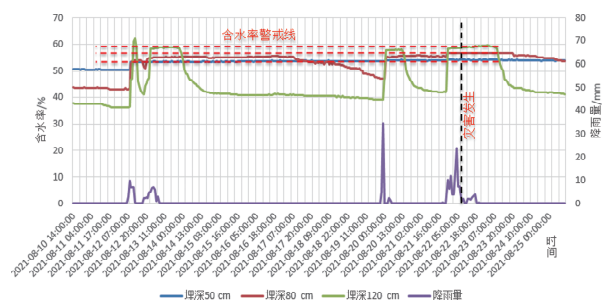


图4 镇安县一起滑坡灾情与土壤含水率关系图

(2)陕北地区。陕北地区以 2021 年 10 月 8 日发生在清涧县李家塔镇一起崩塌地质灾害为例,灾害发生时 20 cm 埋深土壤含水率为 9.5%, 40 cm 埋深土壤含水率为 24%, 60 cm 埋深土壤含水率为 25%, 80 cm 埋深土壤含水率为 26.5%, 上述土壤含水率数值可近似作为地质灾害发生的土壤含水率警戒值。

灾害发生前, 2021 年 9 月 15—25 日, 清涧县连阴雨持续近 10 d, 累计降雨量达 73 mm, 最大日降雨量为 9 月 18 日的 21.7 mm, 10 月 4 日单日雨量达 85.6 mm。

20 cm 埋深土壤含水率超过警戒值 9.5% 之后直至灾害发生也没有回落到原来水平, 持续时间超过 20 d。40 cm 埋深土壤含水率超过警戒值 24% 之后先持续了 2.5 d, 降到警戒线以下后又因 10 月 4 日降雨再次超过警戒值并持续了 3 d, 然后灾害发生。60 cm 埋深土壤含水率超过警戒值 25% 之后先持续了 4 d, 降到警戒线以下后又因 10 月 4 日降雨再次超过警戒值并持续了 3 d, 然后灾害发生。80 cm 埋深土壤含水率超过警戒值 26.5% 之后先持续了 6 d, 降到警戒线以下后又因 10 月 4 日降雨再次超过警戒值并持续了 4 d, 然后灾害发生(图 5)。

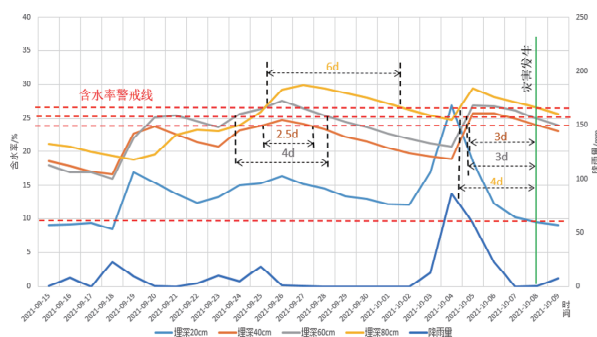


图5 清涧县一起崩塌灾情与土壤含水率关系图

通过分析可知, 陕南地区地质灾害通常发生于土壤含水率上升阶段, 达到某个警戒数值后就可能发生灾害。陕北黄土地区因土壤软化失稳致灾需要一个较长过程, 因此不能单纯用土壤含水率超过某一数值作为地质灾害气象预报预警指标, 还应该考虑超过某一警戒值之后维持高位所持续的时间。

4 结论

陕南地区土壤含水率同降雨量具有高度同步性, 地质灾害的发生同当日降雨量相关性最高, 但也受前期累计降雨量影响, 土壤含水率达到警戒值后即具有发生地质灾害的可能性, 建议采用前 10 d 加权累计降雨量、日综合降雨量或土壤含水率警戒值作为地质灾害预报预警指标。陕北地区土壤含水率相比降雨具有一定滞后性, 地质灾害的发生同前期降雨相关性最高, 土壤含水率超过警戒值后需持续一段时间后才可能发生地质灾害, 建议采用前 20~30 d 加权累计雨量或超出土壤含水率警戒值的持续时间作为地质灾害预报预警指标。

参考文献:

- [1] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 303-309.
- [2] 杨寅, 林建, 包红军. 2018 年地质灾害重点区域气象预警效果检验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 135-140.
- [3] 朱文慧, 邹浩, 肖炜波, 等. 地质灾害精细化气象风险预警模型研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 119-126.
- [4] 温智熊. 广西岑溪市地质灾害易发性区划及气象预警预报研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- [5] 王斌, 张漓黎. 阳朔县斜坡类地质灾害气象预警[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(6): 19-22.
- [6] 胡凤燕. G108 秦岭灾害天气和地质灾害监测预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [7] 温铭生, 刘传正, 陈春利, 等. 地质灾害气象预警与减灾服务[J]. 城市与减灾, 2019(3): 9-12.
- [8] 魏平新, 李秀娟. 广东省突发性地质灾害气象预警实践[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 137-143.
- [9] 代永红. 黄土地质区域降水规律分析与气象预警研究[J]. 陕西水利, 2021(8): 32-34.
- [10] 李阳春, 刘黔云, 李潇, 等. 基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 118-123.
- [11] 刘正华, 余丰华, 夏跃珍, 等. 基于斜坡单元的地质灾害气象预警系统建设初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 42(6): 131-136.
- [12] 程晓露, 于宁宇. 基于气象大数据的地质灾害分级预警临界降雨条件研究[J]. 陕西地质, 2021, 39(2): 71-80.
- [13] 张雅斌, 杜继稳, 蔡态. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28-34.

Study on Meteorological Forecast and Warning Index of Geological Disasters in Shaanxi Province

LI Cheng^{1,2,3}, GAO Shuai^{1,2,3}, YU Ningyu⁴, CHENG Xiaolu^{1,2,3}, XU Yanyan^{1,2,3}

(1. Shaanxi Geological Environment Monitoring Station, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Mine Geological Disaster Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China; 3. Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence,

Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China;

4. Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: There are great differences in geological environmental conditions and types of geological disasters between the north and the south of Shaanxi Province. At present, it is not scientific to forecast and warn geological

disasters by using the accumulated rainfall in the same time period. In order to explore the meteorological forecast, monitoring and early warning indicators suitable for geological disasters in Shaanxi Province, based on data 4060 landslides, disaster – causing rainfall data and real – time monitoring data from 2001 to 2019, the correlation between rainfall and geological disasters, and the relationship between rainfall and soil moisture content and geological disasters in different areas of Shaanxi Province are analyzed. Suggestions on meteorological forecast and early warning indicators of geological disasters in Shaanxi Province are put forward. The research results provided a scientific basis for carrying out meteorological forecast and early warning of geological disasters in Shaanxi Province.

Keywords: geological disasters; rainfall; soil moisture content; forecast and early warning; Shaanxi

(上接第 81 页)

- [19] LEE K, JEONG S. Large deformation FE analysis of a debris flow with entrainment of the soil layer[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 96: 258 – 268.
- [20] LEE K, JEONG S. Study on the effect of entrainment on the behavior of debris flows using a 3D Coupled Eulerian – Lagrangian

finite element method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(4): 164.

- [21] 李宁, 唐川, 史青云, 等. 九寨沟震区“6·21”泥石流成因与致灾机制研究[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(3): 740 – 750.

Study on Scraping Effect of Dam – overtopping Debris Flow Based on Model Test

ZHANG Youyi¹, GU Weiyang¹, HUANG Chen²

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*; 2. *Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China*)

Abstract: Debris flow disasters occurred frequently in the earthquake area after Wenchuan “5.12” earthquake. Debris dam project played an important role in disaster prevention and mitigation of debris flow disaster. However, when the conditions limit the difficulty of dredging in the sand dam reservoir area, after the sand dam is full, the overtopped debris flow will aggravate the erosion and scraping effect on the channel source. This paper takes the “8.20” dam – turning debris flow Chutou gully in strong earthquake area as the research object. On the basis of detailed field investigation, UAV aerial photography and remote sensing image data collection, 25 groups of orthogonal experiments with different factors (debris flow bulk density, dam height and scale) are carried out based on indoor model test. Research shows that: (1) The velocity change of dam – overtopping debris flow goes through four stages: flat throwing acceleration→bottoming deceleration→surge splash acceleration→fluctuating deceleration. With the change of bulk density, dam height and scale of debris flow, the velocity along the way changes. The smaller the bulk density, the greater the dam height and scale and the greater the velocity along the way. (2) The ultimate erosion scour depth of dam – turning debris flow increases with the decrease of debris flow bulk density and the increase of dam height and scale. The morphological change of the channel along the path after scraping is shown as “full – section siltation (bulk density $\geq 1.8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$) + gully erosion pit + gully undercut + gully front erosion and deposition accumulation”. (3) When the dam height and scale are fixed, the erosion amount of dilute debris flow increases with the increase of bulk density, while the viscous debris flow is the opposite; when the bulk density is constant, the erosion amount of debris flow dam increases with the increase of the initial scale of debris flow. The research results could provide a reference for erosion mechanism analysis and debris flow disaster protection engineering design after debris flow dam.

Keywords: chutou gully; scraper erosion; erosion amounts; indoor model test