

# 基于 RTK - GPS 技术的干热河谷冲沟沟头 形态特征

李佳佳<sup>1,2,3</sup>, 熊东红<sup>1,2\*</sup>, 卢晓宁<sup>3</sup>, 董一帆<sup>1,2</sup>, 苏正安<sup>1,2</sup>, 翟娟<sup>1,2,3</sup>, 杨丹<sup>1,2,4</sup>

(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. 成都信息工程学院资源环境学院, 四川 成都 610225; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 采用高精度实时动态差分 GPS(以下简称 RTK - GPS)技术对干热河谷冲沟进行野外调查, 获取 36 个不同活跃度类型沟头的形态参数, 研究不同活跃度类型之间沟头的形态特征差异, 并分析集水区、沟床植被盖度与形态特征之间的关系。结果表明: 1. 沟头不同活跃度类型之间, 其跌坎高差、沟床比降差异最为显著, 可作为沟头活跃度类型野外判别的主要参考指标; 沟壁坡度、宽 - 深比等的差异较为显著, 亦可在一定程度上表征沟头活跃程度。2. 沟床植被盖度与各形态特征参数的相关性显著, 表明沟床植被盖度可作为形态参数的综合替代性指标。同一活跃度类型的沟头, 其跌坎高差、沟床比降等与沟床植被盖度呈极显著负相关关系, 说明随着沟床植被盖度的增加 (或减小), 跌坎高差、沟床比降均呈减小 (或增加) 趋势。3. 集水区植被盖度与各形态特征参数的关系不显著, 表明干热河谷集水区植被盖度对沟头发育的贡献有限。

**关键词:** 冲沟形态特征; 沟头活跃度; 植被盖度; RTK - GPS 技术

**中图分类号:** S157

**文献标志码:** A

金沙江干热河谷是我国西南地区特殊的脆弱生态环境类型区<sup>[1-3]</sup>, 冲沟侵蚀<sup>[4-5]</sup>是其突出的生态环境问题之一。冲沟发育导致土地退化过程加速, 水土流失严重。在元谋干热河谷冲沟发育地带, 侵蚀模数可高达  $1.64 \times 10^4 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[6]</sup>。沟头是冲沟形态变化及侵蚀产沙最剧烈的部位之一, 其活跃程度决定着整个冲沟的发展方向。研究冲沟发育、沟头活跃度类型和沟头形态特征的相互关系, 对该区有针对性地开展冲沟治理具有重要意义。

国内外学者对冲 (切) 沟侵蚀给予了广泛关注, 相关研究主要集中于冲沟侵蚀的影响因子及其临界

值<sup>[7-12]</sup>、相关的定性、经典统计模型研究<sup>[13-17]</sup>、侵蚀产沙效应监测<sup>[18-21]</sup>、集水区土地利用对沟头侵蚀速率的影响<sup>[22]</sup>等方面。但是, 在冲沟沟头形态特征方面的研究<sup>[23-25]</sup>鲜有报道。王小丹等<sup>[6,23]</sup>运用分形几何学理论, 对沟头的分形弯曲度和土壤分形特征进行了分析; 伍永秋等<sup>[19-20]</sup>利用 RTK - GPS 技术对东北漫川漫岗黑土区所发育的切沟进行了监测。然而, 沟头活跃程度与其形态特征之间关系的研究目前尚不多见。

冲沟沟头的活跃程度突出体现在土壤流失量及沟头前进速率两方面, 然而目前大多数地区均较难

**收稿日期** (Received date): 2012 - 11 - 11; **改回日期** (Accepted): 2014 - 06 - 08。

**基金项目** (Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCXZ - EW - QN317); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所“青年百人团队”项目 (SDSQB - 2011 - 01); 国家自然科学基金 (40901009; 41071013)。[ This research is supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCXZ - EW - QN317), the "Youth Talent Team Program" of Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (Grant No. SDSQB - 2011 - 01) and the Natural Science Foundation of China (Grant No. 40901009 and Grant No. 41071013). ]

**作者简介** (Biography): 李佳佳 (1988 - ), 女, 硕士研究生。主要研究方向为环境遥感、冲沟侵蚀。[ Li Jiajia, female, postgraduate, major in environment remote sensing and gully erosion. ] E - mail: xizangjiadashan110@163.com

**\* 通信作者** (Corresponding author): 熊东红 (1974 - ), 男, 博士, 研究员。主要从事冲沟侵蚀、土壤物理和植被恢复等研究。[ Xiong Donghong, male, doctor, professor, major in gully erosion, soil physics and vegetation recovery. ] E - mail: dhxiong@imde.ac.cn

实现对这两个因子的可靠监测。长期野外调查发现,随着冲沟沟头由活跃向稳定状态发育,其形态特征亦发生较明显变化。本文采用RTK-GPS技术对干热河谷冲沟进行野外调查,研究了冲沟不同活跃度类型沟头的形态参数(如跌坎高差、沟壁坡度、沟床比降等)以及集水区、沟床的植被盖度,得出冲沟不同活跃度类型沟头的形态特征,并对形态特征和植被盖度进行了相关分析。本文的研究成果可为野外快捷、迅速地判定沟头活跃度类型及大面积冲沟治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究主要依托中科院成都山地所与云南省农科院合建的元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站(以下简称“元谋站”),该站位于 $101^{\circ}48'48''\sim 101^{\circ}49'54''\text{E}$ , $25^{\circ}50'30''\sim 25^{\circ}51'18''\text{N}$ ,位于金沙江干热河谷元谋盆地,在行政区划上隶属于云南省元谋县。元谋盆地气候干、热,年均温 $21.9^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 $615.1\text{ mm}$ ,主要集中在6—10月的雨季,占年降雨量的90%以上,旱季(11—5月)长达7个月之久,年蒸发量高达 $3\,911.2\text{ mm}$ ,是降水量的6.4倍多,年均干燥度为 $2.8^{[26]}$ 。干湿季分明和降雨集中的气候条件、松散的岩性以及具有强烈膨胀收缩特性的土壤,导致元谋盆地冲沟极为发育,水土流失严重。植被以稀树灌木草丛为主,森林覆盖率极低,仅为 $3.4\%\sim 6.3\%^{[27]}$ 。冲沟发育的元谋组地层为第四系河湖相沉积物,具有结构松散、胶结度差、粘砂互层、层与层组成物质差异显著等特征 $^{[28]}$ 。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 野外调查

采用RTK-GPS,共计调查了元谋站附近的36个冲沟沟头。该36个冲沟沟头发育在方圆约 $1\text{ km}^2$ 的一缓坡台地上,岩性均为第四纪燥红土,集水区坡度多在 $10^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 之间。

调查项目:沟床比降、沟壁坡度、沟头宽度、集水区植被盖度、沟床植被盖度等。根据活跃程度(主要体现在新崩积物的多少及崩塌断面的新鲜程度等方面),从表观上初步将研究区冲沟沟头分为5种类型:极活跃型、活跃型、较活跃型、较稳定型、稳定型。不同活跃度类型沟头的形态(以极活跃型、较活跃型及稳定型沟头为例)如图1所示。

调查使用仪器:采用美国天宝(Trimble)公司生产的RTK-GPS(Trimble R8),其配置主要包括全球卫星导航系统(GNSS)接收机两台(分别作为基站和流动站)、PDL电台一部以及TCS2手簿一台。工作原理是:基于载波相位观测值的实时动态定位技术,获得高精度的地理坐标数据。仪器精度为水平精度 $1\pm 0.0001\text{ cm}$ ,垂直精度 $2\pm 0.0001\text{ cm}^{[29]}$ 。

#### 1.2.2 室内分析

测量数据的室内分析主要是在ArcGIS软件中进行。具体操作步骤为:

1. 将RTK-GPS测得的数据以点文件形式导入到ArcGIS软件中;
2. 在ArcGIS中,沿着冲沟沟壁和沟底添加隔断线,其中沟底为shapefile的线文件,沟壁生成shapefile的面文件 $^{[19]}$ ;
3. 利用Arc Map的3D Analyst工具,使用地形点和隔断线数据生成不规则三角网的Tin模型;
4. 通过Convert Tin to Grid工具,将冲沟的Tin转换生成冲沟的DEM(图2),冲沟DEM统一的分辨率为 $0.1\text{ m}$ ;
5. 利用DEM提取冲沟不同活跃度类型沟头的形态参数,主要包括沟头跌坎高差、平均深度及最大深度等。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同活跃度类型沟头的形态特征

#### 2.1.1 沟头的跌坎高差

在坡面集水区与沟床交接处,常会因跌水冲刷形成具有一定高差的跌坎。坡面集水区的径流量越大,沟头汇聚而成的跌水的冲刷力越强,因冲刷而形成的跌坎的高差就越大,沟头的下切及崩塌活动发生就愈频繁。

跌坎高差是通过先将RTK-GPS测得的数据,以点文件形式导入到ArcGIS软件平台上,然后提取沟壁点与其下方对应的沟底点的高程,计算高程差,即跌坎高差。表1中跌坎高差,是指对各个沟头跌坎高差取6次重复后而得出的平均值。由表1及图3中可以看出调查的各活跃度类型沟头的跌坎高差:

1. 随着沟头类型由极活跃型向稳定型转变,跌坎高差呈明显的由高到低的规律性变化。跌坎平均高差,由极活跃沟头的 $1.8\text{ m}$ ,降至活跃和较活跃沟头 $1.4\text{ m}$ 、 $0.9\text{ m}$ ,至稳定沟头则大多无明显跌坎,平

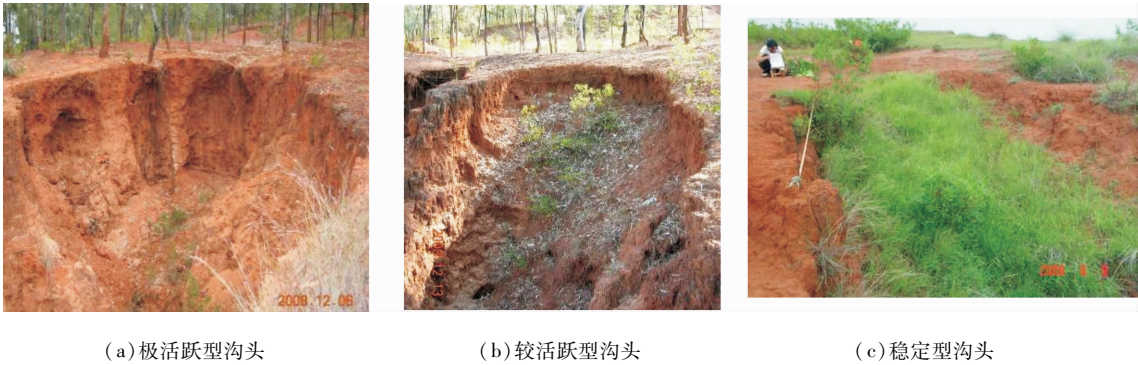


图 1 不同活跃度类型沟头实地照片

Fig. 1 Gully head photos of different active degree type

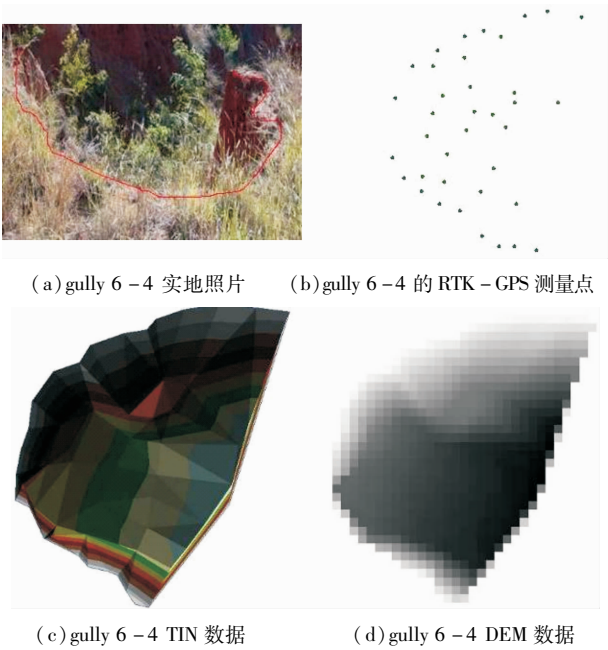


图 2 冲沟野外测量数据处理过程(以 gully 6-4 为例)

Fig. 2 Process of gully field measurement data—take gully 6-4 for an example

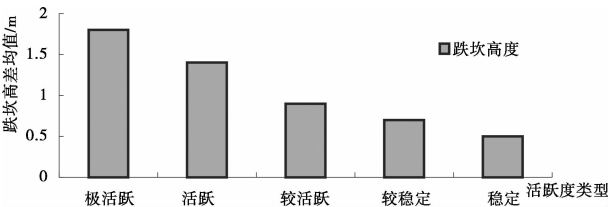


图 3 不同活跃度类型沟头的跌坎高差平均值

Fig. 3 Average of gully head's backward step in different active degree type

均跌坎高差仅为 0.5 m。可见,伴随沟头由活跃状态向稳定状态发育,跌水冲刷力趋于降低,溯源侵蚀活动趋于减弱,沟头跌坎高差逐渐趋于减缓、消失。

2. 跌坎高差可作为判断沟头活跃程度的重要指标之一。极活跃沟头及活跃沟头有明显跌坎,且跌

表 1 各活跃度类型沟头的跌坎高差

Table 1 Backward step of gully head of different active degree /m

沟头 类型	沟头 编号	跌坎 高差	平均值	跌坎高差极值		变异 系数
				极大值	极小值	
极 活 跃	4-3	2.6	1.8	2.6	1.4	21.7%
	5-1	1.8				
	5-2	1.4				
	5-5	1.4				
	5-6	2.0				
	6-2	1.7				
	6-4	2.0				
	7-6	1.7				
活 跃	7-7	1.4	1.4	1.7	1.0	26.4%
	4-2	1.1				
	6-6	1.0				
	7-1	1.7				
	7-5	1.7				
较 活 跃	4-4	0.9	0.9	1.2	0.5	31.1%
	5-3	0.5				
	5-4	0.7				
	6-1	0.8				
	6-5	1.2				
	6-7	1.2				
	7-4	1.2				
较 稳 定	3-2	0.6	0.7	0.8	0.4	24.3%
	3-4	0.4				
	3-5	0.8				
	4-1	0.7				
	4-5	0.5				
稳 定	7-2	0.8	0.5	0.6	0.3	20%
	7-3	0.8				
	1-1	0.5				
	2-1	0.6				
	2-2	0.5				
	2-3	0.5				
	3-1	0.3				
	3-3	0.3				
	6-3	0.6				
	8-1	0.6				
	8-2	0.5				

坎高差均大于 1 m,最大可达 2.6 m;而稳定沟头则大多无明显跌坎,最小的跌坎高差仅为 0.3 m。野外考察也发现,凡跌坎高差大的地方,跌水落差大,跌水对沟头下部土体的掏蚀作用愈强,沟头上部土体就愈容易失稳而发生崩塌,沟头就愈为活跃,土壤侵蚀愈严重;反之亦然。因而跌坎高差大小是冲沟沟头活跃程度的重要表征之一。在野外可初步利用跌坎高差大小判断冲沟溯源侵蚀活跃状况,可为冲沟发育地带分类分区大面积治理提供一定的参考。

2.1.2 沟头的沟壁坡度

由于频繁的崩塌发生,研究区冲沟活跃沟头形成“陡立的沟壁”,其沟壁坡度常在 80°~90°之间<sup>[26]</sup>。一般而言,沟壁坡度越大,其受重力作用而发生崩塌的可能性也就越大<sup>[30]</sup>,沟头发育也愈为活跃。调查的各活跃度类型沟头的沟壁坡度值见表 2。

由表 2 及图 4 中可以看出:

1. 稳定型沟头的沟壁坡度与其他 4 种活跃度类型沟头的差异较为明显。除稳定型外,其他类型沟头的沟壁坡度都较大(平均沟壁坡度都>80°),但彼此之间差异不甚明显;稳定型沟头的沟壁坡度值普遍偏小,调查的 9 个稳定型沟头中,仅有 3-3 号和 6-3 号 2 个沟头的沟壁坡度值大于 70°,其余沟头的沟壁坡度多分布在 30°~70°之间,其平均值仅为 57.0°。可见,由于稳定沟头的沟壁基本上无崩塌发生,原有沟壁面在流水侵蚀作用下,坡度不断减缓。而极活跃、活跃等 4 种类型沟头则由于溯源侵蚀活动相对剧烈,其沟壁较易发生崩塌,沟壁坡度较陡。

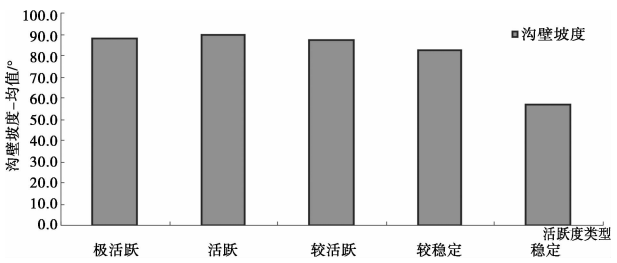


图 4 不同活跃度类型沟头的沟壁坡度平均值

Fig.4 Average of gully head's furrow bank slope in different active degree type

2. 同一活跃度类型沟头之间的沟壁坡度差异不尽相同。极活跃、活跃及较活跃沟头的沟壁坡度变异系数分别为:2.0%、1.2%、2.6%,说明这 3 种活跃度类型沟头的溯源侵蚀作用都比较强烈,沟壁

易发生崩塌,其坡度值普遍偏大,因而变异系数较小;较稳定及稳定沟头的沟壁坡度变异系数较大,原因可能在于各沟头有无沟壁崩塌发生的情况不一样。沟壁若有崩塌发生,则沟壁坡度较大,相反,若无崩塌发生,在流水作用下,原有沟壁断面的坡度则会减缓,因而这 2 种活跃度类型沟头的沟壁坡度变异系数较大。

表 2 各活跃度类型沟头的沟壁坡度表

Table 2 Furrow bank slope of gully head of different active degree						
沟头类型	沟头编号	沟壁坡度 /°	平均值 /°	沟壁坡度极值/°		变异系数
				极大值	极小值	
极活跃	4-3	85.5	88.0	90.0*	85.5	2.0%
	5-1	90.0*				
	5-2	87.0				
	5-5	86.2				
	5-6	87.3				
	6-2	87.3				
	6-4	90.0*				
	7-6	90.0*				
	7-7	88.7				
活跃	4-2	87.9	89.5	90.0*	87.9	1.2%
	6-6	90.0*				
	7-1	90.0*				
	7-5	90.0*				
较活跃	4-4	89.7	87.4	90.0*	83.6	2.6%
	5-3	83.6				
	5-4	87.2				
	6-1	86.2				
	6-5	90.0*				
	6-7	86.6				
	7-4	88.5				
较稳定	3-2	88.7	82.2	90.0*	52.8	16.5%
	3-4	52.8				
	3-5	87.9				
	4-1	78.8				
	4-5	90.0*				
	7-2	87.3				
	7-3	90.0*				
稳定	1-1	38.0	57.0	87.3	31.0	33.6%
	2-1	41.1				
	2-2	64.0				
	2-3	58.0				
	3-1	31.0				
	3-3	87.3				
	6-3	79.0				
	8-1	47.4				
	8-2	67.1				

注:①沟壁坡度通常是指沟壁的铅直高度与水平宽度之比。表中沟壁坡度值是在野外实地调查时用坡度尺量测而得出的。  
②90.0°表示沟壁向内凹进,形成负地形,这里统一记为沟壁坡度极限值 90.0°。

3. 野外考察发现,沟壁坡度大的地方大多发育有凹洞,沟头上部土体容易失稳而发生崩塌,沟头多属于活跃型,土壤侵蚀严重,反之亦然。沟壁坡度在沟头溯源侵蚀作用下不断发生变化,并影响崩塌发生,它可在一定程度上表征沟头的活跃程度,但必须结合其他形态参数(如跌坎高差)综合考虑,才能准确地判断沟头的活跃度类型。

2.1.3 不同活跃度类型沟头的沟床比降

沟床比降大小反映沟床部位侵蚀与淤积平衡状况,沟床比降越大,表明沟床以侵蚀活动占主导,沟床比降越小,表明侵蚀活动减弱,淤积活动占主导。各活跃度类型沟头的沟床比降值见表3。

由表3及图5可以看出:

1. 随着沟头活跃度类型由极活跃向稳定转变,沟床比降(均值)呈现出规律性的由高到低的变化趋势。沟床比降平均值,由极活跃沟头的44.9°,降至活跃和较活跃沟头的37.6°、28.9°,至稳定沟头的20.2°。可见,伴随沟头由活跃状态向稳定状态发育,跌水冲刷作用趋于减弱,泥沙易在沟床发生淤积,使得沟床地形趋于变缓,从而使沟床比降值趋于减小。

2. 沟床比降可作为判断沟头活跃程度的重要指标之一。极活跃和活跃沟头的沟床比降普遍偏大,最大可达67.7°(4-3号沟);而较稳定和稳定沟头的沟床比降则普遍偏小,最小仅为4°。野外考察也发现,凡沟床比降大的地方,跌水冲刷作用强,跌水对沟床的侵蚀、改造作用亦愈强,沟头就愈为活跃,反之亦然,因而沟床比降大小是冲沟沟头活跃程度的重要表征之一。

2.1.4 不同活跃度类型沟头的宽-深比

借鉴景可<sup>[31]</sup>对切沟侵蚀发展方式的研究,冲沟发育过程亦可以阐述为三个方面:一是沟头的溯源侵蚀导致冲沟不断加长,二是沟壁的重力及流水

侵蚀导致冲沟宽度不断扩展,三是沟床在流水侵蚀作用下导致深度不断下切。宽-深比是指沟头的宽度与平均沟深之间的比值。各活跃度类型沟头的宽-深比见表4。

由表4及图6可以看出:

1. 随着沟头活跃度类型由极活跃向稳定转变,宽-深比(均值)呈现出由低到高的变化趋势。极活跃和活跃沟头的宽-深比普遍偏小,多分布在1-4之间,彼此差异不太明显;对于较活跃沟头,除

表3 各活跃度类型沟头的沟床比降表						
Table 3 Gully bed slope of different active degree						
沟头类型	沟头编号	沟床比降 /°	平均值 /°	沟床比降极值/°		变异系数
极活跃	4-3	67.7	44.9	67.7	13.0	38.0%
	5-1	64.1				
	5-2	47.1				
	5-5	13.0				
	5-6	48.4				
	6-2	47.0				
	6-4	30.5				
	7-6	53.0				
活跃	7-7	33.3	7.6	44.0	30.0	16.0%
	4-2	44.0				
	6-6	40.3				
	7-1	36.0				
较活跃	7-5	30.0	28.9	46.0	18.0	36.7%
	4-4	18.0				
	5-3	24.0				
	5-4	22.0				
	6-1	30.0				
	6-5	40.7				
	6-7	21.8				
较稳定	7-4	46.0	22.7	34.0	4.0	52.2%
	3-2	34.0				
	3-4	4.0				
	3-5	8.0				
	4-1	31.3				
	4-5	30.0				
	7-2	26.8				
稳定	7-3	24.7	20.2	27.4	8.0	30.6%
	1-1	18.0				
	2-1	19.6				
	2-2	19.0				
	2-3	15.3				
	3-1	8.0				
	3-3	22.0				
	6-3	27.4				
	8-1	26.1	26.2			
	8-2	26.2				

注:沟床比降是在野外实地调查时用坡度尺测得的,表中各沟头的沟床比降值亦是指对沟床比降取6次重复后的平均值。

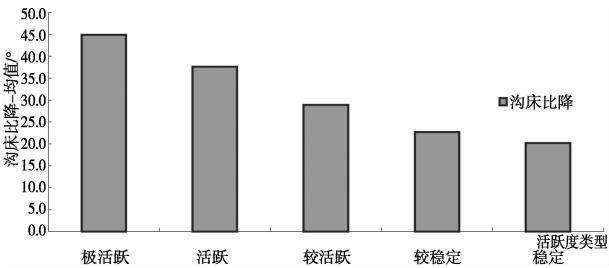


图5 不同活跃度类型沟头的沟床比降平均值

Fig.5 Average of gully head's gully bed slope in different active degree type

表 4 各活跃度类型沟头的宽 – 深比值一览表  
Table 4 Width-deep ration of gully head of different active degree

沟头 类型	沟头 编号	宽度 /m	平均沟 深/m	宽 – 深比	宽 – 深比			变异 系数
					平均值	极大	极小	
极 活 跃	4 – 3	5.1	2.8	1.8				
	5 – 1	3.3	1.3	2.6				
	5 – 2	4.1	1.3	3.2				
	5 – 5	3.1	1.7	1.8				
	5 – 6	3.5	2.5	1.4	2.1	3.2	1.4	27.1%
	6 – 2	4.0	1.8	2.2				
	6 – 4	2.9	1.9	1.6				
	7 – 6	2.3	1.3	1.7				
活 跃	7 – 7	7.3	3.2	2.3				
	4 – 2	5.6	2.0	2.8				
	6 – 6	2.6	1.1	2.3	2.8	3.7	2.2	24.6%
	7 – 1	4.4	1.2	3.7				
较 活 跃	7 – 5	4.7	2.1	2.2				
	4 – 4	4.0	0.5	7.5				
	5 – 3	5.7	1.7	3.4				
	5 – 4	3.2	1.0	3.2				
	6 – 1	4.5	1.4	3.2	3.6	7.5	1.9	50.8%
	6 – 5	3.0	1.3	2.3				
	6 – 7	3.9	1.1	3.6				
	7 – 4	5.1	2.7	1.9				
较 稳 定	3 – 2	3.9	1.1	3.4				
	3 – 4	7.0	0.7	10.1				
	3 – 5	3.9	1.2	3.3				
	4 – 1	3.4	0.7	4.7	4.7	10.1	2.8	54.9%
	4 – 5	3.1	1.0	3.1				
	7 – 2	3.9	0.7	5.7				
	7 – 3	2.6	0.9	2.8				
稳 定	1 – 1	4.5	0.7	6.1				
	2 – 1	8.3	0.7	12.8				
	2 – 2	4.4	0.6	7.5				
	2 – 3	7.1	0.6	11.1				
	3 – 1	7.3	0.5	15.5	8.9	15.5	3.5	43.0%
	3 – 3	4.4	1.3	3.5				
	6 – 3	7.6	1.5	5.1				
	8 – 1	7.6	0.8	9.6				
	8 – 2	6.1	0.7	8.7				

注:沟头宽度是在野外用皮尺实地量测出来的值;平均沟深是在 GIS 平台上处理各沟头所生成的 DEM 数据时,系统根据各沟头的野外 RTK – GPS 实测数据自动统计出来的值;表中宽 – 深比是指沟头宽度与平均沟深的比值。

4 – 4 号沟的宽 – 深比偏大外,其余沟头的宽 – 深比均在 3 左右;较稳定及稳定沟头的宽 – 深比普遍偏大,其均值分别为 4.7、8.9,其中 3 – 1 号沟头宽 – 深比可达 15.5。可见,活跃沟头以沟床下切作用为主导,沟的深度值增大,而由侧蚀引起的沟头拓宽作用则相对较弱,因而宽 – 深比较小;伴随沟头由活跃状态向稳定状态发育,流水侵蚀作用减弱,泥沙易

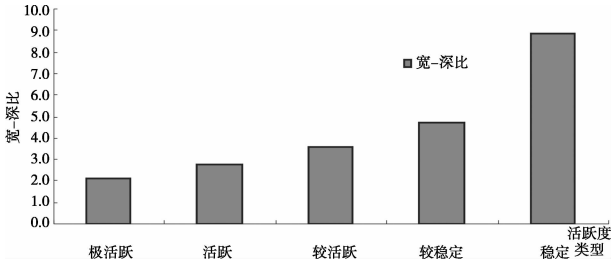


图 6 不同活跃度类型沟头的宽 – 深比

Fig. 6 Average of gully head’s width-deep ration in different active degree type

在沟床发生淤积,从而使沟的深度趋于减小,加上沟头拓宽速率相对较慢,因而宽 – 深比逐渐增大。

2. 不同活跃度类型沟头之间,其宽 – 深比参数值呈现明显差异。不同活跃度类型沟头,其单个的宽度和深度往往不具有可比性,如果仅从沟头宽度或沟的深度单方面判别沟头活跃度类型,易引起误判。本文综合考虑了沟头宽度和沟深等因素,结果发现,宽 – 深比随着活跃度类型的不同呈现规律性的变化,说明宽 – 深比不失为判定沟头活跃度类型的一个有效指标。

2.2 不同活跃度类型沟头的植被盖度

调查沟头的集水区及沟床植被盖度情况见表 5。

2.2.1 集水区植被盖度

在对元谋站附近 36 个冲沟沟头的调查研究中,发现不同活跃度类型沟头的集水区植被盖度差异不大(图 7),无明显规律性。例如沟头 4 – 2、5 – 6、6 – 4、6 – 6、7 – 2 等,它们虽然处于活跃或较活跃状态,但其集水区的植被盖度却高达 90% 以上。说明集水区的植被盖度可能与沟头的活跃程度关系不甚明显。

野外长期考察发现,干热河谷沟头溯源侵蚀包含一系列子过程:沟头汇流形成跌水→跌水冲蚀形成跌穴→跌穴积水侧蚀,形成沟头内凹洞→内凹洞不断扩大并掏空沟壁,重力作用下导致崩塌发生→崩积物随后被径流搬移,至此沟头的前进完成一个轮回,由此循环往复,沟头就不断前进。因而沟头溯源侵蚀多是从下游往上游发展,它与发生在沟头处跌水的侵蚀作用及崩塌等活动密切相关,而上游集水区的植被盖度主要影响汇聚径流的速率大小,对沟头跌水的总径流量影响不大,跌水的势能也主要由跌坎高差及跌水量的大小决定。因而,即使沟头集水区植被盖度较高,其沟头的发育仍可能很活跃,

如 4-2 号沟。集水区与冲沟发育的关系还有待进一步研究。

表 5 各活跃度类型沟头的集水区及沟床植被盖度表  
Table 5 Vegetation coverage of gully head's catchments and gully bed of different active degree /%

沟头 类型	沟头 编号	集水区		沟床	
		植被盖度	平均值	植被盖度	平均值
极活跃	4-3	45.0		3.0	
	5-1	55.0		1.0	
	5-2	45.0		5.0	
	5-5	85.0		8.0	
	5-6	90.0	59.2	3.0	4.3
	6-2	85.0		6.0	
	6-4	90.0		10.0	
	7-6	3.0		2.0	
活跃	7-7	35.0		1.0	
	4-2	90.0		30.0	
	6-6	92.0	90.0	25.0	25.0
	7-1	93.0		20.0	
较活跃	7-5	85.0		25.0	
	4-4	90.0		40.0	
	5-3	75.0		50.0	
	5-4	30.0		50.0	
	6-1	90.0	78.6	40.0	53.6
	6-5	80.0		40.0	
较稳定	6-7	95.0		85.0	
	7-4	90.0		70.0	
	3-2	80.0		65.0	
	3-4	92.0		66.0	
	3-5	90.0		85.0	
	4-1	90.0	89.7	70.0	71.6
稳定	4-5	93.0		60.0	
	7-2	93.0		90.0	
	7-3	90.0		65.0	
	1-1	40.0		90.0	
	2-1	1.0		95.0	
	2-2	88.0		92.0	
	2-3	2.0		90.0	
	3-1	90.0	57.2	93.0	92.6
	3-3	75.0		90.0	
	6-3	92.0		95.0	
	8-1	97.0		95.0	
	8-2	30.0		93.0	

注:集水区与沟床的植被盖度是在野外实地调查时,采用目视估测与样方调查相结合的方法而获取的。

2.2.2 沟床植被盖度

不同活跃度类型沟头,其沟床植被盖度存在明显差异,如图 8 所示。一般而言,活跃或较活跃沟头的沟床植被盖度相对较低,有时甚至接近于 1% (如

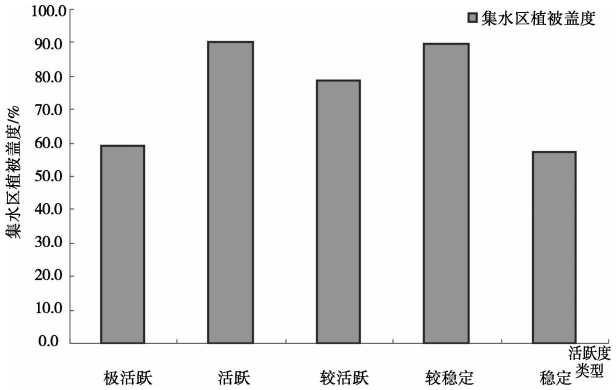


图 7 不同活跃度类型沟头的集水区植被盖度  
Fig. 7 Average vegetation coverage of gully head's catchments in different active degree type

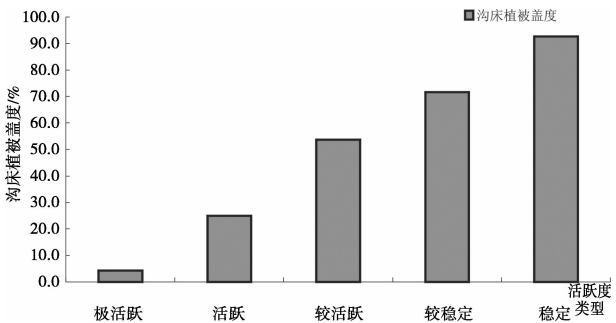


图 8 不同活跃度类型沟头的沟床植被盖度差异  
Fig. 8 Average vegetation coverage of gully bed in different active degree type

5-1 号沟),而稳定沟头的沟床植被盖度却高达 95% (如 2-1 号沟)。

野外考察发现,凡沟床植被盖度高的地方,侵蚀阻力大,对径流的拦沙消能效应明显,泥沙在植被作用下不断向沟头方向淤积,沟床比降降低,沟头就愈趋于稳定,反之亦然。此外,沟床植被盖度的大小也是沟床侵蚀与淤积过程的综合体现:沟头越活跃,其侵蚀作用越强烈,先锋物种越不易在沟床侵蚀地带扎根、存活,因而植被盖度越低。

综合以上分析,沟床植被盖度也是表征沟头活跃度类型的一个有效指标。

2.3 不同活跃度类型沟头植被盖度与其形态特征的关系

2.3.1 集水区植被盖度与各形态参数的相关分析

由表 6 可知,集水区植被盖度与各沟头形态参数的相关系数均比较低,且显著性概率值  $P$  均大于 0.05 的显著水平,说明集水区植被盖度与跌坎高差、沟壁坡度等表征沟头侵蚀活跃程度的形态参数

之间基本上不存在相关性,二者没有直接联系。这也部分解释了“集水区植被生长良好但冲沟仍然发育”现象的原因,说明今后的冲沟治理模式,不应仅仅考虑在集水区植树造林。

表 6 集水区植被盖度与各形态参数的相关分析结果  
Table 6 Relevant analysis results between morphological parameters and catchments vegetation coverage

集水区植被盖度与各形态参数 的相关分析统计值	形态参数		
	跌坎高差	沟壁坡度	沟床比降
Pearson 相关系数	-0.037	0.254	-0.132
显著性概率值 $P$	0.830	0.135	0.444

2.3.2 沟床植被盖度与各形态参数的相关分析

由表 7 可知,沟床植被盖度与跌坎高差、沟壁坡度及沟床比降等形态参数的相关系数分别为 -0.829、-0.590、-0.660,显著性概率值  $P < 0.01$ ,故可以认为沟床植被盖度与各形态参数之间

呈强负线性相关。沟床植被盖度与各形态参数的回归方程及曲线分别见表 8、图 9。

表 7 沟床植被盖度与各形态参数的相关系数  
Table 7 Relevant analysis results between morphological parameters and gully bed vegetation coverage

沟床植被盖度与各形态参数的 相关分析统计值	形态参数		
	跌坎高差	沟壁坡度	沟床比降
Pearson 相关系数	-0.829	-0.590	-0.660
显著性概率值 $P$	0.000	0.000	0.000

由表 8 和图 9 可知:

1. 沟床植被盖度与跌坎高差、沟床比降呈负相关。随着沟床植被盖度的增大,跌坎高差、沟床比降这两个形态参数值趋于减小,其原因可能是沟床植被盖度愈大,其侵蚀阻力愈大,泥沙易在沟床上发生淤积,并不断向沟头方向发展,从而使沟床比降和跌坎高差都有所降低。

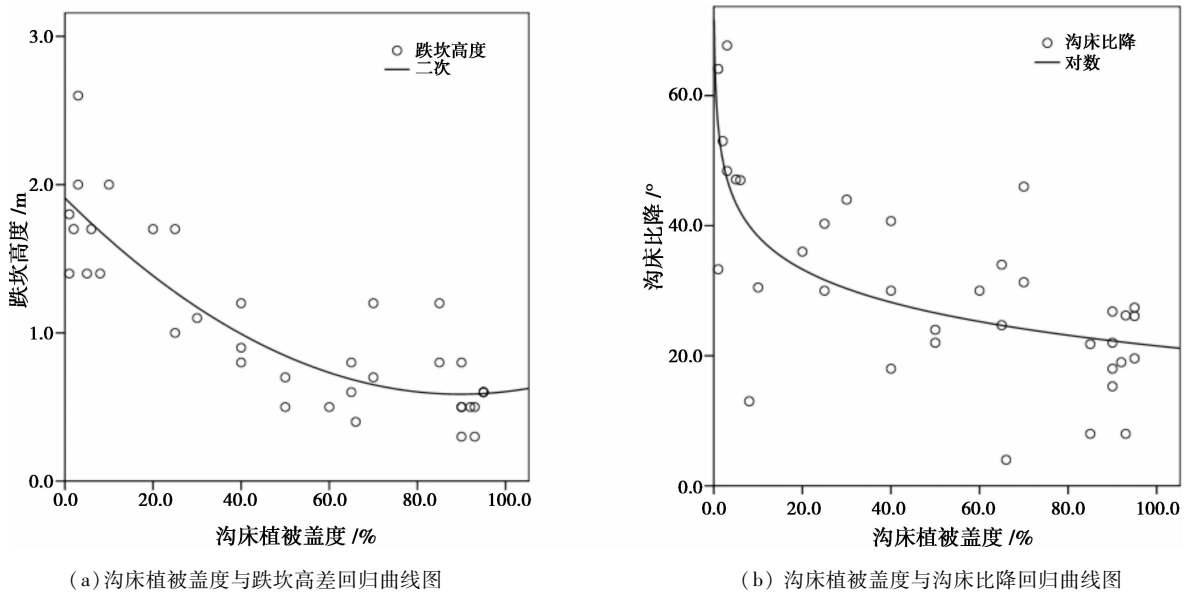


图 9 沟床植被盖度与各形态参数的回归曲线

Fig. 9 Regression curve of morphological parameters and gully bed vegetation coverage

表 8 各形态参数与沟床植被盖度的回归分析结果  
Table 8 Regression analysis results between morphological parameters and gully bed vegetation coverage

形态参数 (Y)	各形态参数与沟床植被盖度 (X) 的回归分析结果			
	回归方程	Adjusted $R^2$	显著性概率值 $P$	显著水平
跌坎高差	$Y = 1.909 - 0.029X$	0.729	0.010	达到 0.01 的显著水平
沟壁坡度	$Y = 85.935 + 0.383X - 0.007X^2$	0.430	0.012	达到 0.05 的显著水平
沟床比降	$Y = 55.196 - 7.313\ln x$	0.464	0.000	达到 0.01 的显著水平



2. 由上文中的分析可知,不同活跃度类型沟头,其跌坎高差、沟床比降存在明显差异,且呈规律性变化;沟床植被盖度亦是如此。此外,沟床植被盖度又与跌坎高差、沟床比降密切相关,因而沟床植被盖度可作为判断沟头活跃度的形态参数的综合替代性指标。

3. 沟床植被盖度与沟壁坡度的关系较小,在此不做阐述。

### 3 讨论与小结

1. 冲沟沟头形态的量化研究少有报道,以往研究多集中于定性研究。本文利用 RTK-GPS 技术,研究了冲沟沟头不同活跃度类型跌坎高差、沟壁坡度等形态参数的差异,提出了不同活跃度类型冲沟沟头的形态特征。

2. 本文提出的形态参数指标,如跌坎高差、沟壁坡度、沟床比降等,具有较强的实践指导意义。王小丹运用分形几何学理论研究了冲沟沟头的分形弯曲度和土壤分形特征,提出了“分形维数越大,冲沟沟头越发育”结论。但本文提出的形态指标(如跌坎高差、沟壁坡度等)及沟床植被盖度,能在野外快速获取,为大面积冲沟治理中快速判识冲沟的发育类型,进而采取针对性的治理措施提供依据。

3. 不同活跃度类型条件下,冲沟沟头形态特征各异。通过分析不同活跃度类型条件下沟头的跌坎高差、沟壁坡度等形态参数存在的差异,发现对于不同活跃度类型的沟头来说,其跌坎高差、沟床比降存在的差异较大,而沟壁坡度、宽-深比等的差异相对较小。这说明在野外初步判定沟头活跃度类型时,跌坎高差、沟床比降可作为最主要的两个参考指标。

4. 不同活跃度类型沟头的沟床植被盖度存在显著差异,随着沟头由活跃向稳定状态的变化,沟床植被盖度呈现递增趋势。并且通过相关分析,发现沟床植被盖度与跌坎高差、沟床比降、沟壁坡度呈极显著负相关关系,说明随着沟床植被盖度的增加(或减小),跌坎高差、沟床比降及沟壁坡度值均呈减小(或增加)趋势,沟床植被盖度可作为判断沟头活跃度的形态参数的综合替代性指标,研究区开展冲沟治理宜从沟床开始。

5. 不同活跃度类型沟头的集水区植被盖度差异不明显,通过相关分析发现集水区植被盖度与跌坎高差、沟床比降、沟壁坡度无明显相关关系,这种

现象可能说明集水区植被盖度对沟头发育的贡献有限,不能很好地表征沟头的活跃度类型。

### 参考文献(References)

- [1] Zhong Xianghao. Degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(3): 376-383 [钟祥浩. 干热河谷生态系统退化及恢复与重建途径[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(3): 376-383]
- [2] Zhang Jianping, Wang Daojie, Wang Yukuan, et al. Discusses on eco-environment changes in Dry-hot Valley of Yuanmou [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(2): 148-152 [张建平, 王道杰, 王玉宽, 等. 元谋干热河谷区生态环境变迁探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(2): 148-152]
- [3] Zhang Rongzu. The arid valleys of the Hengduan Mountainous Region [M]. Beijing: Science Press, 1992. [张荣祖. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [4] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs [J]. Catena, 2003, 50: 91-133
- [5] Valentin C, Poesen J, Yong Li. Gully erosion: Impacts, factors and control [J]. Catena, 2005, 63: 132-153
- [6] Wang Xiaodan, Zhong Xianghao, Fan Jianrong, et al. Study on the morphological characteristics of the gully heads in Yuanmou Basin, Arid River Valley of Jinsha River, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(1): 63-67 [王小丹, 钟祥浩, 范建容, 等. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 63-67]
- [7] Vandekerckhove L, Poesen J, Oostwoud Wijdenes D, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 1201-1220
- [8] Patton P C, Schumm S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon [J]. Geology, 1975, (3): 88-90
- [9] Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. Geo-morphology, 1996, 16(2): 161-173
- [10] Montgomery D R, Dietrich W E. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds [G] // Kirkby, M. J. (ed.). Process Models and Theoretical Geomorphology. Wiley, Chichester, UK, 1994: 221-246
- [11] Morgan R P C, Mngomezulu D. Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the Middle Veld of Swaziland [J]. Catena, 2003, 50: 401-414
- [12] Vandekerckhove L, Poesen J, Oostwoud Wijdenes D, et al. Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean [J]. Catena, 1998, 33: 271-292
- [13] Bocco G. Gully erosion: processes and models [J]. Progress in Physical Geography, 1991, 15(4): 392-406
- [14] Thompson J R. Quantitative effect of watershed variables on rate of

- gully head advancement [J]. Transactions of the ASAE, 1964, (7):54-55
- [15] Williams A R, Morgan R P C. Geomorphologic mapping applied to erosion evaluation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1976, 31:164-168
- [16] Stocking M A. Examination of the factors controlling gully growth [G]//De Boodt M, Gabriels D. (Eds.). Assessment of Erosion. Wiley, Chichester,1980:505-520
- [17] Donker N H W, Damen C J. Gully system development and assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca - Spain [J]. Zeitschrift fur Geomorphologie, N. F., Supplement-band, 1984, 49:37-50
- [18] Yongqiu Wu, Hong Cheng. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system [J]. Catena, 2005, 63:154-166
- [19] Hu Gang, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan, et al. Preliminary research on short-term channel erosion using GPS and GIS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4):16-19 [胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探——以东北漫川漫岗为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):16-19]
- [20] You Zhimin, Wu Yongqiu, Liu Baoyuan. Study of monitoring gully erosion using GPS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5):91-94 [游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5):91-94]
- [21] He Fuhong, Li Yong, Li Lu, et al. Assessing gully development in upper Yangtze River Basin based on GPS and GIS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6):19-22 [何福红, 李勇, 李璐, 等. 基于 GPS 与 GIS 技术的长江上游山地冲沟的分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):19-22]
- [22] Fan Jianrong, Liu Shuzhen, Zhou Congbin, et al. Impacts of LUCC on gully erosion in Yuanmou Basin of Jinshajiang Arid-hot Valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2):130-132 [范建容, 刘淑珍, 周从斌, 等. 元谋盆地土地利用/土地覆盖对冲沟侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2):130-132]
- [23] Wang Xiaodan, Fan Jianrong, Chai Zongxin, et al. Fractal study on bending of gully's head in Yuanmou Basin on lower reaches of Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5):65-67 [王小丹, 范建容, 柴宗新, 等. 金沙江下游元谋盆地冲沟沟头弯曲度的分形研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5):65-67]
- [24] Chai Zongxin, Fan Jianrong, Liu Shuzhen. Analysis on development characteristics and process of gully in Yuanmou Basin on lower Reaches of Jinsha River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4):339-343 [柴宗新, 范建容, 刘淑珍. 金沙江下游元谋盆地冲沟发育特征和过程分析[J]. 地理科学, 2001, 21(4):339-343]
- [25] Dirk J Oostwoud Wijdenes, J P Liesbeth Vandekerckhove, Maryke Ghesquiere. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment [J]. Catena, 2000, 39:147-167
- [26] Yang Dan, Xiong Donghong, Zhai Juan, et al. Morphological characteristics and causes of gullies in Yuanmou Dry-hot Valley Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1):38-45 [杨丹, 熊东红, 翟娟, 等. 元谋干热河谷冲沟形态特征及其成因[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1):38-45]
- [27] Yang Yanxian, Ji Zhonghua, Fang Haidong, et al. Study and preliminary evaluation on the benefit of models of compound eco-agriculture on dry slope land in Yuanmou Dry Hot Valley [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4):88-90 [杨艳鲜, 纪中华, 方海东, 等. 元谋干热河谷旱坡地复合生态农业模式效益研究初评[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4):88-90]
- [28] Qian Fang, Zhou Guoxing. The Quaternary geology of Yuanmou and the ancient human [M]. Beijing: Science Press, 1991:17-35 [钱方, 周国兴. 元谋第四纪地质与古人类[M]. 北京: 科学出版社, 1991:17-35]
- [29] Dong Yifan. Study of the gully erosion rate at the catchment scale [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011. [董一帆. 小流域尺度的东北黑土区切沟侵蚀速率研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.]
- [30] Han Peng, Ni Jinren, Li Tianhong. Headcut and Bank Landslip in Rill Evolution [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2):115-124 [韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2):115-124]
- [31] Jing Ke. A study on gully and valley erosion in Loess Yuan Area [J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(4):340-347 [景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4):340-347]

## Morphological Characteristics of the Gully Head in Dry-hot Valley Based on the RTK – GPS Technology

LI Jiajia<sup>1,2,3</sup>, XIONG Donghong<sup>1,2</sup>, LU Xiaoning<sup>3</sup>, DONG Yifan<sup>1,2</sup>, SU Zhengan<sup>1,2</sup>,  
ZHAI Juan<sup>1,2,3</sup>, YANG Dan<sup>1,2,4</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process & Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Dry-hot Valley of Jinsha River has lots of gullies, and it suffers serious soil erosion. To carry out the study of gully head, especially its morphological characteristics, is the premise and foundation of further study on gully erosion. In this paper, the high precision real-time kinematical GPS (RTK – GPS) was used to measure the gully morphology in Yuanmou Dry-hot Valley, and the morphological parameters of 36 gully heads were obtained. Furthermore, this paper discussed the morphological characteristic differences of different type of active gully head, and analyzed the relationship between the vegetation coverage of catchments area & gully bed and morphological characteristics separately. The results showed that: (1) Among different active gully head types, both its backward step difference and gully bed slope difference are most significant, they could be regarded as the main index of distinguishing gully head activity type; the difference of furrow bank slope and the difference of width-depth ratio are more significant, they could also attribute the gully head activity to some extent. (2) There was a strong correlation between the gully bed vegetation coverage and the morphological parameters, indicating that the gully bed vegetation coverage could serve as the alternative indicator of morphological parameters. Among gully heads that were in the same activity type, its backward step and gully bed slope had a significant negative correlation with the gully bed vegetation coverage, indicating that when the gully bed vegetation coverage increase (or decrease), the backward step and gully bed slope values showed a decrease (or increase) trend. (3) The correlation between catchments vegetation coverage and morphological parameters was not significant, indicating that catchments vegetation coverage made a limited contribution to the development of gully head.

**Key words:** gully morphological characteristics; the activity of gully head; vegetation coverage; RTK – GPS technology