

文章编号: 1008-2786-(2015)1-123-06
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000017

勘察加半岛中部的火山泥石流

胡凯衡^{1 2} 马超^{1 2 3} 柳金峰^{1 2} 张少杰^{1 2} Sergey Chernomorets⁴

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia)

摘 要: 勘察加半岛是世界著名的火山区, 与火山相关的熔岩流、碎屑流和泥石流现象非常普遍, 其形成、运动特征以及基本物质组成也与我国暴雨泥石流有很大差别。作者于 2013 年 8 月实地考察了该区中东部 Shiveluch、Klyuchevskoy 和 Tolbachik 三座活火山的泥流、火山碎屑流和熔岩流灾害。通过考察获得的第一手资料, 结合研究区地形、地质、气象等背景信息, 对火山泥石流形成的基本控制条件、物质组成和堆积特征进行了简要介绍和分析, 希望对我国火山泥石流研究有所帮助。

关键词: 火山泥石流; 火山碎屑流; 勘察加; 熔岩流

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

泥石流按照成因大致可分为暴雨泥石流、溃决洪水泥石流、冰川泥石流、冰雪融雪泥石流和火山泥石流等。严格地讲, 火山泥石流仅指与火山喷发有关的泥石流。但是, 一般将和火山现象相关的泥石流笼统地称为火山泥石流。20 世纪以来, 南美的哥伦比亚、北美的美国、加拿大、欧洲的意大利、亚洲的日本、菲律宾、印尼等国家都暴发过灾难性的火山泥石流灾害。比如, 1980 年 5 月, 美国 St. Helens 火山爆发, 造成 57 人死亡, 250 座住宅、47 座桥梁、24 km 铁路和 300 km 高速公路被摧毁^[1]。1985 年 11 月, 哥伦比亚 Nevado del Ruiz 火山喷发引起的火山泥流, 淹埋了距火山口 74 km 的 Armero 镇, 总共造成 23 000 人死亡, 形成的火山泥流、碎屑流流动距离达到 102.6 km^[2]。1991-06-15, 菲律宾的皮纳图博火山泥石流虽然事前做了成功的预警, 但死亡人数还是超过 1 500 人。

火山泥石流(lahar)可分为热的和冷的两类。前者是由热的火山碎屑流、熔岩流或火山涌浪流在

流动的过程碰到大量的地表水而形成, 温度较高。后者是由火山爆发后在山前的堆积物受到大雨或冰雪融水冲刷所形成的, 为常温。与其他类型泥石流相比, 火山泥石流运动速度快(St. Helens 火山泥石流达到 108 km/h), 搬运距离长(Nevado del Ruiz 火山泥石流达到 102.6 km), 规模大(St. Helens 火山泥石流规模达到 $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$)^[1-2]。世界范围内火山泥石流的分布与火山的分布一致, 主要沿环太平洋火山带和地中海-喜马拉雅火山带。我国活火山主要分布在东北、云南、新疆和台湾。据研究, 长白山天池火山 1 000 多年前有过一次大规模的爆发, 引发了大规模的泥石流灾害^[3]。这次火山爆发引发的火山泥石流灾害范围分布广泛。有些学者根据这次事件中火山碎屑物、泥流的分布范围、沉积物层序等来研究火山泥石流^[4-7]。有些学者认为我国现代也发生过火山泥石流^[8]。但是, 我国近期没有发生大规模的火山事件。所以, 在现代火山泥石流观测和研究方面开展的工作不是太多。

收稿日期(Received date): 2014-05-14; 改回日期(Accepted): 2014-06-18。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金中俄(NSFC-RFBR)合作项目(41211120178)和国家自然科学基金面上项目(41371039)。

[This research is supported by Joint Research Project of NSFC-RFBR (Grant No. 41211120178) and General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41371039).]

作者简介(Biography): 胡凯衡(1975-), 男, 江西瑞金人, 研究员, 博士生导师, 主要从事泥石流研究。[Hu Kaiheng (1975-), M, Born in Ruijin County of Jiangxi Province, Major in debris flows.] E-mail: khhu@imde.ac.cn

俄罗斯远东地区的堪察加半岛是世界上最著名的火山地区之一,共有火山 160 多座,其中活火山就有 29 座,如克柳切夫(Klyuchevskoy)火山、卡缅(Kamen)火山、阿瓦钦(Avachinsky)火山、贝兹莫内(Bezymianny)火山、舍维留奇(Shiveluch)火山等。2013 年 8 月,在中国国家自然科学基金和俄罗斯基础研究基金的支持下,作者赴勘察加半岛,分别考察了舍维留奇、克柳切夫和托尔巴奇克(Tolbachik)三座活火山,以及伴随活火山的一系列自然灾害,包括火山泥石流、熔岩流(lava)、火山碎屑流(pyroclastic flow)等。本文根据实地调查获取的信息,结合该地区相关的地质、火山活动资料,对该区的火山泥石流形成条件和特征做简要介绍和分析,希望对我国火山泥石流研究有所借鉴。



图 1 勘察加半岛中部的三大活火山

Fig. 1 Three of the most active volcanos in the central Kamchatka Russia

1 研究区域概况

勘察加半岛位于 $156^{\circ}36'57.24'' \sim 163^{\circ}35'21.07''N$ $57^{\circ}46'48.31'' \sim 54^{\circ}47'10.17''E$,面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。其地形主要受两条横亘半岛的大山脉控制。半岛中部为一古老的圆形荒山带,是由火山喷发形成的岩石构成,最高海拔约 2 000 m。受美洲板块和太平洋板块向下俯冲运动控制,半岛东部发育了规模不一、沿山脉链分布的火山群^[9]。舍维留奇、克柳切夫和托尔巴奇克火山位于勘察加半岛的中东部,东边隔着图姆罗克山与勘察加湾毗邻,西边为中部山脉。克柳切夫最高海拔 4 835 m,是勘察加半岛最高的火山(表 1)。勘察加河由西至

东从舍维留奇火山和克柳切夫火山之间穿过,注入勘察加湾。克柳切夫和托尔巴奇克火山属于克柳切夫火山群(还包括卡缅、贝兹莫内和卡亚布利日尼亚火山),位于勘察加河的南边。舍维留奇火山在克柳切夫北边,位于勘察加河的北岸。两者的构造、活动历史、喷发物有着显著的差异(图 1)。伴随强烈构造活动和频繁的火山运动,该区也是火山泥石流、碎屑流高频发地区^[10]。尤其是火山泥石流规模大、破坏性强,且大部分都与冬季的火山剧烈活动密切相关,很少有实际的观测记录。勘察加中部区域规模最大的几次火山泥石流、碎屑流都是由舍维留奇火山暴发导致^[11-12]。

表 1 三座火山的基本参数

Table 1 Basic parameters of the three volcanos

名称 Name	纬度 Latitude	经度 Longitude	主峰海拔 Peak elevation /m	控制面积 Control area /km ²	体积 Volume /km ³
舍维留奇	56.653°N	161.36°E	3 283	2 100	1 000
克柳切夫	56.057°N	160.638°E	4 835	3 500	5 000
托尔巴奇克	55.83°N	160.33°E	3 682	1 800	—

注:火山控制面积指所有发育于火山体的流域面积之和,体积指整个火山锥的体积。克柳切夫的控制面积和体积包括卡缅、贝兹莫内和卡亚布利日尼亚火山。

2 形成条件

2.1 固体物源

火山泥石流的固体物源主要来自于火山喷发、火山熔岩流、火山碎屑流、岩屑崩落(debris avalanche)等产生的松散物质。此外,山坡沟谷中原有的松散堆积物也可成为火山泥石流的物源。该区火山喷发物产生的物源颗粒比较细、粒径比较均匀,多为火山灰堆积物。熔岩流和岩崩提供的物源颗粒较粗,形状不规则(图 2(a))。火山碎屑流的固体物源则是对火山喷发物、熔岩流等进行了二次搬运,颗粒级配较宽,而且混杂有碳化的木头之类的物质(图 2(b))。在冰川区发育的火山,比如克柳切夫火山,大量的冰碛物也是火山泥石流的物源(图 2(c))。实际上,火山地区的物源是极其丰富的,只要水源条件满足,一般都会发生泥石流。活火山地区的物源量每年不停地增加。比如克柳切夫火山每年给地表输送 $6 \times 10^7 \text{ t}$ 的新鲜物质。舍维留奇 1964 年的一次爆发引发的碎屑流,产生了约 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的松散物质,覆盖了 98 km^2 的面积。2010 年

10月的一次爆发产生了约 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的堆积物,覆盖了 25 km^2 的面积。

2.2 水源

触发火山泥石流的来源有固体水源,比如火山爆发时的冰雪融水、地震引起的冰崩雪崩,也有液态水源,比如火山地区的暴雨、火山周围的冰湖溃决洪水等。如果是高温的火山碎屑流、熔岩流或其他喷发物在流动过程中结合了大量的地表水而形成了泥石流,那么这类泥石流的温度较高,相比其他类型的泥石流,破坏力更大。如果泥石流是由于暴雨、冰湖溃决等引起的水流,冲刷后期冷却了的堆积物而产生的,那么,这类泥石流的温度和当地的气温差不多。从形成过程看,热的火山泥石流需要的水量相对少于冷的火山泥石流。根据当地的气象资料,位于舍维留奇和克柳切夫火山之间、勘察加河畔的克柳奇镇年均降雨在 650 mm 左右,1月、2月、8月和12月降水较多,平均在 $60 \sim 70 \text{ mm/月}$ 。克柳奇镇的海拔为 30 m 左右。在火山的山腰,海拔大约 1000 m 左右的地方,推测降雨也就在 800 mm 左右。虽然降雨较我国西南地区少,但由于松散碎屑物质丰富,且火山物质较轻,颗粒之间的粘聚力较小,加之大量的冰雪融水,因而泥石流也非常容易启动。

2.3 地形

火山地区地形的特点是以火山口为中心,地势向四周逐渐变缓。受其影响,冰川、河流水系也是向四周呈放射状分布。活火山山体有时候抬升降起,有时候发生坍塌,地形变动较快。克柳切夫火山约形成于 6000 a 前^[13],主峰高度现在为 4835 m 。舍维留奇的老火山口海拔为 3283 m ,后来发生坍塌。现在的新活火山口位于老火山口中,海拔大约 2600 m 。地形坡降从主火山口向四周逐渐降低。克柳切夫主峰最陡为 56% ,中山坡为 25% ,山麓为 8% ,最后是非常平缓的山前的冲积平原(图3)。对于破火山口,位于破缺口一边的山坡发生泥石流较多。舍维留奇是一个破火山口,西南侧破缺,东北边保留了一半的老火山口。近期以来发生的火山碎屑流和泥石流大部分都是在西南侧山坡。山麓前水系散乱,主要受火山隆起、冰川、熔岩丘和侧火山丘的影响,变动很大,经常分分合合。这些微地貌的变化对泥石流的流路和堆积具有重要的影响。从扩展的范围来看,泥石流从源地开始呈扇形逐渐扩散,开始坡度较陡,流速非常快,物质相对集中,流动断面较窄,到了山前平原,坡度平缓,速度下降,四处漫流,形成巨

大的堆积扇(图4)。

3 碎屑物质组成

以舍维留奇火山脚的火山泥流、碎屑流以及我国云南东川蒋家沟泥石流颗粒组成进行比较,火山泥流、碎屑流中固体颗粒主要以细颗粒为主,且颗粒的模棱度较好。从火山泥流堆积物样品分析得到:火山泥流浆体部分颗粒粒径都 $< 2 \text{ mm}$,近 72% 的颗粒粒径 $< 0.2 \text{ mm}$,颗粒级配曲线上表现出一条光滑的“S”型曲线,颗粒组成相对较均匀(图5)。火山碎屑流由于直接由火山喷发出的碎屑、气体转化而来,其 $< 2 \text{ mm}$ 的颗粒占总重约 60% ,大部分的颗粒粒径 $< 2 \text{ cm}$ 。因此,火山泥流、碎屑流中细颗粒占绝大部分。另外,根据泥流和碎屑流中岩石颗粒的密度分析发现,这些细小碎块岩石的密度 $< 1.5 \text{ kg/m}^3$,从火山口喷发出来的岩石密度与水密度接近(表2)。与我国暴雨泥石流特性相比,火山泥石流和碎屑流的密度要小。由于火山泥流固体颗粒密度小,内部孔隙度大,且细颗粒含量占绝大部分,整体重度不是很高。内部粗颗粒物质主要以悬移形式运动,消耗水动能。

4 堆积特征

火山泥流有冷热之分,尤其是因火山暴发导致冰雪融水形成的火山泥流中携带大量的冰、雪块体从而增加了其搬运能力。在其流通区、堆积区上,也表现出这样的特征:1. 流通区内沟道冲刷作用主要以后期的流水控制,火山泥流本身对沟道两侧冲刷影响不大;2. 冷火山泥流堆积扇区没有热火山泥石流堆积扇上具有的大量的近圆形地陷和隆起(图6),且搬运能力也不比热火山泥流强。火山泥流运动路径以及堆积扇上的地陷主要是由于火山泥流停止运动后,内部的冰雪消融导致;而大部分的火山泥流都是在冬季暴发,当内部的积水来不及运移在火山泥流内部冻结成冰,体积膨胀,导致局部地区形成隆起。当气温升高,内部冰块融化后形成洞穴,上覆颗粒物质失去底部支撑后,在地表面形成近似平行和环状裂缝;3. 在冷火山泥石流表面大部分的岩石碎块直径介于 $0.05 \sim 0.5 \text{ m}$,颗粒间孔隙度较小,沉积物较热火山泥流要密实。而热火山泥流所搬运的岩块最大直径可达到 2 m ,因局部隆起、地陷、内部空隙大,沉积物在冰雪消融后内部结构非常松散。另



图 2 三种类型的物源

(a. 托尔巴奇克熔岩流堆积物; b. 舍维留奇 2010 年火山碎屑流堆积物; c. 克柳切夫 Ehrman 冰川堆积物)

Fig. 2 Three kinds of debris supplies

(a. lava deposition of Tolbachik; b. pyroclastic flow deposition of Shiveluch in 2010;
c. glacial deposition of Ehrman glacier in Klyuchevskoy)

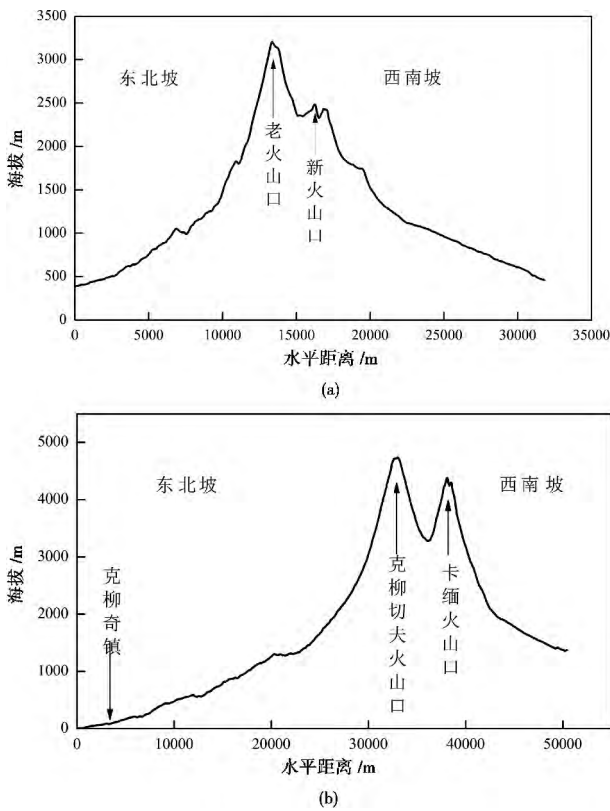


图 3 舍维留奇

(a) 和克柳切夫火山(b) 沿东北 - 西南方向的剖面图

Fig. 3 NE - SW topographic profiles of Shiveluch

(a) and Klyuchevskoy (b)

外 火山泥流沉积物剖面上无环状、垄状堆积 ,表现出非常明显的分层和“石背石”现象。且运动路径上的泥痕仅仅 0.5 m。

5 结 论

火山泥石流是与火山现象相关的一类泥石流 在



图 4 克柳切夫山前宽阔的泥石流泛滥平原

Fig. 4 Wide piedmont alluvial plain of Klyuchevskoy

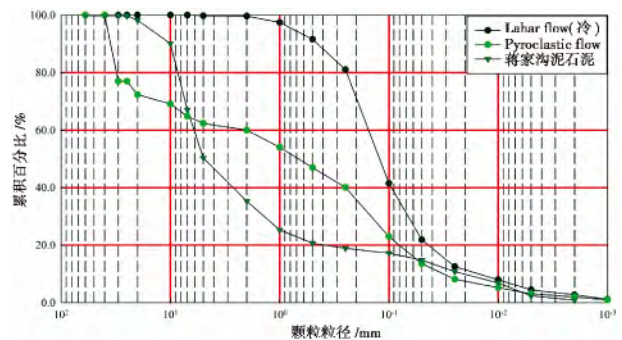


图 5 舍维留奇火山脚泥流、碎屑流与我国蒋家沟
泥石流颗粒级配对比

Fig. 5 The particle grain size curve of lahar pyroclastic flow in Kabeku river downhill of southern part of Shiveluch Volcano ,Kamchatka ,Russia and debris flows in Jiangjia Ravine Yunnan Province ,Southern China

我国研究得相对较少。研究火山碎屑流、火山泥流的运动、侵蚀搬运和堆积规律对丰富泥石流学科自身具有重要的科学意义。本文通过对俄罗斯勘察加

表 2 火山泥流、碎屑流、泥石流物理特征对照

Table 2 Comparison of physical parameters among lahar pyroclastic flow and debris flows

名称 Name	固体颗粒密度 Solid particle density /(t/m ³)	组成 Composition	<0.2 mm 颗粒含量 Particle content	<2 mm 颗粒含量 Particle content	<2 cm 颗粒含量 Particle content	形成条件 Formation conditions
火山泥流	1.0 ~ 1.4	熔岩、雪块、火山碎屑物、冰雪融水	72%	100%	100%	火山喷发高温气浪、碎屑物，火山暴发致大面积冰雪融化
火山碎屑流	1.0 ~ 1.4	高温气浪、火山碎屑物	38%	59%	70%	火山喷发高温气体和碎屑物 (>400 °C)
喷发熔岩	≈1.0		—	—	—	—
蒋家沟泥石流	2.6 ~ 2.7	水、石、土、少量气体	11.5%	37.8%	71.8%	充足松散物源、水和陡峻地形

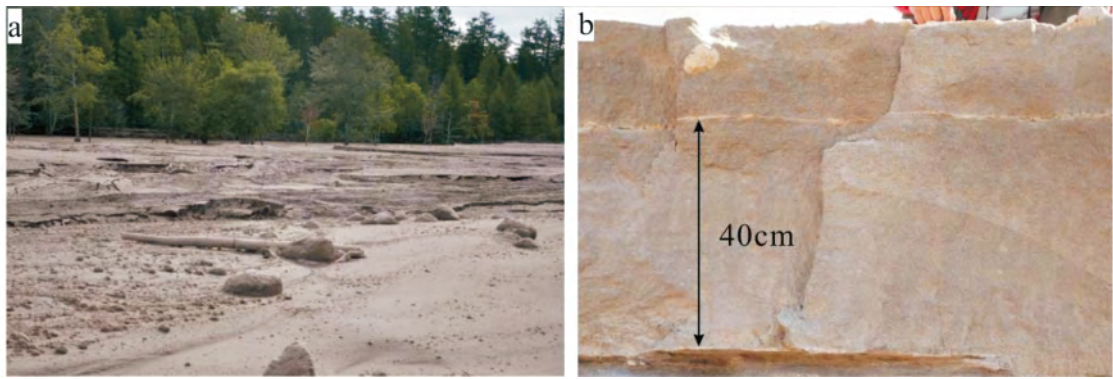


图 6 舍维留奇火山脚 Kabeku 河中游、下游不同的火山泥流堆积地貌
(a. 中游热火山泥流堆积区的地陷和隆起; b. 下游冷火山泥流堆积物(取样点)) 。

Fig. 6 The topographic features of deposition area of lahar flow in middle and downstream of Kabeku River southern part of Shiveluch volcano
(a. small caves and apophysis in middle stream; b. cold lahar flow in downstream and sampling site)

半岛中部三座活火山的现场考察 , 对该地区火山泥石流的形成、堆积和颗粒组成进行了初步分析 , 并与我国典型的暴雨型泥石流做了比较。主要得到如下结论:

1. 火山泥石流的固体物源、水源和地形条件与一般类型的泥石流有显著差别。火山泥石流的固体物源主要来自于火山喷发、熔岩流、碎屑流和岩崩等产生的松散物。固体物源量随火山喷发逐渐增加 , 相对于泥石流的搬运能力来说几乎是无限供给 , 固体物源不是控制因素 , 其发生与否主要受水源条件的控制。火山地区地形变动较快 , 泥石流的能量条件、运动路径和堆积区域也容易发生变化。
2. 火山泥石流浆体近 72% 的颗粒粒径 < 0. 2 mm。与我国典型暴雨泥石流相比 , 火山泥石流和碎屑流的密度要小。火山泥石流内粗颗粒物质主要以悬移形式运动。
3. 冷和热两种类型的火山泥石流堆积形态有显著差别。冷火山泥石流表面大部分的岩石碎块直径

和孔隙度较小 , 沉积物较热火山泥流密实。而热火山泥流所搬运的岩块最大直径可达到 2 m , 内部空隙大。沉积物内部结构松散。

参考文献(References)

[1] Pierson T C. Initiation and flow behavior of the 1980 Pine creek and Muddy River Lahars , Mount St. Helens Washington [J]. Geological Society of America Bulletin , 1985 , 96: 1056 – 1069

[2] Pierson T C , Janda R J , Thouret J C et al. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz , Colombia and consequent mobilization , flow and deposition of lahars [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research , 1990 , 41(1) , 17 – 66

[3] Liu Xiang. Tectonic control of Cenozoic volcanism in northeastern China [J]. Global Geology , 1999 , 18(2) 23 – 29 [刘祥. 中国东北地区新生代火山活动构造控制及火山灾害 [J]. 世界地质 , 1999 , 18(2) 23 – 29]

[4] Liu Xiang , Sui Weiguo , Wang Xikui. Lahar deposits of 1000a B. P. eruption at Changbaishan volcano and their hazards [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology , 2000 , 30(1) : 14 – 17 [刘祥 , 隋维国 , 王锡魁. 长白山火山 1000 年前火山泥流堆

- 积及其灾害[J]. 长春科技大学学报; 2000, 30(1): 14–17]
- [5] Liu Xiang. Sequence and distribution of the pyroclastic deposits of the greatest eruption of Changbaishan Volcano during the period of history [J]. Journal of Jilin University: Earth Sciences, 2006, 36(3): 313–318 [刘祥. 长白山火山历史上最大火山爆发火山碎屑物层序与分布[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 313–318]
- [6] Wan Yuan, Xu Jiandong, Lin Xudong, et al. Analysis to the lahars extent in Changbai Mountains by numerical simulations [J]. Journal of Jilin University: Earth Sciences, 2011, 45(5): 1638–1645 [万园, 许建东, 林旭东, 潘波. 基于数值模拟的长白山天池火山泥石流灾害展布范围分析及预测[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 45(5): 1638–1645]
- [7] Sheng Jian, Lv Han, Wang Yumeng. Grain-size distribution and structural dimension of Tianchi Volcano lahar deposits in Changbai Mountain region [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4): 132–138 [盛俭, 吕晗, 王禹萌. 长白山天池火山泥石流堆积物粒度分布及其结构维数[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 132–138]
- [8] Lü Ruren. Was there a presence of Modern Volcano lahars in China? [J]. Advance in Earth Science, 1988, 3(5): 50–52 [吕儒仁. 中国有无现代火山泥石流? [J]. 地球科学信息, 1988, 3(5): 50–52]
- [9] Waltham T. A guide to the volcanoes of southern Kamchatka, Russia [Z]. Proceedings of the Geologist's Association, 2001, 12, 67–78
- [10] Chernomorets S S, Seynova I B. Debris flows on Volcanoes [M]. Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow: ESCPHSE, 2010. (In Russia)
- [11] Belousov A, Belousova M, Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia [J]. Bull. Volcanol., 1999, 61: 324–342
- [12] Belousov A. The Shiveluch volcanic eruption of 12 November 1994—explosive eruption provoked by failure of the edifice [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research [J]. 1995, 66: 357–365
- [13] Ponomareva V, Kyle P, Pevzner M, et al. Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia [G] // Eichelberger J, Gordeev E, Izbekov P, et al. Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2013: 263–282

Lahars in Central Kamchatka Peninsula, Far Eastern Russia

HU Kaiheng^{1, 2}, MA Chao^{1, 2, 3}, LIU Jinfeng^{1, 2}, ZHANG Shaojie^{1, 2}, Sergey Chernomorets⁴

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia)

Abstract: Kamchatka Peninsula is famous for its widespread volcano groups. Typical hazards related to active volcanoes, such as lava, pyroclastic flow and lahar are also common in this region and exhibit distinctive features in initiation, motion, grain fraction from rainfall-triggered debris flows in China. Field investigations of three active volcanoes (Shiveluch, Klyuchevskoy and Tolbachik) were carried by Sino–Russia scientists in August 2013. Based on the survey data and background conditions of lahars such as topographic, geologic and morphologic settings, the formation factors, grain fraction and deposition of lahars were examined roughly and compared with typical rainfall-triggered debris flows in China. The basic conclusions in this paper are useful for promoting the research on lahars, pyroclastic flows etc., in China.

Key words: lahar; pyroclastic flow; Kamchatka; lava; eastern Russia