基于 Google Earth 影像的横断山区沟蚀及侵蚀沟类型调查研究

董一帆，聂 勇，熊东红

（中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所，山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041）

摘 要：[目的] 探讨横断山区侵蚀沟的类型、分布特征及影响因素，为研究沟蚀对横断山区土壤侵蚀及土地退化的影响提供依据。[方法] 基于 Google Earth 高清影像结合 GIS 的方法，基于可见性的基本原则，对横断山区开展侵蚀沟的抽样调查。共布设调查单元 2 242 个，每个单元尺寸 1 km×1 km。[结果] 共有 571 个调查单元发现有侵蚀沟分布，占调查单元总数的 25.5%，平均沟壑密度为 2.20 km/km^2。沟蚀在海拔低于<1 500 m 的区域发育显著，沟壑密度随坡度增加而增长，与年降雨相关性较弱。草地是沟蚀发育的主要土地利用类型，燥红土的沟蚀分布率及平均沟壑密度显著高于其他土壤类型。通过总结国内外现有的侵蚀沟分类体系及其异同，结合调查结果，判定该次调查的横断山区侵蚀沟类型主要为切沟和冲沟（包括有泥石流事件的冲沟）。[结论] 横断山区切沟和冲沟分布广泛，发育强烈，其分布受海拔、坡度、土地利用及土壤类型等因素的影响较为显著。

关键词：切（冲）沟；Google Earth；横断山区；泥石流

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)03-0151-07 **中图分类号**：S157.1

文献参数：董一帆，聂勇，熊东红. 基于 Google Earth 影像的横断山区沟蚀及侵蚀沟类型调查研究[J]. 水土保持通报，2018，38(3)：151-157. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.024. Dong Yifan, Nie Yong, Xiong Donghong. Investigation of gully density and classification of Hengduan Mountainous area based on google earth images[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 151-157.

Investigation of Gully Density and Classification of Hengduan Mountainous Area Based on Google Earth Images

DONG Yifan, NIE Yong, XIONG Donghong

(*Key Laboratory of Mountain Hazards & Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: [Objective] To explore the classification, distribution and influencing factors of gullies in Hengduan Mountainous area, in order to provide a basis for the study of influences of gully erosion on soil erosion and land degradation processes in this area. [Methods] The high-resolution images available on Google Earth combined with GIS software were applied to investigate the gully density in Hengduan mountainous area according to the visibility principle. Totally, 2 242 quadrats with the same size of 1 km×1 km were set randomly in the region. [Results] The gullies were observed in 571 quadrats, which accounted for 25.5% of the total quadrats, and the average density was 2.20 km/km^2. Gully erosion was intensive at the low mountain regions(elevation<1 500 m), and the gully density increased with the increasing slope gradient. The relationship between gully density and annual precipitation was quite weak. Grassland was the main land use type for gully development, and gully erosion in the dry red soil region was more intensive than other soil species. According to the domestic and international gully classification systems, the gullies observed in this study were mainly classified as permanent gully (including gullies with debris flow events). [Conclusion]

收稿日期：2017-11-24 **修回日期**：2018-01-05

资助项目：国家重点基础研究发展计划“973”课题“横断山地水土作用失衡机制与灾害风险评价”(2015CB452704)；国家自然科学基金面上项目(41671288)；水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101-001)

第一作者：董一帆(1983—)，男(汉族)，四川省成都市人，博士，助理研究员，主要从事沟蚀分布、发育过程及机理研究。E-mail：tommy@imde.ac.cn。

The permanent gullies were widely distributed and intensively developed in Hengduan Mountainous area, which were clearly influenced by elevation, slope, land use and soil species.

Keywords: permanent gully, Google Earth, Hengduan Mountains area, debris flow

沟蚀是土壤侵蚀的主要类型之一,在水土流失过程中占有重要的地位。侵蚀沟的发育会引起区域土壤质量严重退化,破坏土地景观格局;同时,侵蚀沟还是区域泥沙的重要来源,其产沙贡献往往可以达到流域产沙总量的1/2以上[1-2]。目前,国内土壤侵蚀学领域依据侵蚀沟的发展阶段、侵蚀强度、空间规模及所处地貌部位等因素,建立了由细沟→浅沟→切沟→冲沟[3-4]的现代侵蚀沟分类体系;国际上对侵蚀沟也形成了由rill→ephemeral gully→permanent gully的划分方法[1]。对比中国与国际的侵蚀沟分类,二者之间既有相似之处,也存在一定差异。

细沟与rill相对应,是侵蚀沟发育的初始阶段,以股流(concentrated flow)为主要的侵蚀动力,与浅/切沟(rill和gully)的划分标准主要依据横截面积(小于929 cm^2 的为细沟)来确定[4]。浅沟与国外的ephemeral gully概念相对应[2],往往有规律的分布在无明显边界的槽形地(集流槽)底部[3],可以通过横过耕作的形式进行消除,但往往在同一部位会反复发育[1,5]。国内的侵蚀沟分类体系中,浅沟进一步发育成为切沟,而切沟进一步发育形成冲沟[4,6],但在国外则将切沟和冲沟统称为permanent gully,并未做进一步的详细区分[1]。原因有两点,其一,切沟和冲沟均属于现代侵蚀范畴,都存在溯源侵蚀、沟道下切和沟坡扩展等典型过程[4];其二,中国的侵蚀沟分类研究起源于黄土高原[5-6],由于黄土高原独特的沟谷地、沟间地地貌特征,切沟和冲沟发育的地貌部位及继承性、空间规模等均存在显著差异[6];而国际上对侵蚀沟发育的地貌部位考虑较为笼统,主要分为坡面沟(hillslope gully)和谷底沟(valley floor gully)[7]。在黄土高原地区还有干沟、河沟等更大规模的沟道类别划分[3,6],而国外则往往用entrenched channel或(small)river等词汇进行表述[1,7],但这些名词与干沟、河沟并不存在严格对应的关系,且与permanent gully的划分并没有清晰的空间尺寸标准[1]。土壤侵蚀研究领域的侵蚀沟(gully)属于现代侵蚀[6],强调在原有坡面下切形成沟道这一"从无到有"的侵蚀过程;而形成于地质历史时期,沟道形态相对较稳定,没有显著的侵蚀痕迹,以物质搬运为主的沟(河)道[8]不在本次调查的范围之内。

中国横断山区面积约 5.00×10^5 km^2,地处藏东、川西及滇西北地区[9]。区域内沟谷纵横,地形陡峭,侵蚀沟发育十分显著。然而,由于该区域面积广大,高山林立,海拔超过4 000 m的高山、极高山分布广泛,监测难度大,前期横断山区的沟蚀研究主要集中于若干个典型区域(如西南干热河谷地区等),而对横断山区整体的侵蚀沟现状研究鲜有报道。同时,由于横断山区构造活动强烈,地貌外营力存在显著的垂直分异[10],区域侵蚀沟的物质组成、侵蚀搬运过程及侵蚀营力等要素,与黄土高原、东北黑土区、南方崩岗区等其他主要沟蚀区域存在显著差异。基于不同技术手段(航空、卫星、无人机等)获取的遥感影像,提取侵蚀沟的空间分布及形态特征,是侵蚀沟数据获取的一种重要方法[11]。然而,由于影像获取成本及分辨率等因素的限制,该方法往往无法应用于在大区域尺度上的侵蚀沟调查。近年来,随着Google Earth技术的成熟,以及Google日益增长的免费高清影像的全球覆盖度,为侵蚀沟的调查提供了全新的数据来源[11],也为区域尺度上的侵蚀沟空间分布及影响因素研究提供了基础资料。

鉴于此,本研究拟基于以Google Earth为主的遥感影像,结合GIS软件的数据处理方法,对横断山区侵蚀沟沟壑密度进行了抽样调查;利用区域地形地貌、降雨、土地覆被、土地利用及土壤类型等环境背景资料,分析横断山区侵蚀沟的分布特征及主要影响因素,探讨横断山区侵蚀沟的主要类型及其与传统侵蚀沟的差异,为横断山区沟蚀引发的土壤侵蚀及土地退化等问题进行初步的探索。

1 材料与方法

1.1 侵蚀沟提取方法及局限

本次研究的横断山区西起澜沧江上游—高黎贡山一线,东至岷山—邛崃山—大小凉山,北至石渠—若尔盖—九寨沟一线,南至腾冲—楚雄—昆明一线,面积 4.35×10^5 km^2。区域内包括了宁静山、云岭、沙鲁里山、大雪山等山脉,及金沙江、澜沧江、怒江等大河及支流[10]。针对研究区范围,按大约0.5%的抽样面积,随机布设调查单元2 242个,调查单元尺寸为1 km×1 km,利用Google Earth结合高清遥感影像,开展侵蚀沟调查。

调查工作于2016年7月启动,至2017年4月完成,共分3个主要步骤。首先对2 242个调查单元进行全面筛查,将调查单元中城镇、水体、冰雪覆盖面积

超过 30%的调查单元在邻近区域进行位置重置,确定调查单元的所在位置;第二步,判别调查单元内是否有活跃的侵蚀沟发育,筛选出符合标准的沟蚀调查单元;最后,利用 Google Earth 中"添加路径"工具,对沟蚀单元内侵蚀沟的长度进行勾画提取,提取结果导入 ArcGIS 10.0 计算侵蚀沟长度、条数等参数。

由于技术条件限制,目前基于影像的侵蚀沟自动提取技术还有待进一步发展[12],因此本次调查是基于人工判读和提取。为控制调查质量,避免人为误差,首先基于侵蚀沟定义分析及专家论证,制定侵蚀沟判别标准,依据判定标准进行沟蚀单元的筛选;第二步,选择有侵蚀沟研究经验的人员,基于沟蚀单元的筛选结果进行侵蚀沟信息提取,在提取前随机筛选 5 个沟蚀单元,让所有参与人员进行侵蚀沟提取,逐一对比调查结果,进一步统一侵蚀沟的提取标准,确保不同人员对同一调查单元的结果误差小于 5%;最后进行所有单元的侵蚀沟提取;并由一位专家对提取结果进行全面筛查,确定最终的调查结果。

调查遵从侵蚀沟在影像的可见性原则,包括两个层面:一是侵蚀沟形态指标需显著高于影像像元分辨率,Google Earth 影像最高分辨率达 0.3 m,次一等级为 0.6 m,而在一些缺乏 Google Earth 高清影像的区域用 IKONOS(分辨率 1.0 m),SPOT(2.5 m)等其他影像代替;基于影像分辨率,本次只调查了长度大于 5 m 的侵蚀沟(至少 2 个像元);同理,由于许多侵蚀沟宽度<5 m,且沟缘线在遥感影像上并不能清晰判别,人工调查会引入较大误差,因此本次调查未统计侵蚀沟的宽度、面积等参数。第二,侵蚀沟在影像上必须直接可见,如果侵蚀沟被其他地物如植被、冰雪等覆盖或因光线条件不佳无法清晰判读时,则不予统计。

1.2　横断山区环境背景数据的选择

为探索侵蚀沟的空间分布规律及机制,本研究搜集了与沟蚀相关的区域背景参数。区域的数字高程模型(DEM)采用了 SRTM 3(90 m 分辨率)的数据,该数据也是 Google Earth 的高程数据源,坡度由 DEM 生成。基于 DEM,横断山区海拔超过 3 500 m 的面积占区域总面积的 1/2 以上,而目研究区内的气象站点,90%以上都位于 3 500 m 以下的区域。因此本研究的降雨数据选择 TRMM 3B43,其空间分辨率为 0.25°×0.25°,依据前期研究,基于 TRMM 获取的年降水数据与气象站观测结果相关系数(r^2)超过 0.86,在横断山高海拔地区降水量的分布研究方面有着很好的前景[13]。土地利用数据主要参考中国科学院地理科学与资源研究所制作的 2005 年全国土地利用栅格数据(100 m 分辨率),数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn)。土壤类型数据主要参考中国科学院资源环境科学数据中心提供的全国 1∶100万土壤类型数据,植被数据主要参考 1998—2008 年该区域的 NDVI 数据(1 km 分辨率)。

2　结果与分析

2.1　横断山区沟壑密度及分布规律

调查过程中,首先对遥感影像进行判读,筛选出 571 个有侵蚀沟发育的调查单元,占调查单元总数的 25.5%;基于 ArcGIS 10.0 对侵蚀沟的长度、条数等参数进行提取,结果显示,571 个沟蚀样方平均沟壑密度为 2.20 km/km^2,平均侵蚀沟条数 20.36 条/km^2,依据现有沟蚀分级标准[14]属于中度侵蚀范畴。侵蚀强度达到中度及以上的比例接近 50%,其中最大值为 18.96 km/km^2(表 1)。

表 1　横断山区侵蚀沟调查结果

沟壑密度/(km·km^{-2})	强度分级	单元数/个	单元占比/%	沟壑密度/(km·km^{-2})			沟壑数量/条		
				均值	中值	标准差	均值	中值	标准差
<1	微度	217	38.0	0.51	0.50	0.27	6.65	5.00	5.78
1～2	轻度	135	23.6	1.45	1.46	0.29	12.54	10.00	7.68
2～3	中度	88	15.4	2.47	2.50	0.26	21.14	18.50	11.69
3～5	强烈	71	12.4	3.87	3.75	0.54	29.65	29.00	14.81
5～7	极强烈	36	6.3	5.77	5.77	0.58	48.06	39.00	32.65
>7	剧烈	24	4.2	10.38	9.61	2.99	116.38	80.00	100.22
合 计	—	571	100.0	2.20	1.46	2.38	20.36	11.00	32.84

注:由于现有沟蚀分级标准[14]中没有<1 km/km^2 的分类及名称,统计中将这一等级暂命名为"微度"。

由于可见性原则的限制,本研究的调查方法存在一定的局限性。首先,由于横断山区地域广阔,无法获取统一时相的调查影像,为减小误差,本次调查主要选取 2010—2015 年的影像,以缩小时间差异。其

次，由于可见性原则的限制，部分小规模的侵蚀沟，以及因林草、冰雪覆盖，或因光线、云量等环境条件的限制，会导致部分侵蚀沟无法判读，因此基于现有方法获取的调查结果，相对于真实的侵蚀沟沟壑密度值会有一定程度的偏低。

2.1.1 高程与坡度 沟蚀单元最高海拔4 959 m，最低海拔633 m。依据不同高程梯度来看，沟蚀单元在高山（海拔3 500～5 500 m）的区域分布数量最多，其次为中山（海拔1 500～2 500 m）及高中山区域（海拔2 500～3 500 m）。但沟蚀单元的分布率来看，低山中低山（海拔＜1 500 m）是沟蚀分布比例最高的区域，其面积仅占横断山区总面积的3.1%，而沟蚀单元占比高达13.5%；同时其平均沟壑密度高达3.94 km/km^2，中值为2.98 km/km^2，显著高于其他区域（表2）。

表2 不同海拔梯度的沟蚀单元分布及沟壑密度

高程/m	单元数/个	单元占比/%	面积占比/%	沟壑密度/(km·km^{-2})		
				均值	标准差	中值
＜1 500	77	13.5	3.1	3.94	3.43	2.98
1 500～2 500	116	20.3	23.9	2.08	2.32	1.22
2 500～3500	112	19.6	22.9	2.01	1.98	1.55
3 500～5 500	261	46.6	50.1	1.83	1.95	1.32

注：分级综合参考山地类型划分及气候地貌特征带划分[15]。

沟蚀单元主要分布在25°～35°以及15°～25°分布数量最多，分别为160和155个，在＞35°的区域分布也超过100个。对比单元占比和面积占比看，除了＜5°的区域，单元占比显著低于面积占比，其余区域二者差异不大，显示沟蚀单元在不同坡度的分布率基本一致。从沟壑密度的均值及中值来看，均随着坡度增加逐步上升，＞35°的区域沟壑密度的均值及中值最高，分别达到2.70和1.88 km/km^2（表3）。基于相关分析，单元沟壑密度与高程及坡度的相关系数（r^2）分别只有0.01和0.05（n=571），但显著性均达到了0.01水平。

表3 不同坡度梯度的沟蚀单元分布及沟壑密度

坡度/(°)	单元数/个	单元占比/%	面积占比/%	沟壑密度/(km·km^{-2})		
				均值	标准差	中值
＜5	10	1.8	5.0	1.02	0.95	0.64
5～8	25	4.4	4.1	1.69	1.98	1.11
8～15	93	16.3	15.0	1.94	2.47	1.26
15～25	155	27.1	28.1	2.09	2.41	1.28
25～35	160	28.0	27.7	2.22	2.21	1.63
＞35	128	22.4	20.2	2.70	2.57	1.88

注：坡度分类参考《土壤侵蚀分类分级标准 SL 190-2007》[14]

2.1.2 降雨与植被因素 沟蚀单元所在区域，年降雨量最小值为477.4 mm，最大值为1 444.4 mm，平均降雨量780.7 mm，总体高于黄土高原、东北黑土区等中国其他主要沟蚀区域；相对的，沟蚀单元NDVI值的范围则在0.06～0.54，平均值为0.32。沟壑密度与年均降雨量呈微弱的指数负相关关系，r^2仅有0.03（sig.＝0.000，n=571）；沟壑密度与NDVI也呈指数负相关关系，但r^2也仅有0.10（sig.＝0.000，n=571）。

降水量是土壤侵蚀的重要驱动力，但在本研究中与沟壑密度的关系非常微弱，主要原因有以下几方面：①在区域尺度上，降水不仅影响侵蚀沟发育，同时还反映一个地区的自然环境条件。以植被为例，前人研究表明，横断山区的NDVI变化主要驱动力为降水[16]，而本研究中，沟蚀单元的年降水量也与NDVI呈显著正相关关系（r^2＝0.15，sig.＝0.000，n=571），这反映出在横断山区，降水条件优越的地区往往易于植被生长，而植被对土壤侵蚀有显著的抑制作用。本研究中，年降雨量＞1 200 mm的沟蚀单元仅有7个，平均沟壑密度只有0.67 km/km^2，远远小于区域平均的沟壑密度；②降雨并非横断山区唯一的沟蚀驱动力，横断山区高山、极高山区域（海拔＞3 500 m）的面积占比为超过50%（表2），冻融侵蚀分布广泛，坡度＞15°的区域面积占比高达77.6%（表3），重力侵蚀的作用同样显著，进而显著影响降雨与沟蚀间的相关性；③沟蚀的发育受单次极端降雨影

响非常显著,而本研究使用的 TRMM 降水数据时间为月尺度,无法反映极端次降雨对沟蚀的影响;此外,决定侵蚀沟水动力条件的主要因素除了降水还有侵蚀沟上游的汇水面积,然而本研究采取的等面积调查单元提取方法无法保证汇水面积的完整性,且基于区域尺度的 DEM 精度也无法满足对侵蚀沟汇水面积的准确提取,因此单纯基于降雨与沟壑密度建立关系效果并不理想。

2.1.3　土地利用与土壤类型　从土地利用的Ⅰ级分类看,草地是侵蚀沟发育的主要土地利用类型,对应侵蚀沟的单元占比达到 65.3%(共 377 个沟蚀单元),远高于草地在横断山区的面积占比 42.0%;其次为林地和耕地,其单元占比分别为 23.6%和 9.4%。从Ⅱ级分类看,沟蚀单元主要分布为:高寒草甸(166 个)、草甸草地(80 个)、典型草地(76 个)、灌丛(65 个)、灌丛草地(51 个)、旱地(48 个)和常绿针叶林(45 个);从平均沟壑密度看,则是典型草地(3.21 km/km^2)>草甸草地(3.10 km/km^2)>灌丛草地(2.31 km/km^2)>灌丛(1.95 km/km^2)>旱地(1.86 km/km^2)>高寒草甸(1.68 km/km^2)>常绿针叶林(1.36 km/km^2)。高寒草甸的沟蚀单元虽然数量最多,但平均沟壑密度明显偏低,这与横断山区海拔较高,冻融侵蚀分布广泛,但侵蚀动力相对较弱有关。

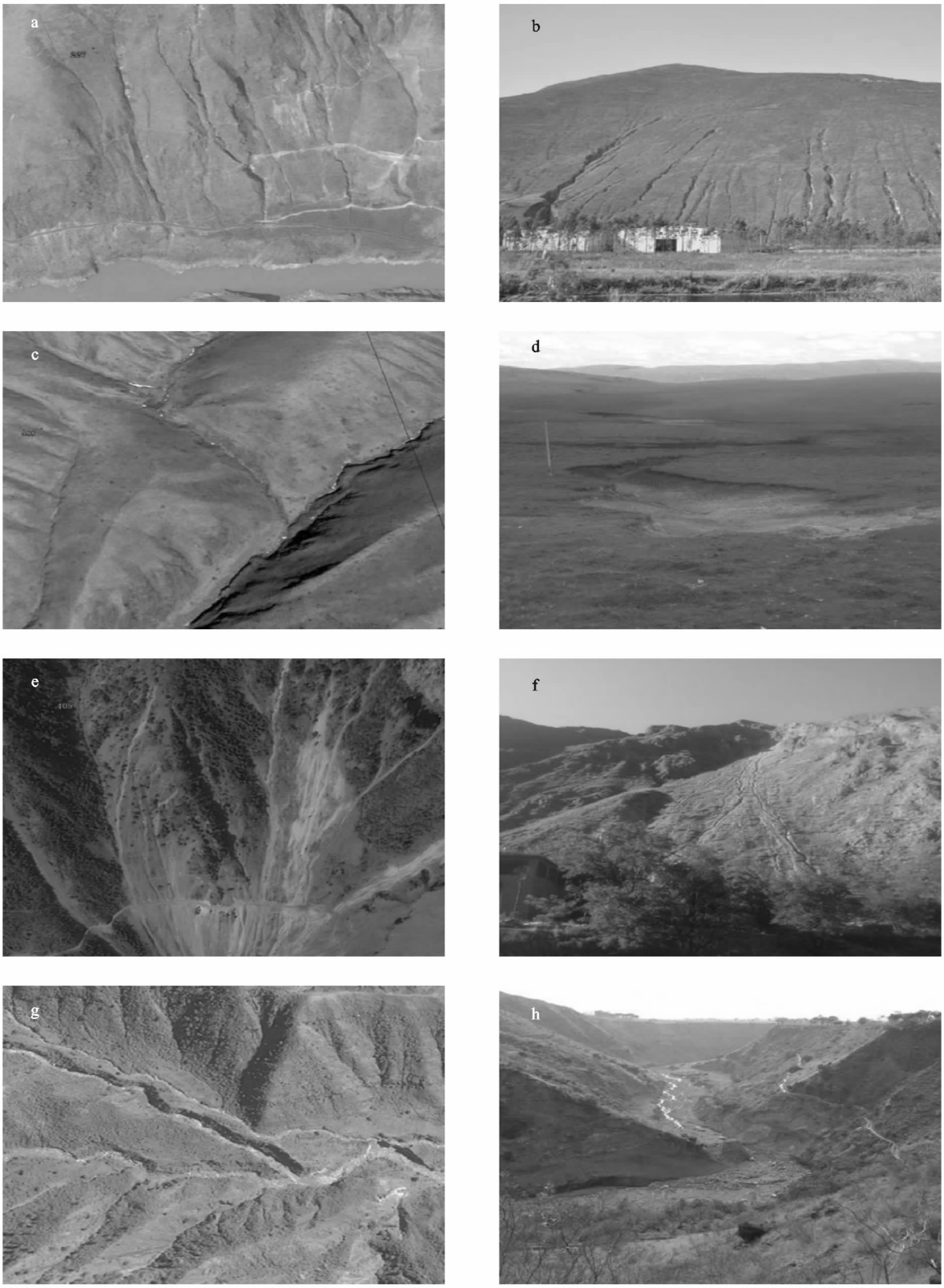
土壤类型也体现出相似的规律,黑毡土和草甸土是横断山冻融侵蚀区的代表性土壤,其沟蚀单元分布数量也最多,分别达到 153 和 76 个,但其平均沟壑密度偏低,分别只有 1.87 和 1.58 km/km^2。沟蚀单元在其他主要土壤的分布情况为:燥红土(57 个)>红壤(56 个)>褐土(46 个)>黄棕壤(38 个)>紫色土(33 个),但从平均沟壑密度看,则是燥红土(4.34 km/km^2)>褐土(3.22 km/km^2)>紫色土(2.50 km/km^2)>红壤(2.23 km/km^2)>黄棕壤(1.54 km/km^2)。燥红土区的面积仅占横断山区总面积的 0.6%,但其沟蚀单元占比达到 10.0%,平均沟壑密度在各土壤类型中排在第一。燥红土沟蚀单元的分布率及沟壑密度都显著高于其他土壤类型,是横断山区沟蚀最为发育的土壤类型。

2.2　横断山区侵蚀沟的归类探讨

基于现有的调查方法,由于细沟空间规模小,其长度、宽度往往小于最高分辨率(0.3 m)的像元尺寸,不满足可见性原则,因此基于现有调查方法无法获取细沟的相关信息。同理,虽然在实际野外观察中发现坡耕地内常有浅沟发育,但在现有影像中,由于横断山区坡耕地地块面积较小(相对黄土高原、东北黑土区等),且多经过坡改梯或坡式梯田等治理措施的改造,其浅沟发育的槽型地形态在遥感影像上并不显著;同时由于耕作活动及作物覆盖等因素,导致浅沟被掩埋或遮挡,基于现有方法能提取到的浅沟信息非常有限。因此,本次调查的侵蚀沟主要为切沟和冲沟。

切沟可以在遥感影像上清晰的提取(图 1),从类型上看,横断山地的切沟主要为坡面沟(hillslope gully),在横断山北部红原、若尔盖等高寒草甸地区也有部分谷底沟(valley floor gully)。从切沟分布的具体位置来看,发育在河谷(沟谷)边坡、由水力、重力共同作用切破原始地表形成的切沟是最为常见的坡面沟类型;在高寒草甸地区水蚀、冻融侵蚀共同作用形成的侵蚀沟同样分布广泛。此外,由于滑坡(降雨、地震等)、冰缘作用等形成的松散坡积物上,也常有切沟发育。

横断山区众多沟谷都有泥石流事件发生。泥石流强烈切割谷坡和谷底,形成空间规模远大于切沟的侵蚀沟道。前期研究往往将这些沟道称为冲沟或侵蚀沟,英文也同样用 gully 一词进行表述[17]。这类冲沟内往往有松散物质搬运痕迹,沟口常有堆积扇等典型形态特征,在遥感影像上可以清晰的进行判读[18]。泥石流冲刷形成的冲沟与传统土壤侵蚀研究领域的沟蚀有许多相似之处,但也存在显著的差异。从侵蚀发生的地貌部位看,泥石流常分为坡面型泥石流和沟谷型泥石流[17],这与沟蚀(permanent gully)中坡面沟和谷底沟的划分有相似之处[12];从侵蚀过程看,二者均属于现代侵蚀范畴,具有溯源侵蚀、沟道下切与沟道拓宽等典型过程[19]。不同之处也较为显著,首先,泥石流形成虽然也存在清水汇集成股流的过程,但泥石流启动后,流体性质常转换成为非牛顿流体,搬运的物质不仅有土壤颗粒,还包括不同粒径的砾石、卵石、漂石等,这与土壤侵蚀研究领域的径流特性(牛顿体)及物质产输(粒径小于 2 mm 的细砂、粉砂、黏土为主)存在显著差异[20];第二,土壤侵蚀研究领域的侵蚀沟,其侵蚀的主要动力来自降雨后沟内形成的暂时性流水[1],这类沟道不属于河网系统,往往没有常年流水存在。但许多发生过泥石流事件的侵蚀沟常属于河网系统,沟道内常有季节性甚至常年流水汇入主河道,在泥石流发生时常造成堵江形成堰塞湖等现象[20]。泥石流无疑是横断山区重要的侵蚀及物质搬运过程,与土壤侵蚀研究的沟蚀存在一定的相似之处,且基于本次调查的研究方法可以成功判读,因此本次调查将存在泥石流过程的侵蚀沟纳入统计的范围。



注:a 河谷边坡切沟,调查单元 ID:JP227,26°59′02.71″N;102°53′05.69″E,海拔 1 189 m; b 河谷边坡切沟,拍摄于云南东川区小江流域; c 水蚀、冻融侵蚀共同作用形成的切沟,调查单元 ID:HD488, 32°56′01.66″N;101°32′31.39″E;海拔 4428m; d 高寒草甸区,发育的切沟,拍摄于四川省红原县; e 滑坡堆积物上形成的切沟,调查单元 ID:JS405,26°24′48.15″N;102°55′32.69″E,海拔 2509m; f 地震引发滑坡体上发育的切沟,拍摄于四川省汶川县; g 位于沟谷谷底有泥石流事件的冲沟,调查单元 ID:JP195,25°59′28.37″N;101°54′12.29″E,海拔 1207 m; h 位于流域谷底,2016 年 9 月有泥石流事件发生的冲沟,拍摄于云南省元谋县。

图 1 横断山区典型侵蚀沟(a, c, e, g 影像来源于 Google Earth)

3 结 论

(1) 基于 Google Earth 与遥感影像,调查横断山区侵蚀沟的沟壑密度(km/km^2),根据调查方法及传统侵蚀沟命名的对比参照,认为本次调查获取的侵蚀沟以切沟和冲沟为主,调查结果显示,25.5%的调查单元有侵蚀沟存在,沟蚀发育区的平均沟壑密度为 2.20 km/km^2。侵蚀强度达到中度及以上的比例接近 50%。

(2) 沟壑密度在低山中低山(海拔<1 500 m)的区域无论分布概率还是沟壑密度均显著高于其他区域;随着坡度的增加,沟壑密度呈上升趋势;沟壑密度与降雨(r^2=0.03, sig.=0.000)及 NDVI(r^2=0.10, sig.=0.000)的呈指数负相关关系,但相关系数偏低;草地是横断山区沟蚀发育的主要土地利用类型;侵蚀沟在高海拔的冻融侵蚀区分布广泛,但沟壑密度偏低;燥红土是沟蚀发育最为剧烈的土壤类型,其分布率及沟壑密度均显著高于其他土壤类型。

(3) 基于可见性原则及侵蚀沟国内、国际分类体系的综合分析,本研究统计的侵蚀沟主要类型为切沟和存在明显侵蚀搬运痕迹的冲沟。切沟的主要类型包括发育河谷边坡由水力及重力作用形成的切沟,发育在高海拔区由水力及冻融侵蚀作用形成的切沟,发育在松散堆积物(滑坡、冰缘作用等形成)上的切沟等。冲沟则常有泥石流事件发生,泥石流与传统沟蚀在发育部位、侵蚀典型过程等方面存在相似之处,但在流态、物质组成、沟内是否有常年流水等方面又有显著差异。然而,考虑泥石流是横断山区重要的侵蚀及物质搬运过程,也能基于本次调查方法可以成功判读,因此纳入了本次调查的结果统计中。

[参 考 文 献]

[1] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003,50:91-133.

[2] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.

[3] 刘元保,朱显谟,周佩华,等.黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,7:9-18.

[4] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.

[5] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.

[6] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956,22(3):201-222.

[7] Bocco G. Gully erosion: processes and models[J]. Progress in Physical Geography, 1991,15(4):392-406.

[8] 王兆印, Lee J, Melching C. 河流动力学与河流综合管理[M].北京:清华大学出版社,2014.

[9] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等.我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征[J].地理学报,2010,65(5):563-579.

[10] 李炳元.横断山区地貌区划[J].山地研究,1989,7(1):13-20.

[11] Vanmaercke M, Poesen J, Van Mele B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016,154:336-355.

[12] Liu Kai, Ding Hu, Tang Guoan, et al. Detection of catchment-scale gully-affected areas using unmanned aerial vehicle (UAV) on the Chinese loess plateau[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2016, 5(12):238.

[13] 朱国锋,蒲焘,张涛,等.TRMM 降水数据在横断山区的精度[J].地理科学,2013,33(9):1125-1131.

[14] 中华人民共和国水利部.SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[15] 钟祥浩,刘淑珍.山地环境理论与实践[M].北京:科学出版社,2014.

[16] 陈云浩,李晓兵,史培军.1983—1992 年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析[J].植物生态学报,2001,25(6):716-720.

[17] 崔鹏,韦方强,谢洪,等.中国西部泥石流及其减灾对策[J].第四纪研究,2003,23(2):142-151.

[18] 唐川,丁军,梁京涛.汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J].工程地质学报,2010,18(1):1-7.

[19] 潘华丽,欧国强,柳金峰.泥石流沟道侵蚀初探[J].灾害学,2009,24(1):39-43.

[20] 康志成,李焯芬,马蔼乃.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.