天水市群发地质灾害特征与成灾机理

张成航[1,2], 张茂省[1,2], 于国强[1,2]

(1. 国土资源部 黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘　要: [目的] 对甘肃省天水市 2013 年"7·25"群发性山洪地质灾害的成灾特征、分布规律及其成因进行分析,为黄土丘陵沟壑区降雨诱发地质灾害早期识别和减灾防灾提供科学依据。[方法] 在全面实地调查的基础上,建立三维连续介质动态数值模型,对天水市典型滑坡运动特征进行求解。[结果] "7·25"山洪地质灾害具有普遍性,群发性明显,局地爆发性,隐蔽性强等 5 大显著特征;受强降雨和地震因素叠加效应的影响加剧了灾害的破坏程度;此次灾害大部分滑坡失稳的坡面几何形态多为直线型凹型面坡,滑坡失稳多发生在 35°～45°坡度范围内,以 40°坡居多,黄土坡面滑坡通常是窄条状、方量较小;典型滑坡体在斜坡运动过程中,平均速度、最大速度、总动能和总势能均是急剧增加,进入水平面后,各个动力参数急剧下降。侵蚀作用是滑坡运动中非常重要的不可忽视的一个重要的因素,它使得灾害体质量增加,同时依靠较高的速度(30 m/s),具有更强的破坏性。[结论] 天水市群发地质灾害形式依然严峻,降水是引发和加剧此次地质灾害的主要因素。

关键词: 群发地质灾害; 发育特征; 成灾机理; 天水市

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2016)04-0046-05　　**中图分类号**: P642

文献参数: 张成航, 张茂省, 于国强. 天水市群发地质灾害特征与成灾机理[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 46-50. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.009

Development and Causes of Group Geological Hazard in Tianshui City

ZHANG Chenghang[1,2], ZHANG Maosheng[1,2], YU Guoqiang[1,2]

(1. *Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] Through the investigation of the "7·25" massive mountain torrents geological hazards in Tianshui City of Gansu Province occured in 2013, we expected to reveal the landslide mechanism and provide a scientific basis for early identification, prevention, and reduction of rainfall-induced geo-hazards in the loess ridge-hill areas of China. [Methods] The characteristics, distribution law of geological hazards and its causes were studied. Three dimensional continuum dynamic numerical models were established to calculate the dynamic character of landslide in Tianshui City. [Results] The results showed "7·25" massive mountain torrents geological hazards had characteristics of occurrence universally, outbreak massively, locally and unnoticeably, and had strong hazard potentiality. The hazards were exacerbated by the effects of earthquake and rainfall. The slope geometry shapes of landslide in the torrent's geological hazard are linear concaved. Most slopes are in the range of 35°～45°, and among which, 40° slopes were found more frequently. Loess slope landslide is usually in a narrow strip and with small volume. The average velocity, maximum velocity, total kinetic energy and potential energy of typical landslide increased dramatically in slope motion process. These indices dropped sharply after entering a horizontal plane. Erosion plays an important role in landslide movement, which make slope sliding in a high speed and lead to more destructive hazards. [Conclusion] The risk degree of group geo-hazards remains severe in Tianshui City. Precipitation is the main factor that cause and aggravate the geological disasters.

Keywords: **group geological hazards; development characteristics; mechanism; Tianshui City**

收稿日期: 2015-10-15　　**修回日期**: 2015-10-30

资助项目: 国家自然科学基金项目"高山峡谷区域暴雨泥石流成灾临界阈值研究"(41302224); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KJXX-20); 国家地质找矿专项(12120114025901, 121201011000150022)

第一作者: 张成航(1982—),男(汉族),山东省平邑县人,硕士,工程师,主要从事地质灾害调查与研究。E-mail: nicesupper@qq.com。

通讯作者: 于国强(1979—),男(汉族),内蒙古自治区包头市人,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持及地质灾害等方面的研究。E-mail: yuguoqiang23@163.com。

在山区,一次强降雨将可能引发大量的滑坡、泥石流等地质灾害,造成大量的人员和财产损失。2013 年,中国西南、西北多个地区突降持续性强降雨,诱发了大范围群发性地质灾害。7 月 3—31 日,延安地区降下有气象记录以来过程最长、强度最大的一次降雨,引发多达 8 000 余处地质灾害,造成严重的财产损失和人员伤亡[1-3];7 月 8—11 日,都江堰出现区域性暴雨天气,是 1954 年都江堰有气象记录以来雨量最大的一次降雨,诱发大量泥石流灾害及重大伤亡事故的滑坡灾害[4-7];7 月 25 日,天水市出现大范围罕见暴雨天气,暴雨导致天水市出现群发性滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,共出现 708 处,造成 24 人死亡、1 人失踪、2 386 间房屋倒塌、6 666 间房屋受损,直接经济损失达 82.75 亿元,给当地人民生命和财产造成了巨大损失[8-9]。群发性地质灾害发生时,如何避免重大人员和财产损失的重复发生,是中国地质灾害防灾减灾工作的重大难题。在对已有的典型群发性降雨地质灾害的特征分析基础上,对其成灾机理进行研究,用以对类似区域地质灾害隐患的评估,是解决上述难题行之有效的途径之一。本研究在对 2013 年甘肃省天水市“7 · 25”降雨地质灾害全面调查的基础上,对此次地质灾害的发育特征及成因进行深入探讨,并选取秦州区娘娘坝镇南峪村滑坡作为研究对象,通过三维连续介质模型[10-14],对典型滑坡运动路径、滑移距离、致灾范围、滑坡强度、运动速度进行研究,以揭示滑坡运动机理,得出一些新的发现或启示,以期为中国黄土梁峁区降雨诱发地质灾害早期识别和减灾防灾提供科学依据。

1　群发地质灾害发育特征分析

天水市地处陇西黄土高原、秦岭山地和陇山山地的过渡地带,绝大部分属黄土丘陵沟壑区。区内黄土分布广泛,覆盖较厚,黄土丘陵区被渭河、西汉水及其支流切割得支离破碎,千沟万壑。既有岩层相对松软地带,河流侵蚀堆积形成一系列串珠状河谷盆地;又有岩层较坚硬的地段,河流侵蚀下切后形成陡峻的峡谷。加之黄土垂直节理和裂隙发育,造成区内地质环境十分脆弱,滑坡、泥石流、崩塌、不稳定斜坡失稳等地质灾害现象频繁发生,是研究降雨诱发地质灾害的优良场所。受到“7 · 22”岷县地震和“7 · 25”大范围强降雨天气影响,天水西北和南部地区地质灾害大面积、群发性爆发。截止 2013 年 8 月 1 日,天水市已连续出现 4 次强降雨天气,由于强降雨持续时间较长,降水入渗致使土体含水量短时间内达到饱和状态,自重增加,抗剪力降低,形成危害性较大的群发性滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害。

通过野外调查,此次强降雨地质灾害新发生灾害点为 496 处,主要分布在降雨范围的秦州区、麦积区、武山县、甘谷县、清水县、张家川回族自治县 7 县(区),“7 · 25”群发性山洪地质灾害点分布如图 1 所示。

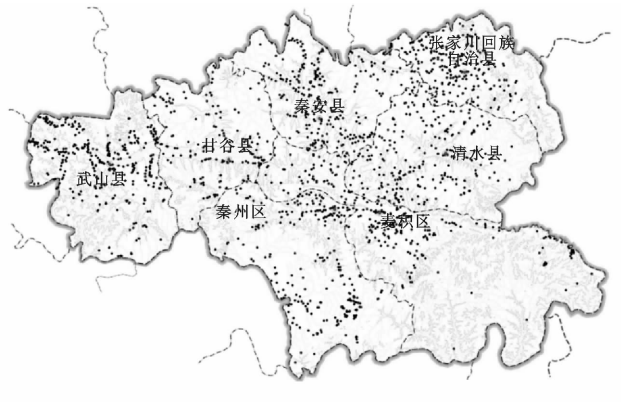


图 1　2013 年天水市“7 · 25”群发性地质灾害点分布

受地质环境条件及本次暴雨灾害的影响和制约,灾区滑坡等斜坡灾害在软弱地层中集中分布,主要分布于第四系黄土、第四系坡残积层及古、新近系泥岩地区,其他地层中滑坡的数量较少。滑坡大多沿构造线集中分布,滑坡的滑向与构造线走向平行。同时,崩塌、滑坡及不稳定斜坡沿村庄、交通沿线集中分布。灾区山体陡峻,沟壑纵横,相对高差大,给崩塌、滑坡等地质灾害的形成创造了有利的地形条件。经过调查分析,此次灾害区地质灾害呈现以下 5 点特征:(1) 普遍性、群发性明显。灾害区内泥石流、滑坡、崩塌灾害普遍发育,几乎每个乡镇均有地质灾害分布,由于受强降雨影响,滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害随处可见,连片分布,范围广泛,在山体斜坡上形成类似“爪”式的坡面碎屑流,群发性特征十分明显(图 2),并且根据航片显示,地质灾害发生约占全区面积的 10%。(2) 局地爆发性特征。此次群发性地质灾害发育呈流域单元集中分布特征,滑坡、泥石流等主要集中渭河流域和西汉水流域及其较大支流的河谷地区,地质灾害发育密度相对较高[15-16],麦积区和秦州区尤为突出。(3) 隐蔽性强。天水地区地处黄河流域与长江流域的过渡地带,植被覆盖率高,地质灾害的隐蔽性非常强,根据现有的专业知识和监测程度很难判断地质灾害的具体发生部位,具有隐蔽性强特征,大部分地质灾害隐患只有在发生灾害后,才被发现。(4) 潜在危害大。通过对灾前灾后航摄影像对比可知,局地爆发区域内山体滑坡的面积约占山体坡面面积的 10%。现场调查发现,这些山坡上未发生滑动的部分也处于饱水状态,稳定性很差,若再发生降雨,加剧地质灾害发生的可能性非常大,对居民灾后回迁和恢复重建造成巨大的潜在危害。(5) 灾害

链模式显著。此次灾害突破了传统单体地质灾害模式，代之以广泛分布的高密度坡面流、碎屑流和沟谷型泥石流叠加的灾害链模式，并造成多处堵江，形成堰塞湖，威胁灾后回迁和重建工作[17]。





图2 天水地区“爪”式滑坡地质灾害

2 群发地质灾害成灾机理研究

2.1 天水市群发性山洪地质灾害成因分析

2.1.1 降水因素 降水是引发和加剧此次地质灾害的主要因素。自6月19日至8月1日，天水地区持续不断连续降水。尤其是6月19—21日，7月7—8日，7月21—22日，7月24—26日期间，天水市各县区连续经历4次强降雨，降雨量为199.1～369 mm。区域内连续降水，具有强度大、范围广等特点，使得区内山体岩土体饱和，岩土体抗剪强度显著降低。进一步诱发或加剧了崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的发生。灾区的708处地质灾害隐患点，几乎都由此次强降雨引发或加剧而产生。

2.1.2 地震灾害叠加 天水市地处六盘山南北地震带中段银川—天水—武都带和秦岭北缘东西地震带中部天水—兰州带的交汇复合部位，地震背景条件复杂，活动频繁。据有关资料记载，自公元前186年以来，该地震带记录到5级以上地震24次，其中6.0～6.9级地震20次，7.0～7.9级地震7次，大于或等于8级的地震11次，地震活动的强度大、频率高，有明显的成群分布的特点，具有活跃—平静相互交替的活动态势[18-19]。2008年5月12日汶川8级地震波及天水，天水震感强烈，民房受损严重，并伴随有地质灾害活动；2013年7月22日岷县6.6级地震，波及天水，渗透岩土体遭受扰动，加重了此次天水市群发性山洪泥石流灾害，灾害的叠加效应明显加剧了天水市群发性山洪地质灾害。

2.2 天水市降雨诱发型滑坡成灾机理研究

(1) 大部分滑坡基本都位于老滑坡上，底部岩性为变质砂岩，顶部由黄土覆盖，覆盖层厚度约为2 m，滑动面多位于覆盖层与基岩接触面。

(2) 黄土坡面滑坡通常是窄条状、分布宽度范围从几米到十米不等，长度从十几米到几百米，失稳体积逐渐从几十立方至上百立方。

(3) 大部分滑坡失稳发生在35°～45°坡度范围内，40°坡居多。

(4) 大部分滑坡失稳的坡面几何形态多为直线型凹型面坡。

在特征分析基础上，采用有限元求解方法，开发了三维连续介质动态数值模型程序，对流变模型(摩擦模型、Voellmy模型)进行编码，采用以上模型对天水降雨诱发型滑坡运动路径、滑移距离、致灾范围、滑坡强度、速度进行研究，以揭示滑坡运动机理。由于此次灾害最为严重的区域为天水市娘娘坝镇区域，因此选取其内南峪村滑坡作为研究对象，该滑坡的特征和上述4个特征一致(图3)。该滑坡高为175 m，坡长267 m，坡度40°，滑坡带宽约为20 m，坡面最深处下凹2 m。按照滑坡原型设计的数值模型，滑坡初始物质形状为一球冠形状，高为1.8 m，半径为1 m，位于滑坡顶部。两种模型下，初始物质在有限制的渠道中加速下滑，物质初始形状是圆形，物质轮廓沿着渠道拉长，逐渐形成蝌蚪状，横向扩展在斜坡上运动过程中很小。当进入水平区域，由于没有边界限制，横向扩展开始加剧，逐渐增大，此时纵向延伸依然比较明显。其沉积物轮廓形状与Gray等[20]采用内摩擦角40°，底摩擦角30°石英碎片的渠道颗粒流试验结果极其相似。另外发现，堆积区中心并不在最大深度位置处，而是在最大深度位置处前侧。尽管流变模型不一样，但物质中心(反映了整体运动特性)位置都很类似，这是由于泥石流与滑坡的前缘比其堆积区中心研究意义更为重大。

从图3可以看出，在两种模型情况下，随着沿坡下降，尽管有额外的物质不断卷入，其平均深度仍然

逐渐降低。当物质在堆积区不断沉积,随着累计体积不断增加,物质深度逐渐增加,物质最终形成了一个主体相对较厚,前端相对较薄的形态。两种模型下,堆积区深度最深处均位于坡脚水平区域附近,其最大堆积厚度达 2.2 m,堆积区横向范围达 40 m 左右,纵向范围达 30 m 左右,这与现场调查结果一致,验证了此次模拟结果的准确性;同时也可以采用该数值模型和流变参数对天水市同类型滑坡进行预测。

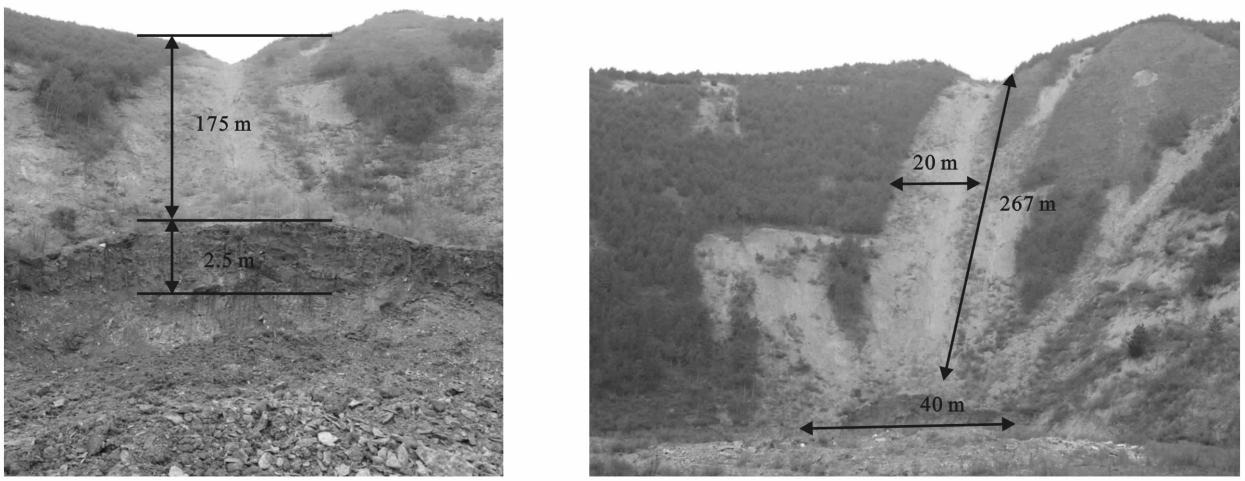


图 3　南峪村滑坡堆积区厚度与范围

从图 4—5 中滑坡在运动过程中各个动力参数和滑坡体面积的变化过程中可以看出,两种流变模型下,各动力参数和滑坡体面积的变化过程保持一致。滑坡体在斜坡运动过程中,平均速度、最大速度(前端速度)、总动能和总势能均是急剧增加,进入水平面后,各个动力参数急剧下降;而最大速度(前端速度)在滑坡体运动至坡脚处,并没有马上减小,出现一个缓慢的增加过程,最大达到 30 m/s,随后快速下降。总的来说,由于侵蚀作用而导致的系统惯性增加,滑坡整体运动的越快,停止的也就越快。

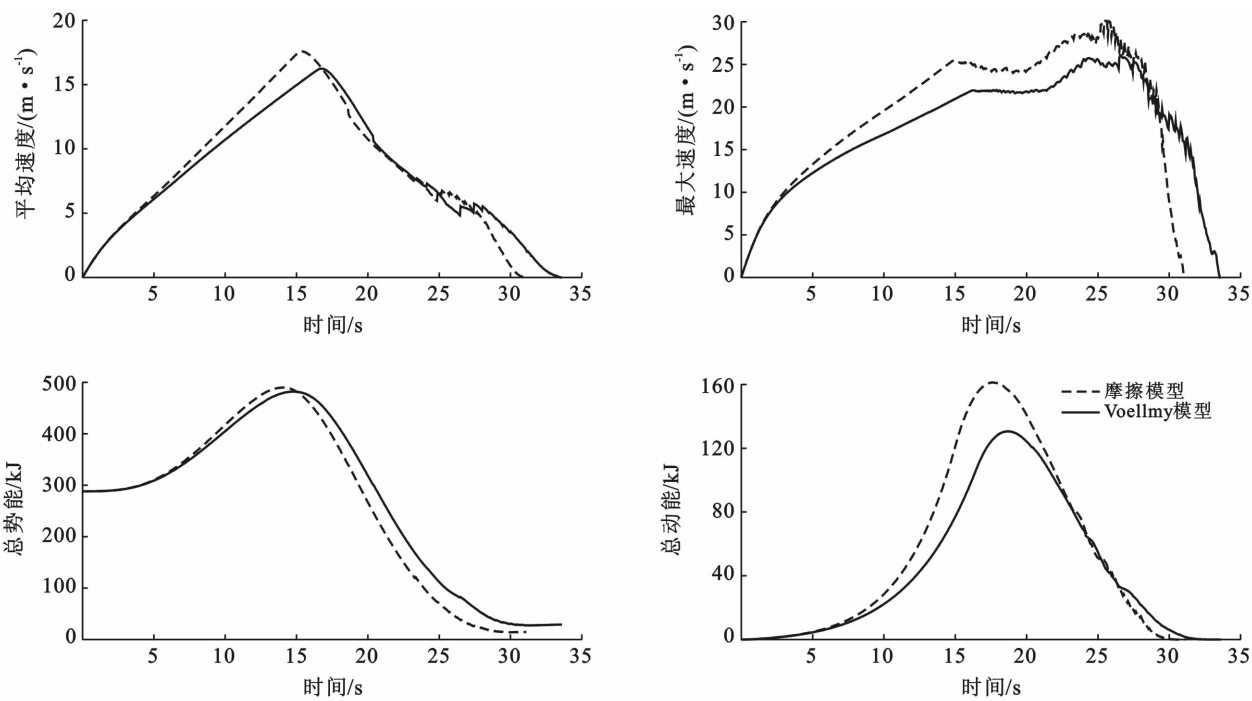


图 4　滑坡动力参数模拟结果

滑坡体体积随时间的变化情况如图 6 所示,从图 6 可以看出,在滑坡体运动过程当中,可以卷走更多的沟床物质,使体积逐渐增加,最终达到 1 200 m^3,与实际情况相符。

总的来说,当滑坡运动到坡脚时,由于运行高度和速度的增加使得滑体体积得到了快速的增加,这可能是大多数坡脚侵蚀严重的一个主要的原因,这也就解释了图 4 中最大速度(前端速度)出现波折的原因;

但在堆积区域由于速度降低侵蚀并不严重，侵蚀速率很低。同时在侵蚀过程中，由于在运动和侵蚀质量间动量传递的过程中出现了能量的损耗，运动的整体速度减慢了。因此，侵蚀作用是滑坡运动中非常重要的不可忽视的一个重要的因素，它使得灾害体质量增加，同时依靠较高的速度(30 m/s)，具有更强的破坏性；这也就解释了该滑坡虽然初始方量不大，但最终直接将房屋摧毁的原因。

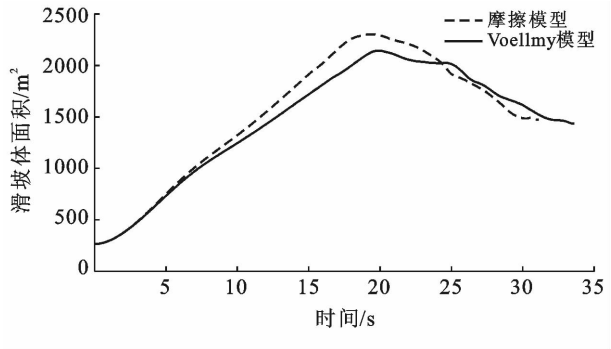


图5 滑坡体面积模拟结果

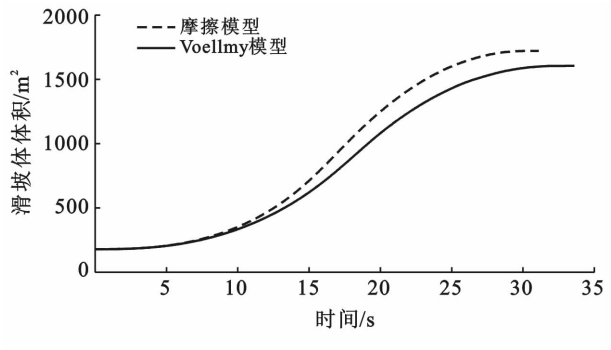


图6 滑坡体体积模拟结果

3 讨论与结论

(1) 受地质环境条件及本次暴雨灾害的影响和制约，“7·25”降雨诱发地质灾害主要分布在暴雨的7县(区)范围，具有普遍性、群发性明显、局地爆发性特征、隐蔽性强、潜在危害大、灾害链模式显著特征。

(2) 降水是引发和加剧此次“7·25”降雨地质灾害的主要因素，灾害发生前期，连续的4次强降雨，具有强度大、范围广等特点，使区内山体岩土体饱和，显著降低了岩土体抗剪强度，并由于“7·22”岷县6.6级地震影响，波及天水，扰动岩土体，降雨与地震的叠加效应明显加剧了此次群发性山洪地质灾害。

(3) 此次群发地质灾害，大部分滑坡基本都位于老滑坡上，底部岩性为变质砂岩，顶部由黄土覆盖，覆盖层厚度约为2 m，滑动面多位于覆盖层与基岩接触面；黄土坡面滑坡通常是窄条状、分布宽度范围、长度均较小，失稳方量不大；大部分滑坡失稳发生在35°～45°坡度范围内，40°坡居多；大部分滑坡失稳的坡面几何形态多为直线型凹型面坡。

(4) 通过三维连续介质动态数值模拟，表明滑坡体在斜坡运动过程中，平均速度、最大速度(前端速度)、总动能和总势能均是急剧增加，进入水平面后，各个动力参数急剧下降；而最大速度(前端速度)在滑坡体运动至坡脚处，并没有马上减小，出现一个缓慢的增加过程，坡脚侵蚀严重，由于侵蚀作用，灾害体的质量急剧增加，对前缘的承灾体造成重大伤害。

[参 考 文 献]

[1] 黄玉华，冯卫，李政国. 陕北延安地区2013年“7·3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J]. 灾害学，2014，29((2)：54-59.

[2] Wang Genlong, Li Tonglu, Xing Xianli, et. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 73(12):7933-7944.

[3] 黄玉华，武文英，冯卫，等. 陕北延安“7·3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征[J]. 西北地质，2014，47(3)：140-146.

[4] 张成航，张建龙，冯立. 四川省都江堰市虹口乡红色村干沟泥石流特征及危险性评价[J]. 西北地质，2014，47(3)：126-132.

[5] 薛强，张茂省，曾庆铭，等. 都江堰市龙池镇麻柳沟泥石流特征及形成条件分析[J]. 西北地质，2014，47(3)：177-184.

[6] 王佳运，张茂省，贾俊，等. 都江堰中兴镇高位滑坡泥石流灾害致灾成因与发展趋势[J]. 西北地质，2014，47(3)：157-164.

[7] 梁京涛，成余粮，王军，等. 2013年7月10日四川省都江堰三溪村五里坡特大滑坡灾害遥感调查及成因机制浅析[J]. 工程地质学报，2014，22(6)：1194-1203.

[8] 于国强，张茂省，胡炜. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. 西北地质，2014，47(3)：185-191.

[9] 郭富赟，孟兴民，黎志恒，等. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J]. 山地学报，2015，33(1)：100-107.

[10] Chen H, Lee, C F. Numerical simulation of debris flows[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1):146-160.

[11] Chen H, Lee C F. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes[J]. Geomorphology, 2003, 51(4):269-288.

[12] Chen H, Dadson S, Chi Y G. Recent rainfall-induced landslides and debris flow in northern Taiwan[J]. Geomorphology, 2006, 77(1): 112-125.

[13] Crosta G B, Chen H, Lee C F. Replay of the1987 Val Pola Landslide, Italian Alps [J]. Geomorphology, 2004, 60(1/2):127-146.

(下转第55页)

4 结 论

(1) 试验地的土壤流失量与降雨量和平均降雨强度的乘积呈一元线性正相关关系,能够很好地拟合。在不考虑影响该试验地水土流失的其他因素的前提下,黄土丘陵区的降雨量和平均降雨强度的乘积越大,土壤流失量越大。

(2) 不同植被防护措施径流量和侵蚀量由大到小为:紫花苜蓿>荒地>油松>沙棘>沙棘+紫花苜蓿>油松+紫花苜蓿。较之人工种植紫花苜蓿,荒地土壤流失量比人工种植紫花苜蓿土壤流失量更少。建议在生产建设项目弃渣场的恢复过程中,应采用人工种植牧草和灌木或乔木混播的方式。

(3) 降雨前土壤含水量对土壤流失有影响。在 0—20 cm 土层土壤水分与土壤径流量和土壤侵蚀量具有显著相关关系,径流量在 20—40 cm 土层与土壤水分相关关系显著,侵蚀量在 20—40 cm 土层有微弱相关关系,与其他土层无相关关系。

[参 考 文 献]

[1] 苏芳莉,范昊明,安晓奇,等.辽宁棕壤区开发建设项目弃土流失特征研究[J].水土保持学报,2011,25(2):63-66.

[2] 储小院,张洪江,王玉杰,等.高速公路建设中不同类型弃土场的土壤流失特征[J].中国水土保持科学,2007,5(2):102-106.

[3] 何凡,尹婧,陈宗伟,等.青海省公路弃土场土壤侵蚀规律天然降雨试验研究[J].水土保持通报,2008,28(2):131-134.

[4] 陈宗伟,江玉林,张洪江,等.青藏高原高速公路建设中弃土场土壤流失特征:以青海平阿高速公路为例[J].水土保持研究,2006,13(6):4-6.

[5] 奚成刚,杨成永.铁路工程施工期路堑边坡面产流产沙规律研究[J].中国环境科学,2002,22(2):174-178.

[6] 高旭彪,黄成志,刘朝晖.开发建设项目水土流失防治模式[J].中国水土保持科学,2007,5(6):93-97.

[7] 卓慕宁,李定强,郑煜基.高速公路弃土场堆积边坡的生态防护试验[J].生态学杂志,2007,26(6):912-916.

[8] 李忠武,蔡强国,吴淑安,等.内昆铁路施工期不同下垫面土壤侵蚀模拟研究[J].水土保持学报,2001,15(2):5-8.

[9] 刘建伟,史东梅,马晓刚,等.弃渣场边坡稳定性特征分析[J].水土保持学报,2007,21(5):192-195.

[10] 董建志,张科利,王颖,等.黄土高原公路弃土场侵蚀规律及其模拟研究[J].水土保持学报,2011,25(2):67-71.

[11] 史东梅.高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究[J].水土保持学报,2006,20(2):5-9.

[12] 周连兄,赵方莹,祝小明.北京山区公路建设生态环境保护及水土流失防治对策[J].中国水土保持,2007(6):46-47.

[13] 黎建强,陈奇伯,王克勤,等.水电站建设项目弃渣场岩土侵蚀研究[J].水土保持研究,2007,14(6):41-43.

[14] 殷健,梁珊珊.城市化对上海市区域降水的影响[J].水文,2010,30(2):66-72.

[15] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究(Ⅲ):关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报,1984,4(2):58-63.

[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] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作措施红壤坡耕地水土流失特征的研究[J].水土保持学报,2001,15(4):66-69.

[18] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J].生态学报,2006,26(11):3847-3853.

(上接第 50 页)

[14] Erlichson H. A mass-change model for the estimation of debris-flow runout, a second discussion: Conditions for the application of the rocket equation[J]. Journal of Geology, 1991,99(4),633-634.

[15] 高克昌,韦方强,崔鹏.降水空间特征与泥石流沟分布的关系[J].北京林业大学学报,2007,29(1):85-89.

[16] 黄润秋,许向宁,唐川.地质环境评价与地质灾害管理[M].北京:科学出版社,2007.

[17] 张茂省,唐亚明.地质灾害风险调查的方法与实践[J].地质通报,2008,27(8):1205-1216.

[18] 唐川.汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J].山地学报,2010,28(3):341-349.

[19] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.

[20] Gray J M, Hutter K. Gravity-driven free surface flow of granular avalanches over complex basal topography [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1999, 455(1985):1841-1874.