

## 青藏高原侵蚀沟分类初探

李建军<sup>1,2</sup>, 焦菊英<sup>1,3</sup>, 陈一先<sup>3</sup>, 曹雪<sup>3,4</sup>, 陈同德<sup>1,5</sup>, 程玉卓<sup>3</sup>, 刘祖艳<sup>1</sup>,  
章志鑫<sup>1,6</sup>, 王颢霖<sup>1</sup>, 林红<sup>1,7</sup>, 陈玉兰<sup>3,8</sup>, 税军锋<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.山西农业大学水土保持科学研究所, 太原 030013;

3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.西华师范大学地理科学学院,

四川 南充 637009; 5.青海民族大学政治与公共管理学院, 西宁 810007; 6.察隅县人力资源和社会保障局,

西藏 林芝 860600; 7.错那市自然资源局, 西藏 山南 856700; 8.贵州工程应用技术学院, 贵州 毕节 551700)

**摘要:** [目的]传统的侵蚀沟分类体系集中在农业景观,青藏高原人类活动少,侵蚀沟主要发生在自然景观中,为提出一套因地制宜的、适应自然景观的青藏高原侵蚀沟分类体系。[方法]通过对一江两河地区、藏东南地区、藏北高原、三江源地区、河湟谷地、柴达木盆地、祁连山地等青藏高原典型地区开展大量的野外调查,并结合亚米级高分辨率遥感影像开展室内判读。[结果]区分成因或形态与侵蚀沟相近但非侵蚀沟的多种地貌,并基于侵蚀沟的规模、成因、所处地貌、形态等多个依据对其进行分类。根据侵蚀沟的规模将其划分为小型沟、中型沟、大型沟和巨型沟等;根据成因划分为降雨径流沟、融雪泥流沟、冰川沟、冻土热融沟和人类活动沟等;根据发育所处的地貌划分为陡坡沟、谷底沟、缓坡沟、悬沟、阶地沟、塬边沟和塬面沟等;根据形态划分为直线沟、弯曲沟、勺状沟、条状沟、拓宽状沟、窄长沟、宽短沟、放射状沟、平行状沟和树状沟等。[结论]初步提出一套适合青藏高原特点的多依据侵蚀沟综合分类原则,并建议以规模作为与黄土高原等其他地区侵蚀沟分类对比的主要依据,为青藏高原土壤侵蚀研究和生态环境保护提供支撑。

**关键词:** 土壤侵蚀; 沟蚀; 侵蚀沟; 分类; 青藏高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0001-09

## Elementary Study on Gully Classification on the Qinghai-Xizang Plateau

LI Jianjun<sup>1,2</sup>, JIAO Juying<sup>1,3</sup>, CHEN Yixian<sup>3</sup>, CAO Xue<sup>3,4</sup>, CHEN Tongde<sup>1,5</sup>, CHENG Yuzhuo<sup>3</sup>,  
LIU Zuyan<sup>1</sup>, ZHANG Zhixin<sup>1,6</sup>, WANG Haolin<sup>1</sup>, LIN Hong<sup>1,7</sup>, CHEN Yulan<sup>3,8</sup>, SHUI Junfeng<sup>1,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030013, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China; 5.School of Politics and Public Administration, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China; 6.Bureau of Human and Social Affairs, Linzhi, Xizang 860600, China; 7.Bureau of Natural Resources, Cuona City, Shannan, Xizang 856700, China; 8.Guizhou University of Engineering Science, Bijie, Guizhou 551700, China)

**Abstract:** [Objective] Traditional gully classification systems focus on agricultural landscapes. However, on the Qinghai-Xizang Plateau, where human activity is limited, gullies primarily occur in natural landscapes. Therefore, it is necessary to propose a tailored gully classification system that is suited to the natural landscapes of the Qinghai-Xizang Plateau. [Methods] Extensive field investigations were conducted in typical

收稿日期: 2024-08-10

修回日期: 2024-09-16

录用日期: 2024-10-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-11-05

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0603); 国家自然科学基金重点项目(42430506); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452023071)

第一作者: 李建军(1997—), 男, 助理研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: lijianjun@nwfu.edu.cn

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

regions of the Qinghai-Xizang Plateau, including the Yarlung Zangbo River and its two tributaries, the Southeast Xizang, the Qiangtang Plateau, the Three-River Headwaters region, the Hehuang Valley, the Qaidam Basin, and the Qilian Mountains. These field studies were complemented by indoor interpretations using sub-meter high-resolution remote sensing imagery. [Results] Various landforms that resemble but are not gullies in terms of genesis or morphology were identified and distinguished. The gullies were classified based on multiple criteria, including scale, genesis, the landform in which they developed, and morphology. The gullies were classified by scale into small, medium, large, and giant gullies; by genesis into rainfall-runoff gullies, snowmelt-mudflow gullies, glacial gullies, permafrost-thermal gullies, and human activity gullies; by the landform in which they developed into steep-slope gullies, valley-bottom gullies, gentle-slope gullies, cliff gullies, terrace gullies, tableland-edge gullies, and tableland-surface gullies; and by morphology into straight gullies, curved gullies, spoon-shaped gullies, strip-shaped gullies, widened gullies, narrow-long gullies, wide-short gullies, radial gullies, parallel gullies, and dendritic gullies. [Conclusion] This study preliminarily proposes a comprehensive gully classification system based on multiple criteria suitable for the characteristics of the Qinghai-Xizang Plateau. It suggests using scale as the primary basis for comparison with gully classification systems in other regions, such as the Loess Plateau, and provides support for soil erosion research and ecological environment protection on the Qinghai-Xizang Plateau.

**Keywords:** soil erosion; gully erosion; gully; classification; Qinghai-Xizang Plateau

Received: 2024-08-10

Revised: 2024-09-16

Accepted: 2024-10-10

Online(www.cnki.net): 2024-11-05

沟蚀, 全称沟状侵蚀, 是土壤侵蚀的主要形式之一, 同时也是生态环境面临的主要问题之一<sup>[1]</sup>。侵蚀沟是沟状侵蚀的产物, 一些研究<sup>[2-4]</sup>中称作侵蚀沟谷、侵蚀沟道。侵蚀沟分类是沟蚀研究的基础问题<sup>[5]</sup>。国内侵蚀沟分类研究开始于新中国成立初期的黄河中游水土流失考察<sup>[6]</sup>。朱显谟<sup>[7]</sup>最早给出细沟与切沟的概念为“细沟见于原畔坡地, 原地集水槽边沿及梯田中有时亦可发生, 但其甚易为犁锄所耙平而消失; 切沟为坡地集水成沟, 沟水任意穿入黄土层中而成洞穴, 上下相连之洞穴间地面下塌之后即成深切之沟”, 此外, 还将切沟继续发育之后的侵蚀沟形态称作黄土沟。同年, 席承藩等<sup>[8]</sup>根据沟道宽深和对耕作的影响将沟状侵蚀分为细沟、浅沟、切沟、槽沟、土巷等。次年, 朱显谟等<sup>[9]</sup>将侵蚀沟分为细沟、栅状沟、切沟 3 种, 随后又改称为细沟、浅沟(含栅状沟)、细切沟、中切沟、大切沟<sup>[10]</sup>。罗来兴<sup>[11]</sup>从地貌的角度将沟状地貌划分为坡面侵蚀沟和沟谷。其中, 坡面侵蚀沟又细分为梳沟(细沟、浅沟)、条沟(切沟、悬沟); 沟谷分为冲沟沟谷和承袭沟谷(干沟、河沟)。刘元保等<sup>[12]</sup>将黄土高原侵蚀沟系划分为坡面侵蚀沟系列(细沟、浅沟、切沟)、悬沟系列和沟道系列(冲沟、干沟、河沟)。刘宝元等<sup>[13]</sup>对前人的定义进行归纳总结, 根据侵蚀沟形态与对耕作的影响将黄土高原侵蚀沟分为细沟、浅沟、切沟(包含悬沟)和冲沟, 并把前 3 种与东北黑土区的侵蚀沟类别进行对照; 干沟(古代侵蚀沟)与河

沟作为承袭沟谷属于河网系统, 归入沟道之列。

由于侵蚀沟形成的地理环境不同, 国内外对侵蚀沟分类界定上存在差异, 经历漫长的发展完善过程<sup>[14]</sup>。因此, 国内的侵蚀沟类型的翻译上还存在一定差异。朱显谟<sup>[1]</sup>将英语“rill erosion”与国内的细沟侵蚀对应。刘元保等<sup>[12]</sup>将“rill”和“gully”分别译作细沟和切沟。郑粉莉等<sup>[15]</sup>将“ephemeral gully”和“gully”译为临时性切沟和切沟。刘宝元等<sup>[13]</sup>将国内的细沟、浅沟、切沟、悬沟、冲沟、干沟、河沟分别译作“rill”“ephemeral gully”“gully”“hanging gully”“modern incised valley”“ancient incised valley”“river valley”。

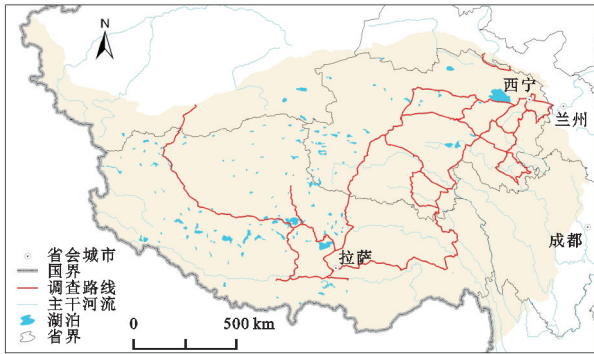
青藏高原地域广大, 山高坡陡, 地形复杂, 土壤粒径偏粗, 侵蚀沟的形态、所处地貌和发育过程与黄土区、黑土区、红壤区均有着很大的差异, 且沟蚀的驱动力更多样, 不仅有降雨径流, 还包含冰川冻土积雪形式的固态水融化的影响, 造成青藏高原侵蚀沟规模差异悬殊、成因多样、所处地貌复杂、形态各异的特点, 该地区的侵蚀沟类型和发育机制与其他地区也有很大区别, 加大了侵蚀沟研究的难度。然而, 现阶段青藏高原的土壤侵蚀研究主要集中在通用土壤流失方程(USLE)的应用等方面<sup>[16]</sup>, 对沟蚀的研究很少, 侵蚀沟的类型等基本情况还不明确<sup>[17]</sup>。对青藏高原的侵蚀沟进行界定和分类, 有助于借鉴全球其他地区的治理经验, 针对性开展归因与建模研究, 对提出相应的防治措施有着重要的意义。另外, 传统的侵蚀沟分类体系主要关注

的是农业生态系统的侵蚀沟,但目前沟蚀研究已不仅局限于其对农业耕作的影响,而是拓展到对牧业、人居环境乃至自然生态的影响<sup>[18]</sup>。因此,一套普适的、适宜自然景观的侵蚀沟分类体系是有必要的<sup>[5]</sup>。

## 1 材料与方 法

### 1.1 侵蚀沟调查

青藏高原(73°30′~104°25′E,26°00′~39°59′N)是我国最大的高原,也是世界上最高、最年轻的高原,平均海拔 4 300 m。2018—2023 年,沿主要公路在青藏高原地区开展多次侵蚀沟地面调查,获取大量侵蚀沟形态参数的实地测量数据、野外侵蚀沟照片与无人机航拍照片(图 1)。对于大部分远离公路的无人区,通过谷歌地球、奥维地图等遥感软件提供的亚米级高分辨率遥感影像辅助开展调查。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未作修改。

图 1 青藏高原侵蚀沟野外调查路线

Fig.1 Field survey route of gullies on the Qinghai-Xizang Plateau

### 1.2 侵蚀沟界定

结合已有研究<sup>[5]</sup>对侵蚀沟的定义范畴,明确侵蚀沟的几个关键识别特征,主要包括下垫面必须为土壤或成土母质等松散堆积物、形态必须为线性、中间必须凹陷、形成过程必须有水的参与。在此基础上,识别出与侵蚀沟特征相似但并非侵蚀沟的相似地貌。

本研究将侵蚀沟界定为发育在土壤及其母质(松散碎屑物,含沉积物、坡积物、冰碛物等)上的,形成过程中有降雨或冰雪及其融水等固液态水参与、有宽深特征、有清晰边界的线性凹陷地貌。

侵蚀沟有着明显的线性特征,而有线性特征的地貌不一定是侵蚀沟。因此,需要对概念上或者影像中相似地貌与现象进行辨识。经界定,河道、山谷、岩层纹理、石流、浅层滑坡、热融滑塌、融雪泥流、冻融龟裂等不属于侵蚀沟范畴。

### 1.3 侵蚀沟分类

参考国内外现有的侵蚀沟主要分类原则<sup>[5,13]</sup>和青藏高原侵蚀沟规模差异悬殊、成因复杂、所处地貌多元、形态多样的特点,采用多个依据对侵蚀沟进行

分类,主要包括规模、成因、所处地貌、形态等依据。在此基础上对侵蚀沟进行综合分类与命名。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于规模的分类

规模是侵蚀沟最直观的特征。由于侵蚀沟长度受到坡长等地形因素的限制,传统的侵蚀沟分类体系是根据宽度规模特征对侵蚀沟进行划分(表 1)。基于规模的分类体系已经被业内广泛认同,因此,基于规模的侵蚀沟分类体系较为重要。

表 1 基于规模分类的侵蚀沟主要特征

Table 1 Main features for gully classification based on scale

类别	侵蚀沟宽度/m	典型分布区
小型沟	<0.5	滑坡、道路边坡等
中型沟	0.5~10	一江两河等地区
大型沟	10~200	河湟谷地、三江源等地区
巨型沟	>200	札达盆地、兴海盆地、共和盆地等

### 2.2 基于成因的分类

青藏高原海拔高,冰川冻土广泛分布,包括降雨径流、冰川冻土积雪融水等动力因素使得侵蚀沟产生和发育的驱动因素相对复杂,即侵蚀沟成因更多元化(表 2)。小型沟的宽度通常不超过 0.5 m,接近传统意义上细沟和浅沟的宽度;小型沟常发育在坡度较陡的坡积物、滑坡、道路边坡等松散碎屑物上。中型沟宽度通常为 0.5~10 m,长度与坡面长度有关,中型沟的宽度接近传统意义上切沟的范畴<sup>[13]</sup>;在植被较差的地区中型沟通常发育在坡面,植被较好的地区多发育在谷底。大型沟宽度通常为 10~200 m,深度通常超过 10 m,规模上接近传统分类体系中的冲沟。大型沟的形成需要较大的径流和深厚的土壤,因此,在河湟谷地、一江两河地区分布较多;在地貌上,其通常发育在坡面和谷底的过渡地带、河流的沉积阶地或洪积扇扇缘等地貌。巨型沟的宽度通常超过 200 m,一些超过 500 m 甚至 2 000 m,深度通常超过 100 m,其形成需要深厚的沉积物和足够的径流动能,因此,多发育在古河湖相沉积盆地,如共和盆地、兴海-同德盆地、札达盆地等(图 2),大型河流贯通之前在盆地形成深厚的湖相沉积,而后河流切穿山脉,大量湖水下泄,盆地侵蚀基准面下降,在平坦的塬面上陡然下切形成巨型沟;而作为内流盆地,青海湖盆地等目前并没有产生大量侵蚀沟。

2.2.1 降雨径流侵蚀沟 降雨产生的径流是侵蚀沟发生和发展的主要影响因素,因此,降雨径流侵蚀沟是最常见的一种侵蚀沟。降雨侵蚀沟发育最为广泛,有降雨的地区均有降雨径流沟,一般沟岸陡峭,沿线破坏植被。甚至在年平均降水量低于 50 mm 的柴达木盆地西北缘也有分布。



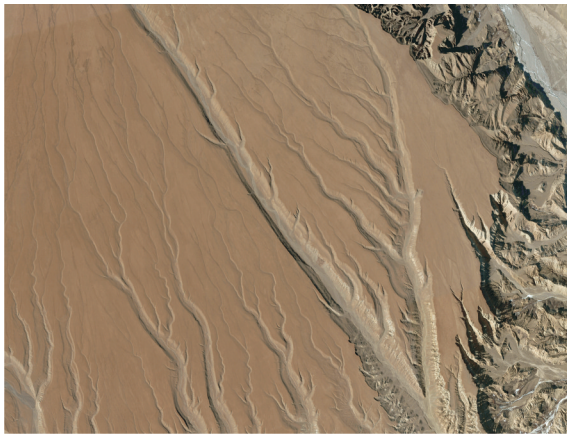


图 2 札达盆地象泉河附近巨型冲沟

Fig.2 Giant gully near the Xiangquan River, Zhada Basin

表 2 基于成因分类的侵蚀沟主要特征

Table 2 Main features for gully classification based on origin

类别	主要特征	典型分布区
降雨径流沟	破坏植被、沟岸陡峭	广泛分布
融雪泥流沟	泥流凸出地表,中间下切,规模通常较小	高山
冰川沟	下切,规模通常较大	冰川附近
冻土热融沟	较浅,一些与冻融龟裂伴生	冻土区边缘
人类活动导致的沟	人为改变径流或下垫面	农田、公路周边

2.2.2 融雪泥流沟 融雪泥流沟由冬季积雪在春夏季融化形成的泥浆顺坡缓慢流动形成,因此,多发于有季节性积雪的高海拔地区。由于泥流流速慢、黏滞性大、对泥沙的搬运能力弱,在下坡逐渐淤积,凸出地表,同时,受水流冲刷在泥流中央径流通道处下凹,形成融雪泥流沟。从遥感影像上看,沟底和沟背阴侧沟岸都有阴影(图 3),说明沟岸凸起,高于原地表,断面呈“M”形。与其他成因的侵蚀沟有明显不同。另外,融雪泥流沟在下游有流速相对较快的稀泥向外发散,因此,局部淤积在影像上比其他地表更亮。



图 3 措勤县江让乡杰萨错东北岸融雪泥流沟

Fig.3 Snowmelt mudflow gully on the northeast bank of the

Gyesar Co Lake, Jiangrang Town, Cuoqin County

2.2.3 冰川沟 冰川退缩使得上游大量冻融松散物源被冰雪融水搬运至下坡、沟道或流域出口处形成泥

流扇或沉积阶地,为侵蚀沟发育提供松散堆积物源。而后,在冰湖溃决、冰川快速消融等径流事件或冰川流动的驱动下,松散冰碛物被切割形成侵蚀沟<sup>[19]</sup>。由于在第四纪冰期冰川曾经广泛分布,因此,冰川沟的分布范围也很广泛,且在现存冰川的附近最易找到。

2.2.4 冻土热融沟 冻土热融沟,又称热侵蚀沟,指由于气候变暖使得冻土融化而产生的侵蚀沟(图 4)。冻土热融沟多发育在冻土区,主要成因是冻土融化。由于冻土自上而下融化,热融沟通常较宽浅。

在地形平缓时,反复冻融产生冻融龟裂,一些冻融裂隙连接成线,在融水的冲刷下逐渐向下侵蚀,形成热融沟。由于地形平缓水流缓慢,沟通常较浅,和俄罗斯北极冻土地区的热融侵蚀沟相似,冻土热融沟往往与冻融龟裂伴生<sup>[20]</sup>。在地形陡峭时,融化的冻土在冰水润滑和在重力的作用下顺坡下滑,产生热融泥流,使得原地表下凹成为冻土热融沟。冻土热融沟与热融蠕移或热融滑塌成因相近,但形态上呈线形,也可由热融滑塌后退延长形成<sup>[21]</sup>。在 2010 年改错东 46 km 处,冻土热融沟在过去 10 余年快速发育,2010—2012 年产生宽度近百米的热融沟(图 4b),2012—2020 年原有沟迅速拓宽至 200 余米,同时还新产生数条热融沟。

(a) 2010年

(b) 2012年



图 4 多尔改错东 46 km 处冻土热融沟

Fig.4 Permafrost thermal gully 46 km east of the Dolgecco Lake

2.2.5 人类活动导致的沟 人类活动沟指原始自然景观中不存在,但由于人类活动改造原地貌或破坏植被,使得水流被人为聚集,在松软的沉积物上形成的侵蚀沟。青藏高原北部柴达木盆地和河湟谷地的农业以灌溉为主。柴达木盆地灌渠主要由“U”形预制槽拼接而成,由于渠道老化或施工质量问题,局部接缝处产生渗漏。在德令哈市柯鲁柯镇调查中发现,灌渠渗漏导致临近河岸的农田产生宽深达数米的侵蚀沟<sup>[22]</sup>。青藏高原有青藏、川藏、新藏等多条交通干线,公路里程不断增加,对当地水文植被有一定影响。在藏北高原地区尼玛县达则错南岸,由于 317 国道向阿里延伸建设,人为阻挡了原始的径流路径,迫使径流改道,只能沿着路基下的涵洞汇入达则错。由于该处原先便沉积大量泥沙,因此,侵蚀沟在松软泥沙上发育且迅速朝多个方向延伸,形成“天空之树”的景观。另外,人

为在山区修路、放牧时造成的植被破坏,提供更易侵蚀的下垫面条件,导致边坡侵蚀沟的产生。

### 2.3 基于所处地貌的分类

青藏高原地域广袤,与我国其他地区相比,青藏高原有着更为复杂多变的地貌类型和地貌部位。不同地貌影响径流的走向和动能,进而影响侵蚀沟发育的下垫面和动力(表 3)。陡坡沟最常见,发育在高山、丘陵等山体的坡面土壤或坡积物上;由于地形坡度的影响,水流速度较快,陡坡沟通常形态结构简单,多为线性。陡坡沟的主要特征是沟底比降与坡面原始比降一致。缓坡沟是发育在缓坡上的侵蚀沟(图 5),通常分布在湖泊周边的湖相沉积缓坡或大型冲积扇上;由于地形平缓,缓坡沟通常发育得较为弯曲或形态多样,与谷底的较缓坡度相比,缓坡坡度接近或更小,接近平地,且原始地表较为平坦。在小流域或集水区中,谷底往往更容易产生侵蚀沟,即谷底沟,是由于谷底汇集较多的径流,且有着更厚的松散堆积物。悬沟,又称岸沟,主要发育在大型河流的阶地、台地或塬面边缘的陡崖或悬崖上,或被河流冲刷而成的陡直河岸上;悬沟的主要特征是长度小于落差,与其他地貌发育的侵蚀沟相比,悬

沟以竖直线性特征为主,水平线性特征较弱。阶地沟指发育在河流阶地上的侵蚀沟,相比于发育在阶地边缘的岸沟,阶地沟是阶地边缘的岸沟进一步向阶地深切,最终形成的侵蚀沟,其主要特征是长度大于落差;对于大型河流,往往可形成较宽的河流阶地,因此,阶地沟通常形成在大型河流的沉积阶地上。塬边沟指发育在大型河流沉积盆地的残存塬面边缘的侵蚀沟,其主要特征是切入塬面但未深切,即是长度接近落差,塬上部分和塬面以下部分长度占比接近或在 1 个数量级;在青藏高原的东北部,由于黄河下切,导致沿岸塬面侵蚀基准面下降,塬面被剧烈的侵蚀切割为零星残塬,在残塬的边缘是落差巨大的悬崖,发育着悬沟,悬沟向塬面溯源侵蚀形成塬边沟。塬面沟,又称台地沟,指发育在河流沉积盆地的大型塬面或大型台地上的侵蚀沟(图 2);由于沉积台地规模宽阔,土层深厚,加之河流的强烈下切降低侵蚀基准面,使得形成的侵蚀沟往往也有较大规模,接近上文中的巨型沟,其特征是长度远大于落差,塬上部分远长于塬面以下部分,也与阶地沟相似,但因所处地貌不同,供侵蚀沟发育的空间更大,因此,塬面沟规模更大。

表 3 基于所处地貌分类的侵蚀沟主要特征

Table 3 Main features for gully classification based on the underlying landform

类别	主要特征	典型分布区
陡坡沟	沟底比降较大,与坡面原始比降一致	一江两河等地区
缓坡沟	发育在长缓坡上,平面形态弯曲	藏北高原等地区
谷底沟	发育在谷底	河湟谷地、三江源等地区
悬沟	深度远大于长度,未切入塬面或阶地	河流阶地或河流沿线古湖盆
阶地沟	切入阶地,长度大于落差	巴曲、扎曲等大河支流阶地
塬边沟	切入塬面但不深切,塬上塬下长度接近	札达盆地、兴海盆地等河流沿线古湖盆
塬面沟	深切入塬面,通常贯通,塬上远长于塬下,长度远大于落差	札达盆地、兴海盆地等河流沿线古湖盆

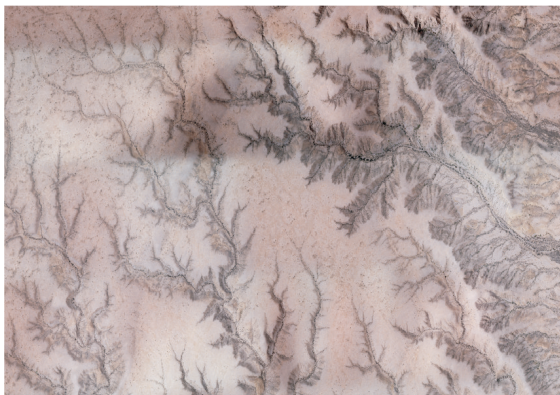


图 5 德令哈市柯鲁柯镇南部缓坡沟

Fig.5 Gentle slope gully in southern Colu Town, Delingha City

### 2.4 基于形态的分类

形态是侵蚀沟主要的特征之一,能够反映侵蚀沟的全貌,通常需要在较大的视野中观察(表 4)。

2.4.1 基于个体形态 对于单条侵蚀沟来说,由于地形不同,径流侵蚀过程也导致形成不同的侵蚀沟形状。根据形态对侵蚀沟分类时,应该以 1 条沟的主要形态特征为依据。

根据侵蚀沟的弯曲程度,可分为直线沟和弯曲沟。通常地形坡度越陡,径流流速越快,侵蚀沟通常为直线型;地形越缓,径流流速越慢,侵蚀沟通常为弯曲线型。有种侵蚀沟比较特殊,从宏观上看为直线型,但其内部溪线十分弯曲,犹如蛇类行走痕迹般蜿蜒曲折,单独分类为蛇行沟(图 6)。

根据侵蚀沟上下游宽度的变化,可分为收敛状沟(勺状沟)、条状沟与拓宽状沟。头大尾小形如汤匙的沟为收敛状沟(图 7a),又称勺状沟<sup>[23]</sup>。头尾宽度变化不大,整体较为匀称的是条状沟。头小尾大,宽度逐渐增大的侵蚀沟是拓宽状沟。根据侵蚀沟的



长宽比例,可分为窄长沟和宽短沟。窄长沟指长度远大于宽度的侵蚀沟,长宽比通常超过 10。宽短沟指长度仅为宽度的数倍,即长宽在 1 个数量级的侵蚀沟(图 7b)。

表 4 基于形态分类的侵蚀沟主要特征

Table 4 Main features for gully classification based on morphology

类别	主要特征	典型分布区	
个体形态	直线沟	沟身笔直	陡坡
	弯曲沟	沟身弯曲	缓坡
	收敛状沟	宽度收窄	—
	条状沟	宽度均匀	—
	拓宽状沟	宽度扩宽	—
群体形态	放射状沟	沟间距逐渐变大	凸形坡、洪积扇等
	树状沟	支沟逐渐并入主沟	凹形坡
	平行状沟	沟间距固定	直形坡
横断面形态	下切沟	下切,断面“V”“U”形	广泛分布
	浅沟	未下切,断面浅碟形	三江源高寒草甸等地
纵剖面形态	连续沟	沟身连续	广泛分布
	断续沟	沟身中断后再度出现	藏北高原等地

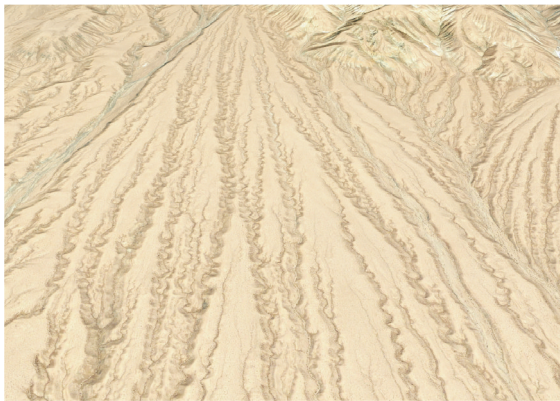
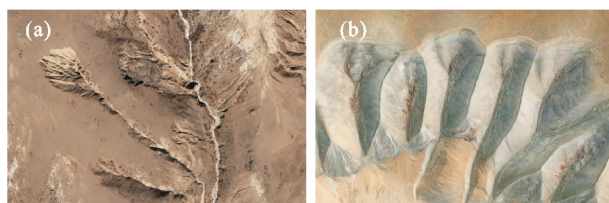


图 6 且未县库拉木勒克乡吐拉牧场东北部洪积扇放射状弯曲沟

Fig.6 Radial curved gully in northeast of the Tula Pasture, Kulamulk Township, Jumo County



注:a为曲水县聂当乡勺状沟;b为仲巴县布多乡毕多藏布阶地短宽沟。

图 7 侵蚀沟个体形态

Fig.7 Individual morphological characteristics of gullies

2.4.2 基于群体形态 侵蚀沟通常以群体形式出现,群体特征是侵蚀沟的重要特征之一。朱显谟<sup>[24]</sup>根据形态将侵蚀沟分为“放射状”“平行状”“树枝状”3种,并发现放射状沟多发生在凸形坡,平行状沟多发于直形坡,树状沟多发于凹形坡。

放射状沟指若干侵蚀沟顺坡而下,间距逐渐加大、互不相交的侵蚀沟(图 6)。放射状沟通常发生在洪积扇等凸形坡上,由于径流顺坡发散,侵蚀沟不易相交。树状沟指有主干和分支的侵蚀沟,通常是若干侵蚀沟顺着地形汇集至大沟,包括主干形(图 8)、尖塔形、扇形、纺锤形、扁球形等。如循化县文都乡塬边沟的塬上部分为尖塔形树状沟;尼玛县达则错南岸“天空之树”的景观发育在松软泥沙上,为纺锤形树状沟。平行状沟指若干侵蚀沟顺坡平行而下,互不相交的侵蚀沟。由于发育在直形坡上,平行状沟径流各自顺坡下切,难以汇集,因此,平行状沟通常为中小型沟。

2.4.3 基于横断面形态 由于地表植被或土壤等下垫面条件的限制,一些侵蚀沟无法向下深切,在本研究中被统称为浅沟。青藏高原的浅沟主要分布在三江源地区等植被覆盖相对较好的高寒草甸区。另一些侵蚀沟由于下垫面更加松散、径流动能更大,能够向下切入地表。为了与传统定义上的切沟区分,此沟被统称为下切沟,包含细沟、切沟、冲沟的概念。浅沟的界定中并没有一个深度的阈值,其主要特征是断面呈浅碟形,侵蚀沟深度远小于宽度,二者不在一个数量级。同样的,下切沟并不意味着侵蚀沟更深,例如小型沟深度就不大。其特征是断面为“U”形或“V”形,深度和宽度在一个数量级。浅沟是侵蚀沟,但不是典型的侵蚀沟,即虽然有下蚀,却未下切。



图 8 尼玛县城西北 8 km 处主干树状沟

Fig.8 Trunk dendritic gully 8 km northwestern Nima County

2.4.4 基于纵剖面形态 作为一种线性地貌,侵蚀沟通常是连续的。沟身连续的侵蚀沟为连续沟。但由于植被、坡度等下垫面的差异,一些侵蚀沟在随着地形发展的过程中可能遇阻或径流被暂时发散,而后又在下坡再次下切形成断续沟<sup>[1]</sup>。断续沟的关键特征是多段侵蚀沟分布在同一水流路径上,且下切段的沟长度通常不短于间断长度,且为中小型沟。

## 2.5 综合分类

侵蚀沟的分类有多种依据,在不同情况下可选择

适合分类原则。但仅根据单一原则对侵蚀沟进行分类,会忽略一些关键特征信息。因此,对一条沟进行分类应该是多个依据的组合,并突出关键特征<sup>[5]</sup>。基于这个原则,笔者提出一套多依据的青藏高原侵蚀沟综合分类原则,主要包括所处地貌、规模、成因、形态 4 个主要依据。其中,下垫面为陡坡、成因为降水径流、平面形态为线性、横断面为“U”或“V”形、纵剖面连续是侵蚀沟的普遍状态,在分类命名中可以省略,不单独标出。仅在平面形态复杂、横断面不下切(浅沟)和纵剖面不连续(断续沟)等特殊情况下需要在名称中注明。

### 3 讨论

#### 3.1 侵蚀沟类型的多元性

作为一种线性地貌,一条侵蚀沟上下游逐渐变化,如从上到下逐渐下切或从上到下逐渐拓宽。对于同一水流路径上先出现浅沟,而后下切成为切沟是否应该视为同一条沟?换言之,一条沟能否属于多个类型?在黄土高原的沟蚀研究中,对于坡面上的一条沟通常是上坡细沟、中坡浅沟、下坡切沟。因此,一条侵蚀沟的类型可能是上游段为浅沟下游段为下切沟。即侵蚀沟分类是允许分段界定的,即一条沟可以属于多个类型<sup>[25]</sup>。在界定一条沟的整体类型时,建议以沟的下段,即通常最宽处对应的类型进行分类命名。

#### 3.2 侵蚀沟类型的动态性

非侵蚀沟地貌可能发展为侵蚀沟。融雪泥流不是沟,但之后径流下切形成沟。冻融龟裂不是沟,但随着冻土进一步融化,龟裂在融水的作用下沿地势串联就可能发展成热融侵蚀沟。滑坡不是沟,但由于植被破坏,地表更易被侵蚀,滑坡进一步被切割变成侵蚀沟。谷底处往往可集中更多的径流,因此,也有更大的概率形成侵蚀沟。一种侵蚀沟向另一种侵蚀沟发展、转变。对于正在快速发展的活跃侵蚀沟,可能正在经历着沟头前进、沟岸拓宽、沟底下切等过程,导致其规模与形态发生变化。小型侵蚀沟继续发展,可能成为中大型侵蚀沟。浅沟在极端降水等条件下,可能向下深切成为下切沟。断续沟继续侵蚀也可能连接成一条沟。悬沟进一步向阶地内部发育可能成为阶地沟。

#### 3.3 沟和谷的区别

沟谷地貌的研究中,“沟”和“谷”通常不作区分。国内一些研究将侵蚀沟泛称为侵蚀沟道或侵蚀沟谷。“谷”的本义指山谷,即两山间狭长而有出口的地带或水道。景可<sup>[3]</sup>将细沟、浅沟、切沟、冲沟、干沟和河沟统称为沟谷,并未区分“沟”和“谷”间的不同。田剑等<sup>[26]</sup>仅

将黄土高原的长度大于 100 m 的侵蚀沟归入侵蚀沟谷。侵蚀沟谷侧重在谷,是大型地貌,横断面平缓,而侵蚀沟往往是小微地貌,横断面在沟岸处通常有突然的转折点。目前,“沟”“谷”间并没有明确的规模划分阈值。而且,“沟”和“谷”间的区别并不只是规模上的差异。从规模上看,本文中宽度 $>200$  m 的、发育在松散的湖相沉积物上的、横断面有明显坡度突变的大型线性凹陷地貌也可被界定为侵蚀沟。土壤侵蚀的研究范畴主要局限在土壤及其母质上,因此,侵蚀沟应该是发育在土壤及其母质上的地貌。通常来说,切入岩石,两岸为岩石山体的为谷;切入土壤,两岸为土壤或松散母质、规模较小为沟。总之,规模是区分“侵蚀沟谷地貌”中“侵蚀沟”和“侵蚀谷”最主要的特征,但还应该考虑其发育的下垫面物质组成。

#### 3.4 与其他侵蚀沟分类体系的异同

广泛应用于黄土高原、东北黑土区等地区的细、浅、切、冲的侵蚀沟传统分类体系与本研究基于规模和是否下切的分类体系十分接近<sup>[13]</sup>。本文中小型、中型、大型侵蚀沟分别对应传统体系中的细沟、切沟、冲沟。青藏高原的浅沟与刘宝元等<sup>[13]</sup>定义的宽度介于细沟和切沟(30~50 cm)间不一致,有一些浅沟宽度达 20 m。因此,浅沟的定义仅关注是否下切,而非其宽度。本研究将宽度 30~50 cm 的沟与细沟(宽度 $<30$  cm)一同纳入小型沟范畴。传统的侵蚀沟分类体系主要关注耕地中的沟,因此,细沟与切沟的区分中通常需要考虑能否被耕作消除,切沟与浅沟的区分中通常考虑能否被普通耕作工具横跨<sup>[5,13]</sup>。切沟在英文中被译作永久沟(permanent gully),浅沟在英文中被译作临时沟(ephemeral gully),但永久沟与临时沟的定义是能否被耕作消除,针对的是农业景观中的侵蚀沟,在人类活动影响较小的自然景观中不再适用。由于青藏高原的侵蚀沟主要发生在自然景观中,与耕作无关,因此,各类沟的定义不一定与耕作关联,翻译也相应作出调整。因此,本文不将切沟译作“永久沟”,而是“下切沟(cut/dissected gully)”。浅沟不再译作“临时沟”,而是“浅沟(shallow gully)”。

另外,青藏高原的悬沟是发育在悬崖上的,而不是黄土高原那样“悬挂”在沟缘线处。因此,悬沟译作“悬崖沟(cliff gully)”或“岸沟(bank gully)”,而不是“悬挂沟(hanging gully)”。在国外的侵蚀沟分类体系中,通常区分“rill”和“gully”的概念。“rill”与国内细沟的概念一致<sup>[15]</sup>,对应本文中的小型沟。而“gully”国内通常认为是“切沟”的概念<sup>[27]</sup>。实际上,“gully”包含“永久沟(permanent gully)”和“临时沟(ephemeral



gully)”,指达到一定规模的侵蚀沟,是否下切并不包含在定义中<sup>[5,28]</sup>。因此,“gully”和“gully erosion”译作“切沟”和“切沟侵蚀”并不准确。国外的“gully”概念更接近本文中型沟的规模与概念。

本文中提出的侵蚀沟分类依据较多,可根据不同的目的选用不同的分类依据及其组合。比如,当进行侵蚀沟存量与空间分异调查时,建议采用基于规模的侵蚀沟分类依据,与黄土高原、东北黑土区等地的侵蚀沟分类相近<sup>[13]</sup>,概念较为直观,便于行业内交流;当进行侵蚀沟防控政策制定时,建议采用基于成因的侵蚀沟分类依据,便于借鉴经验、针对性开展沟蚀防控工作。

#### 4 结论

1)将侵蚀沟定义为发育在土壤及其母质上的,由降雨或冰雪融化等形成的水流冲刷而成的、有宽深特征、有清晰边界的线性凹陷地貌。在明确侵蚀沟主要特征的基础上,研判成因或形态与侵蚀沟相近,但非侵蚀沟的多种地貌。

2)青藏高原地区的侵蚀沟分类时采用多个分类依据,初步辨析各类沟的概念、特征与分布情况。根据侵蚀沟的规模将其划分为小型沟、中型沟、大型沟和巨型沟等类型;根据侵蚀沟的成因将其划分为降雨径流沟、融雪泥流沟、冰川沟、冻土热融沟和人类活动沟等类型;根据侵蚀沟所处的地貌类型将其划分为陡坡沟、谷底沟、缓坡沟、悬沟、阶地沟、塬边沟和塬面沟等类型;根据侵蚀沟的个体形态将其划分为直线沟、弯曲沟、勺状沟、条状沟、拓宽状沟、窄长沟和宽短沟等类型;根据侵蚀沟的群体形态将其划分为放射状沟、平行状沟和树状沟等类型;根据侵蚀沟纵剖面是否连续将其划分为连续沟和断续沟等类型;根据侵蚀沟横断面是否下切将其划分为下切沟和浅沟等类型。进而提出下垫面、规模、成因、形态等多依据的侵蚀沟综合分类体系。

3)由于与黄土高原、东北黑土区等的侵蚀沟传统分类体系接近,建议在青藏高原的侵蚀沟研究中采用基于规模的分类依据,即宽度 $<0.5$  m为小型沟,宽度 $0.5\sim 10$  m为中型沟,宽度 $10\sim 200$  m为大型沟和宽度 $>200$  m为巨型沟。

致谢:非常感谢中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”课题“土地覆被变化与土壤侵蚀评估及其调控策略”和第二次青藏高原综合科学考察研究专题“土地利用变化及其环境效应”研究中青藏高原土壤侵蚀科考队对本文野外

调查工作的支持与帮助;感谢刘宝元教授、郑粉莉研究员、安韶山研究员等专家对本研究的指导与建议。

#### 参考文献:

- [1] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956(2):99-115.  
ZHU S M. Classification on the soil erosion in the loess region[J].Acta Pedologica Sinica,1956(2):99-115.
- [2] 陈永宗.黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J].地理科学,1984(4):321-327.  
CHEN Y Z. The classification of gully in hilly loess region in the middle reaches of the Yellow River[J].Scientia Geographica Sinica,1984(4):321-327.
- [3] 景可.黄土高原沟谷侵蚀研究[J].地理科学,1986(4):340-347.  
JING K. A study of gully erosion on the Loess Plateau [J].Scientia Geographica Sinica,1986(4):340-347.
- [4] 徐国礼,周佩华,王文龙,等.沟道侵蚀与地面遥感监测研究[J].水土保持学报,1991(2):22-24.  
XU G L, ZHOU P H, WANG W L, et al. Study on the gully eroison and remote sensing of gound[J].Journal of Soil and Water Conservation,1991(2):22-24.
- [5] THWAITES R N, BROOKS A P, PIETSCH T J, et al. What type of gully is that? The need for a classification of gullies [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022,47(1):109-128.
- [6] 席承藩.朱显谟教授对黄土区土壤研究的贡献[J].水土保持研究,1995(4):8-9.
- [7] 朱显谟.董志原区土壤侵蚀及其分类的初步意见[J].新黄河,1953(9):37-40.
- [8] 席承藩,程云生,黄自立.陕北绥德董园沟土壤侵蚀情况及水土保持办法[J].土壤学报,1953(3):148-166.
- [9] 朱显谟,张相麟,雷文进.泾河流域土壤侵蚀现象及其演变[J].土壤学报,1954(4):209-222.
- [10] 朱显谟.暂拟黄土区土壤侵蚀分类系统[J].新黄河,1955(7):29-34.
- [11] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956(3):201-222.  
LUO L X. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau[J].Acta Geographica Sinica,1956(3):201-222.
- [12] 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(1):9-18.  
LIU Y B, ZHU X M, ZHOU P H, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau[J].Memoir of NISWC, Academia Sinica, 1988(1):9-18.
- [13] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生



- 产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
- LIU B Y, YANG Y, LU S J. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation[J].Science of Soil and Water Conservation,2018,16(1):9-16.
- [14] 张光辉,杨扬,符素华,等.切沟侵蚀预报研究进展与展望[J].地球科学进展,2022,37(6):551-562.
- ZHANG G H, YANG Y, FU S H, et al. Advances and prospects of gully erosion prediction[J].Advances in Earth Science,2022,37(6):551-562.
- [15] 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.
- ZHENG F L, XU X M, QIN C. A review of gully erosion process research[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8):48-59.
- [16] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- CHEN T D, JIAO J Y, WANG H L, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J].Acta Pedologica Sinica,2020,57(3):547-564.
- [17] 李建军,陈玉兰,焦菊英,等.基于多元非线性空间建模的拉萨河流域沟蚀发生风险探测[J].农业工程学报,2022,38(17):73-82.
- LI J J, CHEN Y L, JIAO J Y, et al. Detecting gully occurrence risks using multivariate nonlinear spatial modeling in the Lhasa River Basin of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(17):73-82.
- [18] CASTILLO C, G\OMEZ J A. A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches[J].Earth Science Reviews,2016,160:300-319.
- [19] SMOLSKA E. Development of gullies and sediment fans in last-glacial areas on the example of the Suwałki Lakeland(NE Poland)[J].Catena,2007,71(1):122-131.
- [20] OLEFELDT D, GOSWAMI S, GROSSE G, et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes[J].Nature Communications,2016,7:e13043.
- [21] LUO J, NIU F J, LIN Z J, et al. Inventory and frequency of retrogressive thaw slumps in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau[J].Geophysical Research Letters,2022,49(23):e2022GL099829.
- [22] 曹雪,焦菊英,李建军,等.青藏高原柴达木盆地东部地区的土壤侵蚀现状调查[J].水土保持通报,2021,41(5):1-8.
- CAO X, JIAO J Y, LI J J, et al. Investigation on current status of soil erosion in Eastern Qaidam Basin of Qinghai-Tibet Plateau[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2021,41(5):1-8.
- [23] LI C R, YANG X, LIU H L, et al. Spatial distribution characteristics of discontinuous hillslope gullies on the Loess Plateau of China: A special focus on spoon gullies[J].Catena,2022,215:e106327.
- [24] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素 II [J].水土保持通报,1981(4):13-18.
- [25] GUO M M, YANG B, WANG W L, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J].Geomorphology,2019,345:e106847.
- [26] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622-628.
- TIAN J, TANG G A, ZHOU Y, et al. Spatial variation of gully density in the Loess Plateau[J].Scientia Geographica Sinica,2013,33(5):622-628.
- [27] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2020,34(5):1-13.
- ZHANG G H. Advances and prospects for gully erosion researches[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(5):1-13.
- [28] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J].Catena,2003,50(2/3/4):91-133.