

2013 年延河流域特大暴雨下的滑坡特征

曹斌挺¹, 焦菊英^{1,2}, 王志杰³, 魏艳红², 李玉进¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西理工学院 历史文化与旅游学院, 陕西 汉中 723001)

摘要:2013 年延河流域遭遇了有气象记录以来的强降雨, 引发了大范围的滑坡。依据中国地质调查局《滑坡崩塌泥石流灾害详细调查规范》(DD2008—02), 对延河流域从南到北 6 个典型小流域内发生的滑坡进行调查。结果表明: (1) 2013 年延河流域大雨、暴雨主要集中在 7 月, 其中宝塔区 7 月侵蚀性降雨量最大(766.8 mm), 是延河流域 2013 年暴雨的暴雨中心区; (2) 距离暴雨中心最近的南部 2 个小流域的滑坡侵蚀模数最大, 达 7 000 t/km², 中部 2 个小流域为 3 700 t/km², 北部的为 1 400 t/km² 左右, 滑坡量与滑坡频率也呈现南部>中部>北部的规律; 2013 年暴雨引发的滑坡为浅表层滑坡, 属于黄土内滑坡, 分布在 20°~60°的斜坡上; 滑坡均为小型滑坡, 其中规模≤1 000 m³ 的滑坡最多, 占总调查滑坡数量的 78%, >5 000 m³ 的滑坡很少。

关键词:滑坡特征; 暴雨; 滑坡频率; 滑坡规模; 延河流域

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0103-07

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20151116.015

Characteristics of Landslide Under the Extreme Rainstorm in 2013 in the Yanhe Basin

CAO Binting¹, JIAO Juying^{1,2}, WANG Zhijie³, WEI Yanhong², LI Yujin¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. College of History and Tourism, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

Abstract: The extreme rainstorm occurred in Yanhe Basin in 2013, and triggered various landslides. According to Investigation Code of Landslide, Rockfall and Debris Flow(DD2008—02), we investigated landslides in six small watersheds in Yanhe Basin from north to south. The results showed that: (1) heavy rain and rainstorm mainly concentrated in July, Baota District was the central area of rainstorm in Yanhe Basin because its erosive rainfall was the greatest; (2) the erosion modulus of landslide of two watersheds which were farther from the central area of rainstorm in south were the largest, and reached to 7 000 t/km², it reached to 3 700 t/km² in central watersheds, and reached to 1 400 t/km² in northern watersheds, landslide amounts and landslide frequency also showed this law: south>center>north; the landslides which were shallow landslides occurred in loess and distributed slopes of 20°~60°; all of landslides belonged to small scale landslide, the proportion of volume of landslides which were less than 1 000 m³ was the greatest and reached 78%, the number of landslides whose scale exceeded 5 000 m³ was few.

Keywords: characteristics of landslide; rainstorm; landslide frequency; scale of landslide; Yanhe Basin

重力侵蚀是指斜坡上的岩土体在重力作用下发生变形、破坏、移动和在不远处堆积的过程^[1]。黄土高原气候、地质地貌、地形及植被等条件的特殊性,导

致该区重力侵蚀频发,重力侵蚀是黄土高原侵蚀产沙的重要方式之一。已有研究表明,在黄土高原丘陵沟壑区,重力侵蚀占流域侵蚀产沙量的 20%~25%,在

收稿日期: 2015-04-01

修回日期: 2015-04-28

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄丘区坡面退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理(41371280)”;水利部公益性行业科研专项经费项目(201501045);国家科技支撑计划项目课题“黄河中游主要来沙区林草减沙作用分析(2012BAB02B05-3)”

第一作者: 曹斌挺(1991—),男,安徽淮北市人,硕士研究生,研究方向:土壤侵蚀研究。E-mail: 462830746@qq.com

通信作者: 焦菊英(1965—),女,陕西宝鸡人,研究员,研究方向为流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

黄土高原沟壑区占 58% 左右^[2]。重力侵蚀包括滑坡、崩塌、滑塌、溜坍、泥石流 5 种侵蚀类型^[3]，而滑坡是黄土高原地区常见的重力侵蚀类型之一。滑坡是指斜坡上的土体，由于地下水和地表水的影响，在重力作用下，沿着滑动面整体地向下滑动的现象^[1]。滑坡往往能堵塞河道，中断交通、破坏农田、掩埋村庄，给人民生命财产造成严重损失。因而关于滑坡的相关研究也备受关注，前人在黄土滑坡的形成机理^[4-6]、基本类型与影响因素^[7-8]、活动分期^[9-10]、滑坡等地质灾害的防治和对策^[11-12]等方面做了大量的工作。



目前，黄土高原由于实施了大规模的退耕还林(草)工程，植被状况明显好转，土壤侵蚀也得以遏制。然而，2013 年 7 月 3 日至 7 月 23 日，陕西省延安市遭遇自 1945 年有气象记录以来过程最长、强度最大、暴雨日最多且间隔时间最短的持续强降雨过程，造成土壤水分极度饱和，引发大范围的小面积山体滑坡(图 1)，为滑坡的研究提供了丰富的研究对象。因此，本研究对此特大暴雨情况下的滑坡特征进行调查，以期为今后黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀治理提供参考依据。



图 1 2013 年暴雨年后毛堡则流域遥感图像对比

1 研究方法

1.1 研究区概况

延河属于黄河的一级支流，全长 286.9 km，流域面积 7 725 km²，地处 108°41′01″—108°27′48″E，36°27′00″—37°58′39″N，位于黄土高原中部，属黄土高原丘陵沟壑区，是黄河泥沙的主要来源之一。延河流域属于半干旱大陆性气候，地跨暖温性森林、暖温性森林草原和暖温性典型草原 3 个地带，年均气温 9℃，年降雨量约 520 mm，且多集中在 6—8 月，其降水量占全年的 70%，且多暴雨。土壤类型有黄绵土、冲积土、黏土、黑垆土等，分布最广的是黄绵土。植被类型从南向北分为南部刺槐、油松、崂山辽东栎、阔叶—针叶混交林带，中部延安到安塞之间为柠条、白羊草草原过渡带，安塞以北为百里香、长芒草草原带^[13]。

本研究在延河流域由南到北选取 6 个典型小流域，即南部宝塔区万花乡的毛堡则流域(9.4 km²)和尚合年流域的一个支沟(3.60 km²)、中部安塞县招安镇陈家孤流域的一个支沟(4.90 km²)和安塞县谭家营乡的张家河流域(10.77 km²)、北部安塞县镰刀湾乡的石子湾(10.40 km²)和高家沟流域的一个支沟(9.50 km²)，对流域内 2013 年特大暴雨引起的滑坡进行调查。

1.2 滑坡调查

依据中国地质调查局《滑坡崩塌泥石流灾害详细

调查规范(1:50 000)》(DD2008—02)^[14]，于 2013 年 10 月 21 日—11 月 9 日对 6 个小流域的滑坡情况进行了调查，调查内容包括：

(1) 滑坡地理位置和周边环境：经纬度、高程、地貌部位、斜坡形态、原始斜坡坡度、植被类型。

(2) 滑坡类型：崩塌、倾倒、滑动、侧向扩离、流动、复合。

(3) 滑坡形态与规模：滑坡体的平面、剖面形状、坡度、长度、宽度、厚度、面积和体积。滑坡体积的计算采用传统方法与平行断面法相结合，传统方法即将形态较规则的滑坡体采用平均厚度乘以滑坡面积得到滑坡体积，平行断面法是将形态较复杂的滑坡体分割为不同的块段，再将各块段理想化成规则的形状，利用相对应的体积计算公式进行各块段的体积计算。不同形状块段体积的计算公式如下^[15]：

(1) 楔形体。相邻两条剖面其中一条剖面面积呈线状尖灭的情况下，则将该两条剖面控制的块段简化为楔形体，按楔形体公式计算其体积：

$$V = \frac{L}{2} \cdot S \quad (1)$$

式中： L ——楔形体的底边高(m)； S ——楔形体的底面积(m²)； V ——楔形体体积(m³)。

(2) 锥形体。相邻两条剖面其中一条剖面面积呈点状尖灭的情况下，则将该两条剖面控制的块段简化为锥形体，按锥形体公式计算其体积：

$$V = \frac{L}{3} \cdot S \quad (2)$$

式中: L ——锥形体的底边高(m); S ——锥形体的底面积(m^2); V ——锥形体体积(m^3)。

(3) 截锥体。相邻两条剖面面积之差与大者面积之比 $\geq 40\%$ 时,则将该两条剖面控制的块段简化为截锥形体,按截锥形体公式计算其体积:

$$V = \frac{L}{3} \cdot (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2}) \quad (3)$$

式中: L ——截锥体的高(m); S_1, S_2 ——截锥体两面的底面积(m^2); V ——截锥体体积(m^3)。

(4) 梯形体。相邻两条剖面面积之差与大者面积之比 $< 40\%$ 时,则将该两条剖面控制的块段简化为梯形体,按梯形体公式计算其体积:

$$V = \frac{L}{2} \cdot (S_1 + S_2) \quad (4)$$

式中: L ——梯形体的高(m); S_1, S_2 ——梯形体上下两个面的底面积(m^2); V ——梯形体体积(m^3)。

在调查滑坡的同时,运用环刀法对每个滑坡体的土壤容重进行测定,每个滑坡体取3个重复。土壤容重计算公式如下:

$$\rho = \frac{(m_1 + m_2) - m_1}{V_1} \quad (5)$$

式中: ρ ——滑坡体的土壤容重(g/cm^3); m_1 ——环刀的质量(g); m_2 ——环刀内烘干土壤的质量(g); V_1 ——环刀的体积(cm^3)。

根据滑坡体容重和滑坡体体积,计算滑坡量,经汇总得到整个小流域的滑坡量,再计算小流域的滑坡侵蚀模数,定义滑坡侵蚀模数为单位面积上的滑坡量:

$$M_s = \frac{G_{\text{总}}}{A} \quad (6)$$

式中: M_s ——滑坡侵蚀模数(t/km^2); $G_{\text{总}}$ ——小流域的总滑坡量(t); A ——小流域的面积(km^2)。

本研究中,滑坡频率被定义为单位面积上滑坡发生的个数:

$$f = \frac{n}{A} \quad (7)$$

式中: f ——滑坡频率(处/ km^2); n ——小流域的滑坡总数(处); A ——小流域的面积(km^2)。

1.3 降雨资料收集

2013年延河流域降雨数据来源于陕西省水利厅网站的每日雨情简报,并采用空间插值的方法(IDW)绘制延河流域2013年侵蚀性降雨等值线图。依据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准:24 h降雨总量在25.0~49.9 mm为大雨,24 h降雨总量 ≥ 50.0 mm为暴雨,统计2013年延河流域大雨、暴雨日数及降雨量,雨量站有安塞、宝塔、子长、志丹、延川、延长、靖边、甘泉。本研究侵蚀性降雨量是以日降雨量 ≥ 12 mm统计的^[16]。

2 结果与分析

2.1 延河流域2013年降雨特征

2.1.1 侵蚀性降雨特征 根据陕西省水利厅网站雨情简报,2013年延河流域春季和冬季基本无降雨,5—10月份延河流域8个区县侵蚀性降雨量及其年内分布特征如表1所示。2013年延河流域侵蚀性降雨量年内分布呈现单峰型,主要集中在7—9月,该时段侵蚀性降雨量可占全年侵蚀性降雨量的85%~92.5%。7月份侵蚀性降雨最大,其中延长县的侵蚀性降雨量为295.1 mm,子长县为385 mm,安塞、靖边和甘泉3个县的变化为400~500 mm,超过500 mm的有3个县区,分别为宝塔区(766.8 mm)、延川县(654 mm)、志丹县(502.9 mm),是往年7月平均降雨量的2~5倍。最大1日侵蚀性降雨量最高达122.4 mm,发生在7月12日延川县。通过图2可以看出宝塔区是2013年延河流域的暴雨中心。

表1 延河流域5—10月侵蚀性降雨量

mm

时间	安塞	宝塔	子长	志丹	延川	延长	靖边	甘泉
5月	17	17	18	37.4	12	0	0	42
6月	97.4	102	75	116.2	70	37	59	78
7月	457.5	766.8	385	502.9	654	295.1	438.9	417.5
8月	176.2	250.8	122.4	181.7	60.3	76.2	192	203.5
9月	88.2	83.8	105.4	111	140.9	91	112.3	123.9
10月	0	0	13.2	0	0	0	14.2	13.2
合计	836.3	1220.4	705.8	949.2	937.2	499.3	802.2	864.9

2.1.2 大雨和暴雨特征 延河流域大雨、暴雨情况统计结果显示,2013年延河流域大雨共发生79站次,其中5月最少,只发生2站次,6月发生10站次,8月和9月均发生16站次,7月最多,共发生35站

次,占大雨站次的44.3%。其中,7月安塞县大雨次数最多,达到7次,大雨总量达到225.9 mm;延长县和甘泉县大雨次数最小,均为2次,平均大雨总量为70 mm(表2)。

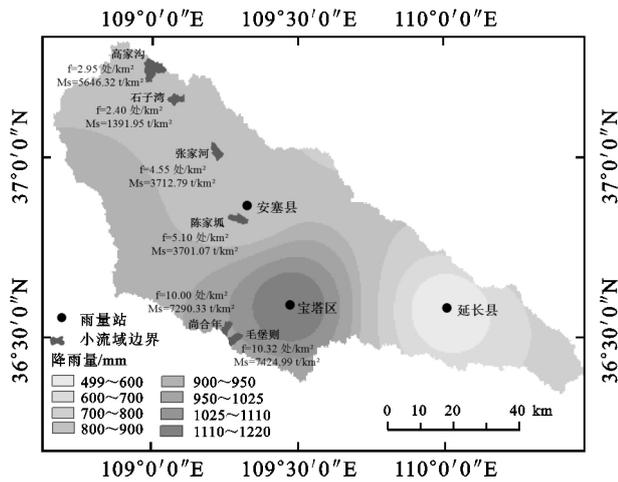


图 2 延河流域 2013 年侵蚀性降雨等值线图

2013 年延河流域暴雨共发生 39 站次, 5 月和 9 月没有暴雨发生, 其次为 6 月发生 2 站次、8 月发生 6 站次, 7 月最多, 共 31 站次, 占暴雨站次的 79.5%。其中, 7 月宝塔区暴雨次数最多, 共有 8 次降雨超过 50 mm, 总暴雨量达到 567.6 mm; 其次是延川县, 暴

雨次数为 5 次, 暴雨总量为 383.2 mm; 子长县暴雨次数最小, 只有 2 次, 暴雨总量为 126.2 mm(表 2)。

2.1.3 诱发滑坡的降雨特征 降雨是诱发滑坡发生的最重要和最活跃的自然因素。已有研究^[17-18]通过对 1960—2006 年陕西黄土高原地区滑坡发生前 10 d 期间的当日平均降水量、平均降水日数、平均连续降水日数、≥10 mm 平均日数、≥25 mm 平均日数、前 10 d 平均累积降水量和滑坡发生当日降雨量、当月降水量、当月暴雨次数进行统计分析表明: 当日平均降水量达到 20 mm 左右, 降雨日数为 5 d 左右, 10 mm 以上日数 2 d 左右, 25 mm 以上日数约 1 d, 这些条件满足之一时, 滑坡就开始发生; 滑坡发生前连续降水日平均 4.2 d; 滑坡与滑坡发生前 10 d 平均累积降水量、当月降水量、当月暴雨次数明显正相关, 与滑坡前 10 d 平均累积降水量的正相关性最高, 10 d 内累计降雨量大于 50 mm 时诱发滑坡的次数明显增多; 主要由单日降水诱发的滑坡, 日降雨量一般 >30 mm。

表 2 延河流域 5—9 月大雨、暴雨分布

时间	降雨特征	安塞	宝塔	子长	志丹	延川	延长	靖边	甘泉
5 月	大雨次数				1				1
	大雨雨量				25				27
	暴雨次数								
	暴雨雨量								
6 月	大雨次数	2	1	2	2	1	1	1	
	大雨雨量	82	28	75	73	42	37	47	
	暴雨次数		1						1
	暴雨雨量		51						50
7 月	大雨次数	7	5	4	6	5	2	4	2
	大雨雨量	225.9	169.2	168.8	240.9	153.6	82.5	131.2	61
	暴雨次数	3	8	2	3	5	3	4	3
	暴雨雨量	231.6	567.6	126.2	212	383.2	212.6	230.7	231.4
8 月	大雨次数		6	2	1			3	4
	大雨雨量		192.2	87.4	46.6			96.6	150.9
	暴雨次数	2	1		1			2	
	暴雨雨量	120.2	58.6		80			54.2	
9 月	大雨次数	2		3	1	4	2	2	2
	大雨雨量	60.4		105.4	45.8	140	71.4	82.3	68.8
	暴雨次数								
	暴雨雨量								

而延河流域 2013 年降雨主要集中在 7 月。仅 7 月就发生暴雨 31 站次、大雨 35 站次, 其中宝塔区暴雨次数最多达 8 次, 安塞县大雨次数最多达 7 次。7 月总降雨日最多的 26 d(甘泉县), 最少的 19 d(延长县)。7 月 10 d 内累计降水量最大的为 403 mm(延川县), 其次是 386 mm(宝塔区)和 330.5 mm(志丹县), 最少的

也有 216.7 mm(延长县)。这些都远远大于前人研究得出的滑坡发生的降水条件。降雨触发滑坡, 有 4 种作用方式^[19]: (1) 对边坡土体, 大量地表水进入土体, 起加载作用, 饱和土体、增大容重, 产生动静水压力; (2) 降雨侵蚀坡脚, 破坏坡体, 改变着边坡结构; (3) 雨水渗入, 弱化土体, 泥化软化滑带, 黏土矿物的水化作

用导致粘着力降低,甚至消失,降雨改变边坡力学性能;(4) 滑动体的渐进性破坏和渗透力的作用。

2.2 滑坡特征

2.2.1 滑坡数量特征 通过统计每个小流域的滑坡频率、滑坡量和滑坡侵蚀模数(表 3),可以看出:滑坡频率与滑坡量和滑坡侵蚀模数保持一致的规律性。就滑坡频率而言,南部毛堡则流域和尚合年流域共有 133 处滑坡,滑坡频率为 10 处/km²,中部陈家瓜流域和张家河流域共发生滑坡 74 处,滑坡频率为 5 处/km²,而北部高家沟流域和石子湾共发生滑坡 53 处,滑坡频率为 2.7 处/km²,约是南部小流域的 1/4,中部小流域的 1/2。对于滑坡侵蚀来说,距离暴雨中心(宝塔区)较近

的南部和中部小流域内滑坡量和滑坡侵蚀模数也明显大于北部小流域,如南部的毛堡则流域和尚合年流域的滑坡侵蚀模数最大,达 7 000 t/km² 以上;中部的张家河流域和陈家瓜流域的滑坡侵蚀模数为 3 700 t/km²;北部的石子湾流域滑坡侵蚀模数最小,为 1 400 t/km² 左右,约是南部的 1/5,中部的 1/3。通过分析小流域滑坡频率、滑坡侵蚀模数与 5—10 月份的总降雨量的关系(图 3)也可以看出:降雨量越大,小流域的滑坡频率和滑坡侵蚀模数越大,说明降雨是滑坡的主要触发因素。由于调查中最大的滑坡发生在高家沟流域,侵蚀量接近 20 000 t,单个滑坡的侵蚀量就接近该流域滑坡量的一半,导致高家沟流域滑坡侵蚀模数较大。

表 3 延河流域典型小流域滑坡数量特征

小流域	毛堡则流域	尚合年流域	张家河流域	陈家瓜流域	高家沟流域	石子湾流域
滑坡量/t	69794.88	26245.19	39986.73	18135.26	53640.68	14476.25
调查面积/km ²	9.40	3.60	10.77	4.90	9.50	10.40
滑坡数量/处	97	36	49	25	28	25
滑坡频率/(处·km ⁻²)	10.32	10.00	4.55	5.10	2.95	2.40
滑坡侵蚀模数/(t·km ⁻²)	7424.99	7290.33	3712.79	3701.07	5646.32	1391.95

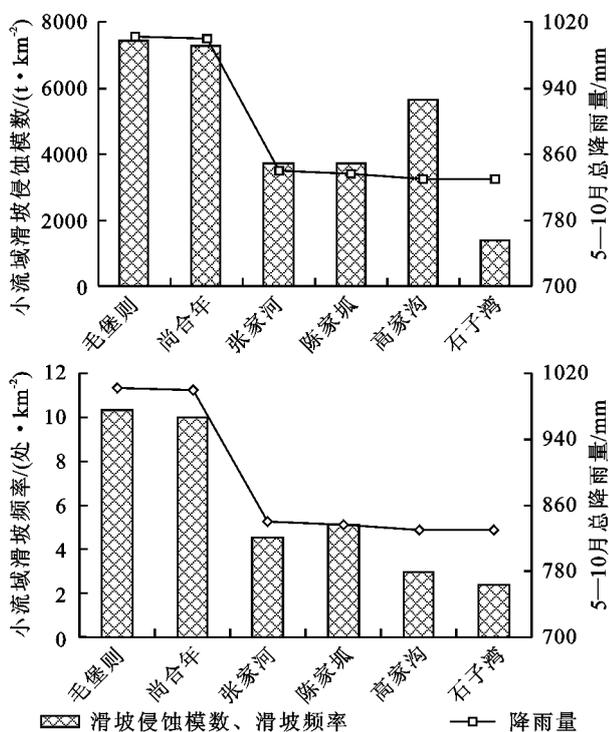


图 3 小流域滑坡侵蚀模数、滑坡频率与降雨量的关系

2.2.2 滑坡类型 按滑坡所涉及的地层和结构,黄土滑坡可分为 3 个类型^[4]:(1) 黄土内滑坡,滑动面(带)在黄土地层内部,沿软弱层滑动;(2) 黄土与基岩接触面滑坡,滑动面(带)位于下伏的基岩顶面;(3) 黄土—基岩滑坡,又可分为黄土—基岩顺层滑坡和黄土—基岩切层滑坡。依据以上分类,本次调查的滑坡为强降雨引发的浅表层滑坡,在黄土沟谷两侧呈片分

布,主滑面发生在相对均匀的黄土层内,基本属于黄土内滑坡。该类滑坡的发生主要与黄土的性质密切相关。黄土有其特殊的沉积环境,多以粉砂为主,质地均匀,其孔隙发育多为大孔隙,结构松散,胶结较差,垂直节理发育,富含碳酸盐,透水性强,水稳性差,遇水易崩解等特点,土体随含水量的增大而强度急剧减小^[20]。黄土斜坡坡体在自重作用下向临空方向产生蠕动,坡体强度逐渐减低,当抗压强度小于剪切应力时逐渐发生变形,坡面逐渐形成拉张裂缝。当降雨时,水分沿着黄土孔隙、节理或裂缝下渗,坡体含水量增大,同时由于节理的作用,导致蠕动变形加剧,形成滑动面,最终导致滑坡的发生^[8]。

此次调查的滑坡为降雨引发的浅层黄土滑坡,而坡度是浅层滑坡发生的一个重要内在条件,是滑坡发育的主控因素之一,在一定坡度范围内(20°~60°),坡度越大,滑坡量越大,在不同小流域及不同植被类型坡面的影响是一致的(图 4)。斜坡坡度对滑坡的影响,一方面是因为斜坡不同高度、坡度、形状等因素,可使斜坡内力状态恶化而导致斜坡失稳;另一方面是斜坡的自然坡度对降雨的地表径流、降雨入渗、地下径流均有很大的影响,导致斜坡土体因降雨致使含水量的改变,从而影响斜坡土体抗剪强度的变化^[21]。本次调查的滑坡多发生在 25°~55°的黄土斜坡上,这是由于 25°~55°的斜坡有一定的承雨面积,雨水不断渗入,土体软化,自重增加,坡度越大,坡体向下的剪切力越大,被浸湿的浅层土体更易发生滑动。相对来说,黄

土中的直立坡或很陡的坡降雨时很少遭受雨淋,坡面干燥,若坡脚被浸湿,则易形成崩塌;若坡脚不受雨淋或冲刷,该类陡坡反而较为稳定^[6]。

2.2.3 滑坡的规模与形态 本次调查发现,2013 年延河流域暴雨并没有引发中、大型滑坡,滑坡的长度和宽度多在数十米之内,厚度一般在 4 m 以内,滑坡体积较小,为 21~17 000 m³,小于 10 万 m³,均属于小型滑坡。已有研究也表明在黄土丘陵沟壑区滑坡、崩塌等重力侵蚀主要以小型滑坡、崩塌、泻溜为主^[8]。通过统计各小流域不同规模滑坡的数量统计(表 4),可以看出:在 6 个小流域,≤1 000 m³ 的滑坡最多,占总滑坡的 78%。其中,南部的毛堡则流域和尚合年流域以≤1 000 m³ 的滑坡为主,占小流域滑坡数量的 75%,其次是规模为 1 000~5 000 m³ 的滑坡,占小流域滑坡数量的 20%左右,>5 000 m³ 的滑坡最少,只有 2 处;中部的张家河流域和陈家瓜流域以≤500 m³ 的滑坡为主,占小流域滑坡数量的 50%左右,其次是规模为 500~1 000 m³,1 000~5 000 m³ 的滑坡,各占小流域滑坡数量的 25%左右;北部的高家沟流域和石子湾流域规模≤1 000 m³ 的滑坡占小流域滑坡数量的 90%左右,更大规模的滑坡均较少。

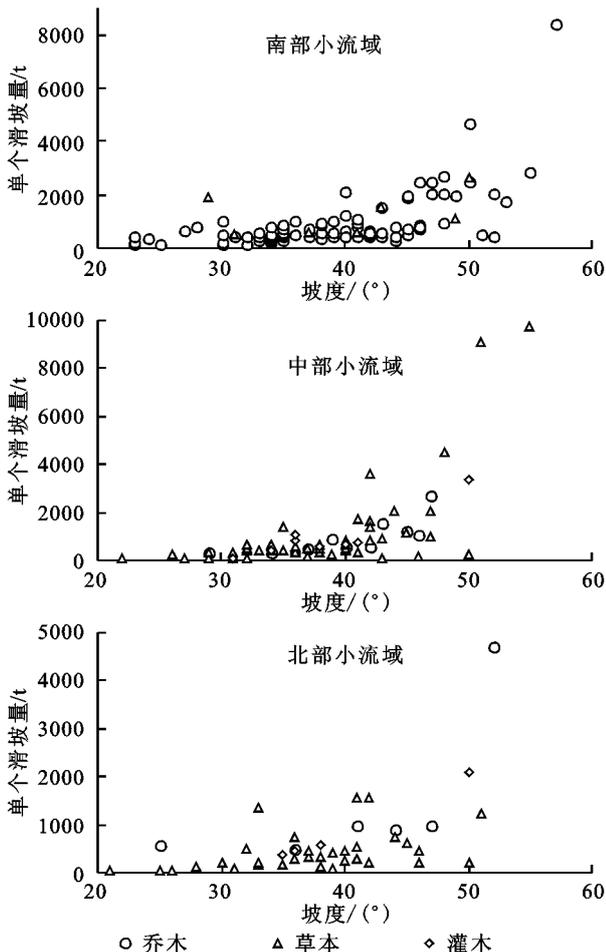


图 4 单个滑坡侵蚀量与坡度及植被类型的关系

调查中最大的滑坡发生在高家沟流域,滑坡体规模为 74 m×65 m×3.6 m,坡度为 38°,体积为 17 000 m³,侵蚀量接近 20 000 t。该处滑坡位于流域内主干道一侧,主干道是人工开挖而成,削坡严重,破坏了原有坡面的应力平衡,造成坡面陡直,原有斜坡稳定性降低;在大暴雨条件下,一方面坡体含水量增加,坡体自重增大,且该坡体上部是少量乔木,进一步增加坡体向下的作用力,另一方面,主干道排水设施严重淤积,不能起到排水作用,导致水流在坡脚附近聚集,坡脚遭到严重冲刷和侵蚀,坡体稳定性降低,形成了较大规模的滑坡和“醉林”现象。

表 4 延河流域典型小流域滑坡规模特征

单个滑坡 体规模/m ³	毛堡则 流域	尚合年 流域	张家河 流域	陈家瓜 流域	高家沟 流域	石子湾 流域
≤500	40	15	26	12	17	15
500~1000	36	12	12	8	5	7
1000~5000	19	9	9	5	4	3
5000~10000	2	0	2	0	1	0
>10000	0	0	0	0	1	0

根据调查规范^[15]的分类,将滑坡的平面形态分为半圆、矩形、舌形和不规则形,剖面形态分为凸形、凹形、直线形、阶梯形和复合形。通过统计不同平面形态和剖面形态的滑坡数量(表 5),可以看出:本次调查滑坡的平面形态以舌形为主,占滑坡总数的 60%,其次是半圆,占滑坡总数的 17%;滑坡的剖面形态以直线形较多,占滑坡总数的 35%,其次是复合形,占滑坡总数的 22%。

表 5 延河流域典型小流域滑坡形态特征

平面形态	滑坡数 量/处	比例/ %	剖面形态	滑坡数 量/处	比例/ %
舌形	162	62	直线形	91	35
半圆	45	17	凸形	43	17
矩形	23	9	凹形	35	13
不规则形	30	12	阶梯形	34	13
			复合形	57	22

3 结论

(1) 2013 年延河流域侵蚀性降雨主要集中在 7—9 月,大雨、暴雨主要集中在 7 月。7 月降雨是延河流域有气象记录以来,同期累积降雨量最大、累计侵蚀性降雨量最大、降雨日最多、暴雨次数最多、且历时最长的一次降雨。其中宝塔区 7 月侵蚀性降雨量最大(766.8 mm),暴雨、大雨次数最多,超过延河流域平均年降雨量,是延河流域 2013 年暴雨的暴雨中心区。

(2) 本研究在延河流域从南到北 6 个典型小流域共调查滑坡 260 处,位于暴雨中心区的毛堡则流域

和尚合年流域的滑坡侵蚀模数最大,达 $7\,000\text{ t/km}^2$ 以上,距离暴雨中心区较远流域的滑坡侵蚀模数相对较小,其中,中部2个小流域为 $3\,700\text{ t/km}^2$,北部的为 $1\,400\text{ t/km}^2$ 左右;滑坡量与滑坡频率也呈现南部 > 中部 > 北部的规律。

(3) 2013年延河流域暴雨引发的滑坡为浅表层滑坡,属于黄土内滑坡。坡度是该类滑坡的主要影响因素之一,在一定坡度范围内($20^\circ\sim 60^\circ$),坡度越大,滑坡量越大,在不同小流域及不同植被斜坡的影响是一致的。

(4) 2013年延河流域暴雨引发的滑坡均为小型滑坡,其中规模 $\leq 1\,000\text{ m}^3$ 的滑坡最多,占总调查滑坡数量的78%, $>5\,000\text{ m}^3$ 的滑坡很少。滑坡的平面形态以舌形为主,剖面形态以直线形和复合形占到一半。

参考文献:

- [1] 吴发启,张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] 黄河水利委员会,水利科学研究院. 黄河科学研究志[M]. 郑州:河南人民出版社,1998.
- [3] 郑书彦. 重力侵蚀分类研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):46-48.
- [4] 徐张建,林在贵,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
- [5] 郑志勇. 黄土滑坡的形成机理[J]. 西安科技大学学报,2008,28(4):694-697.
- [6] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):530-540.
- [7] 吴玮江,王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2002,13(2):36-40.
- [8] 杨吉山,姚文艺,马三保,等. 黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):5-8.
- [9] 刘朋飞,李滨,陈志新. 陕西延安地区黄土滑坡特征及其活跃性分期[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012,23(4):16-19.
- [10] 段钊,赵法锁,陈新建. 陕北黄土高原区滑坡发育类型与时空分布特征:以吴起县为例[J]. 灾害学,2011,26(4):52-56.
- [11] 李昭淑. 陕西省黄土滑坡的成因与防治[J]. 西北大学学报,1989,19(2):89-96.
- [12] 周新民,王雁林. 陕西省地质灾害防治现状问题与对策探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):84-88.
- [13] 刘春利,杨勤科,谢红霞,等. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 环境科学,2010,31(4):850-857.
- [14] DD2008-02 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50000)[S]. 中国地质调查局,2010.
- [15] 王湘桂,吕玲,王浩. 平行断面法在滑坡体积计算中的应用[J]. 资源环境与工程,2012,26(S1):107-108.
- [16] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [17] 李明,高维英,杜继稳. 诱发陕西黄土高原地质灾害降水因子分析[J]. 陕西气象,2009(5):1-5.
- [18] 张雅斌,杜继稳,蔡蕊,等. 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.
- [19] 谢守益,徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1999,32(1):22-24.
- [20] 陈丽华,落合博贵. 陇东黄土高原地区滑坡调查分析[J]. 北京林业大学学报,1994,16(S4):101-105.
- [21] 张永双,吴树仁,赵越,等. 湖北省巴东县桐木园山坡型泥石流的形成机理及预警指标:以2003-03-31强降雨过程为例[J]. 地质通报,2003,22(10):833-838.

(上接第102页)

- [8] 李海涛. 华北暖温带山地落叶阔叶混交林的茎流研究[J]. 生态学报,1997,17(4):372-376.
- [9] Iroumé A, Huber A. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(12):2347-2361.
- [10] 常志勇,包维楷,何丙辉,等. 岷江上游油松与华山松人工混交林对降雨的截留分配效应[J]. 水土保持学报,2006,20(6):37-40.
- [11] 何常清,薛建辉,吴永波,等. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.
- [12] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山华山松林降雨再分配及其空间变异特征[J]. 生态学报,2009,29(1):76-85.
- [13] 殷晖,关文斌,薛肖肖,等. 贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量再分配的影响研究[J]. 北京林业大学学报,2010,32(2):2-5.
- [14] 党宏忠,周泽福,赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):61-64.
- [15] 党宏忠,董铁狮,赵雨森. 水曲柳林冠的降水截留特征[J]. 林业科学研究,2008,21(5):657-661.
- [16] 巩合德,张一平,刘玉洪,等. 哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征[J]. 浙江林学院学报,2008,25(4):469-474.