

# 基于历史卫星影像估算黄土丘陵区冲沟发育速率

张岩<sup>1,2</sup>, 高驰宇<sup>1,2</sup>, 杨瑾<sup>1,3</sup>, 张琪<sup>1,2</sup>, 王佳希<sup>1,2</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 吉县 042200;  
3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

**摘要:** 沟谷侵蚀是黄土高原河流泥沙的主要来源, 对土地资源的破坏性极大。为评估黄土高原丘陵沟壑区冲沟的中长期发育速率, 该研究选取黄土高原丘陵区第一副区绥德县枣林坪流域为研究区, 使用 1968 年的 KH-4B 卫星影像、2021 年高分 7 号卫星影像及立体像对, 估算近 53 年来冲沟的发育速率, 探究冲沟体积-面积关系。结果表明: 1) 在 35 条调查的冲沟中, 有 10 条没有明显增长, 其余 25 条发育冲沟的沟长增长在 0.09~0.93 m/a 之间, 均值为 0.30 m/a; 面积增长在 0.74~51.93 m<sup>2</sup>/a 之间, 均值为 14.03 m<sup>2</sup>/a。冲沟发育的主要部位在其支沟沟头。2) 冲沟体积和面积具有良好的幂函数关系, 判定系数  $R^2=0.934$ 。使用该模型及 1968 和 2021 年冲沟面积, 计算得到 25 条发育冲沟的体积增长量均值为 161.21 m<sup>3</sup>/a, 最大值为 723.62 m<sup>3</sup>/a。3) 历史影像 KH-4B 覆盖面积广, 在提取冲沟边界, 估算冲沟沟长和面积发育速率等方面, 具有较高的适用性, 但其立体像对生成数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 精度较低, 难以用于提取冲沟的沟深和体积。

**关键词:** 冲沟; 发育速率; KH-4B 影像; 高分 7 号影像; 中长时间尺度; 黄土高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.012

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-01-0109-08

张岩, 高驰宇, 杨瑾, 等. 基于历史卫星影像估算黄土丘陵区冲沟发育速率[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 109-116.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.012 <http://www.tcsae.org>

Zhang Yan, Gao Chiyu, Yang Jin, et al. Estimating the gully growth rate in the hilly Loess Plateau using historical satellite images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 109-116. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.01.012 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

沟谷侵蚀是非常活跃的土壤侵蚀过程, 不仅对当地土地资源破坏极为严重, 对整个流域的水文、泥沙和生态都有一系列不利影响<sup>[1-2]</sup>。黄土高原地貌独特、地形破碎、生态环境脆弱, 是中国生态建设与环境保护的重点区域。沟谷是黄土高原典型的地貌形态和主要泥沙来源, 流域产沙量的 50% 以上都来自切沟侵蚀<sup>[3]</sup>。监测沟谷侵蚀速率对于黄土高原水土流失动态监测及水土保持措施配置具有重要意义, 尤其是在土地利用变化和极端气候的双重影响下, 深入研究沟谷侵蚀速率和机制更加重要<sup>[4-7]</sup>。

中国对沟谷侵蚀的定量研究始于 20 世纪 70 年代<sup>[1]</sup>, 但由于监测方法的限制及历史数据的缺失, 对沟谷侵蚀中长期发育速率及其影响的评估还非常有限<sup>[8]</sup>。沟谷侵蚀的变率很大<sup>[9]</sup>, 短期监测无法反映沟蚀的本质特征。缺少对沟谷侵蚀的长期监测和体积发育速率的测量, 严重限制了对于沟谷侵蚀过程和机理的认识<sup>[10]</sup>。同时, 黄土高原丘陵沟壑区沟蚀研究成果主要是沟长和面积的发育速率<sup>[11-13]</sup>, 对于中长期沟蚀体积速率的研究很少。沟谷侵

蚀监测的方式一般分为两种: 一种是采用传统方法、GPS 或激光扫描等方法在野外实地测量切沟等沟谷的形态参数<sup>[5-6,14]</sup>。另一种是使用两期或多期高精度遥感影像、数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 等估算浅沟和切沟在一定时段内的侵蚀速率<sup>[10,13,15-17]</sup>。野外实地调查和测量方法的精度较高, 但费时费力, 难以实现对侵蚀沟的中长期动态分析。基于高分遥感影像的方法可用于较长时间跨度、较大空间尺度上的沟谷侵蚀分析。近年来, 中国高分系列卫星影像的推广应用, 为沟谷发育现状研究提供了优质数据源, 但由于早期历史影像的欠缺, 导致对沟蚀研究的时间尺度一般小于 10 年, 且研究的沟谷数量有限。美国间谍卫星影像拍摄于 20 世纪 60 年代末至 70 年代初, 覆盖面积广, 可以弥补航空照片覆盖面积小的不足, 为研究较大时空尺度沟谷长期发育速率提供了可能性<sup>[12,18-19]</sup>。

本文以 KH-4B 间谍卫星影像和高分 7 号卫星影像为基础数据<sup>[20]</sup>, 基于 GIS 技术提取切沟二维、三维参数, 旨在分析黄土高原丘陵区冲沟在 50 年尺度上的发育速率, 通过建立冲沟体积-面积模型, 估算冲沟发育速率, 以期黄土高原沟谷侵蚀监测和防治提供技术手段和科学依据。

## 1 研究区概况

综合考虑地貌代表性和间谍卫星影像立体像对的质量, 选取陕西省绥德县枣林坪流域作为研究区, 如图 1 所示。绥德县位于黄土丘陵沟壑第一副区, 属温

收稿日期: 2021-11-04 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原植被恢复影响切沟侵蚀的动力机制与模拟”(42130701)和国家自然科学基金项目“黄土高塬沟壑区沟头溯源与沟谷不同微地貌侵蚀过程和机制”(42177309)联合资助

作者简介: 张岩, 教授, 博士生导师。研究方向为土壤侵蚀和水土保持。

Email: zhangyan9@bjfu.edu.cn

带大陆性半干旱季风气候, 多年平均气温 9.7 °C, 多年平均降水量 486 mm, 降水季节分布不均, 主要集中在 7—9 月, 占全年降水的 60% 以上。主要土壤类型为黄土性土壤。枣林坪流域 (110°30'~110°32'E, 37°24'~

37°28'N) 位于绥德县枣林坪镇, 流域面积 13.39 km<sup>2</sup>。植被以灌木和草本为主。1968 年影像可见大量坡耕地, 2021 年影像仍然可见少量坡耕地, 梁峁区修建大量梯田, 部分已退耕。

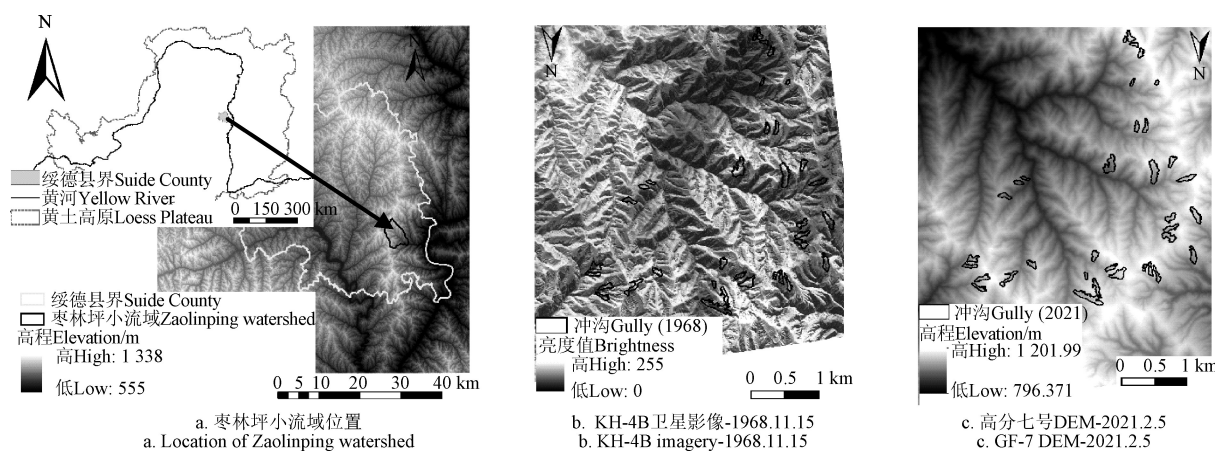


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

历史影像是 1968 年 11 月 15 日的 CORONA KH-4B 高分辨率间谍卫星影像 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。KH-4B 卫星飞行高度为 150 km, 卫星搭载的前、后视全景摄像头, 夹角为 30°, 光学镜头焦距为 609.602 mm, 扫描分辨率为 7 μm, 最佳地面分辨率为 1.83 m。现状影像来源高分 7 号卫星, 影像拍摄时间为 2021 年 2 月 5 日, 全色波段地面分辨率优于 0.8 m, 多光谱优于 3.2 m, 经过正射校正后, 融合并进行重采样, 生成 0.54 m 的真彩色图像, 用于分析当前冲沟形态特征。地形数据来源于高分 7 号立体像对生成的数字高程模型 (DEM), 分辨率 1 m×1 m, 以及使用 CORONA KH-4B 立体像对生成的 DEM (5 m×5 m)。

### 2.2 2021 年冲沟形态参数的提取

黄土高原沟谷形态多样、类型复杂。根据罗来兴<sup>[21]</sup>的分类, 冲沟沟谷是近代流水直接切割土状堆积物形成的, 沟床下切、谷坡扩展与沟头溯源侵蚀极为活跃。按照 Wu 等的分类<sup>[22]</sup>, 这些冲沟及其支沟的沟头都是沟缘线切沟 (bank gully)。考虑到历史影像的分辨率限制, 本研究选取冲沟作为研究对象, 而冲沟沟头溯源侵蚀实质上是发育在沟间地和沟谷地之间的沟缘线上的切沟侵蚀。

在枣林坪小流域共选取 35 条冲沟 (图 1), 筛选条件是没有明显的人为填埋或挖掘, 历史影像与现状影像质量清晰, 且生成的 DEM 质量较高的冲沟。首先, 基于高分 7 号融合影像, 采用目视解译, 勾绘 35 条冲沟在 2021 年的边界, 量取沟长, 计算面积和平均沟宽 (面积与沟长之比)。根据李镇等<sup>[23]</sup>的方法, 基于 DEM 计算每条冲沟的体积, 步骤如下: 1) 利用冲沟边界裁剪 DEM, 得到冲沟数字高程模型 (DEM<sub>g</sub>); 2) 基于冲沟边界的高程

值数据生成未发生侵蚀的原始坡面数字高程模型 (DEM<sub>0</sub>), 其栅格大小也是 1 m×1 m; 3) 利用 ArcMap 10.6 中的 Surface Volume 功能, 分别计算冲沟边界以内未发生侵蚀的原始坡面与水平面之间的体积和冲沟三维边界与水平面之间的体积, 二者之差为冲沟的体积 ( $V$ , m<sup>3</sup>):

$$V = V_{\text{DEM}_g} - V_{\text{DEM}_0} \quad (1)$$

式中  $V$  为冲沟体积, m<sup>3</sup>;  $V_{\text{DEM}_0}$  代表冲沟边界以内未发生侵蚀的原始坡面与水平面之间的体积, m<sup>3</sup>;  $V_{\text{DEM}_g}$  为冲沟三维边界与水平面之间的体积, m<sup>3</sup>。冲沟体积与面积之比则是平均沟深。

### 2.3 1968 年冲沟形态参数的提取

1) 采用局部精确配准方法, 选取梁峁顶部易于识别的地物为控制点, 将 1968 年的 KH-4B 影像与高分 7 号融合影像进行配准, 确保每条冲沟尽可能精确配准。2) 通过目视解译, 基于 KH-4B 影像勾绘 1968 年冲沟的边界, 再将 1968 年和 2021 年冲沟边界进行叠加, 提取冲沟增长的面积。3) 测量 1968 年每条冲沟的沟长、面积和平均沟宽。4) 计算 1968—2021 年冲沟沟长和面积的年均增长速率。

### 2.4 基于冲沟面积-体积关系 ( $V-A$ 模型) 估算冲沟侵蚀量

已有研究表明黄土高原丘陵沟壑区的切沟面积 ( $A$ ) 和体积 ( $V$ ) 具有较好的幂函数关系<sup>[17]</sup>:

$$V = aA^b \quad (2)$$

式中  $a$ 、 $b$  均为待定系数。基于高分 7 号影像提取每条冲沟的面积, 基于高分 7 号影像生成的 DEM 提取每条冲沟的体积, 参照切沟  $V-A$  模型的函数形式, 拟合冲沟  $V-A$  模型。

分别将 1968 和 2021 年冲沟面积带入冲沟  $V-A$  模型 (公式 2), 可以估算 1968 和 2021 年冲沟体积, 二者之差即为冲沟体积变化量 (即冲沟侵蚀量), 进一步可以计算冲沟体积的年均发育速率。

遥感影像处理和空间数据分析使用 ArcMap 10.6, 采用

坐标系均为 WGS 84 大地坐标系和 UTM 投影坐标系。使用 SPSS 25.0 进行统计分析，并在 Origin 2019 中绘制统计图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 冲沟沟长和面积发育速率

本文调查的 35 条冲沟形态参数和发育速率见表 1。沟长在 82.17~490.11 m 之间，均值 217.14 m，中位数 202.15 m；面积在 3 131.62~36 493.78 m<sup>2</sup> 之间，均值 12 279.03 m<sup>2</sup>，中位数 10 755.70 m<sup>2</sup>；从表 2 和图 2 可以看出：1968—2021 年，在 35 条调查的冲沟中，有 10 条冲沟在影像上没有明显增长。另外 25 条沟长增长在 0.09~0.93 m/a 之间，均值为 0.30 m/a，80% 的冲沟沟长增长在 20 m 以内，即 0.38 m/a。有 2 条冲沟长度增长在 40 m 以上，增长率（长度增长与 1968 年沟长之比）超过 30%。25 条发育冲沟面积增长在 0.74~51.93 m<sup>2</sup>/a 之间，均值为 14.03 m<sup>2</sup>/a，中位数只有 8.57 m<sup>2</sup>/a，76% 的冲沟面积增长小于 20 m<sup>2</sup>/a。有 2 条冲沟的面积增长率（面积增长与 1968 年面积之比）在 20% 以上。需要强调的是，本研究通过目视解译提取 1968 和 2021 年两期影像中冲沟面积明显增长的部分。有研究认为：基于 DEM 提取切沟

形态参数时，DEM 栅格大小不能大于表征切沟形态参数数值的 1/2<sup>[24]</sup>。因此，本文采用的方法能够识别的最小面积变化大约为 1968 年影像的分辨率的 2 倍，有可能低估了冲沟面积增长量。

表 1 35 条调查冲沟的形态参数

统计值 Statistic	面积 Area/m <sup>2</sup>	体积 Volume/m <sup>3</sup>	沟长 Gully length/m	平均沟宽 Width/m	平均沟深 Depth/m
最大值 Maximum	36 493.78	422 416.19	490.11	95.44	13.62
最小值 Minimum	3 131.62	6 764.39	82.17	31.14	1.70
均值 Means	12 279.03	101 711.28	217.14	53.22	6.98
中位数 Medians	10 755.70	67 892.16	202.15	49.88	6.91

表 2 1968—2021 年 25 条冲沟沟长和面积增长速率

统计值 Statistic	面积增长速率 Area growth rate/(m <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	沟长增长速率 Gully linear growth rate/(m·a <sup>-1</sup> )	面积增长比例 Area growth ratio/%	沟长增长比例 Linear growth ratio/%
最大值 Maximum	51.93	0.93	25.59	34.27
最小值 Minimum	0.74	0.09	0.63	1.91
均值 Means	14.03	0.30	6.92	8.81
中位数 Medians	8.57	0.24	5.25	6.21

注：调查冲沟共 35 条，其中有 25 条可以在影像上解译为明显增长。  
Notes: 25 of 35 selected gullies were found to keep growing obviously.

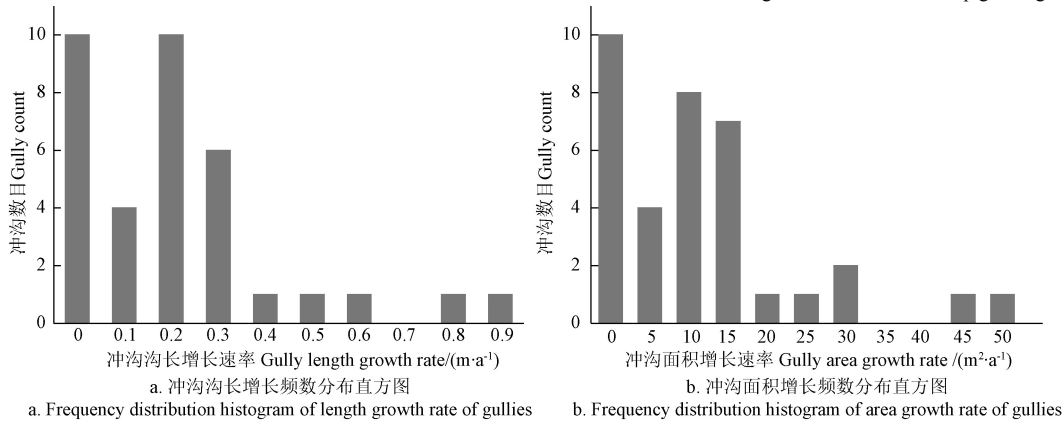


图 2 35 条调查冲沟的沟长和面积增长频数分布直方图

Fig.2 Frequency of length and area growth rates of 35 selected gullies

#### 3.2 冲沟发育特征

按照罗来兴的分类<sup>[21]</sup>，本次调查的是第一期冲沟，由坡面上发育的切沟发展而来。主沟沟头大多已经接近分水岭。对比 1968 和 2021 年的遥感影像，这类冲沟发育有两个明显的特征：1) 主要发育的部位在支沟沟头。从图 3 可以看出大部分发育的部位是冲沟两侧切沟沟头，尤其是距离分水岭距离较远的沟头发育更明显，如图 3a 中的沟 1 和图 3c 中的沟 3；2) 阴坡发育更明显，如图 3b 中的沟 1 和沟 2，是在阴坡一侧的冲沟沟壁的相对扩张更明显，原因是阳坡一侧在 1968 年的影像上冲沟边界比较平直，距离分水岭更近，沟缘线上发育的切沟数量更少。这些现象说明阳坡冲沟发育更快，已经接近发育的临界状态，难以继续发育。图 3b 中的沟 3 情况则不同，是在陷穴的基础上发育为较大的支沟沟头。

图 4 是 3 条在影像上没有看到明显发育的冲沟（即冲沟边界变化距离不超过 5 m），共同特点是沟型狭长，沟头接近黄土峁，冲沟两侧谷坡发育的切沟数量少。图 4a 的冲

沟两侧是狭窄的黄土长梁，冲沟边界距离分水岭很近，上坡集水区坡长很短。图 4b 主沟沟头已经接近分水岭，并且被道路阻隔，已经没有继续溯源侵蚀的空间。图 4c 中勾绘的冲沟集水区 2021 年已经全部为梯田，虽然无法判断梯田修建的年份，但可能在一定程度上抑制了侵蚀沟的发育。在 10 条没有明显发育的冲沟中，有 4 条是这种情况，说明梁峁坡面修建梯田能够有效控制沟谷发育。

#### 3.3 冲沟体积发育速率估算

基于 2021 年高分 7 号立体相对生成的 DEM 提取的冲沟参数，拟合冲沟面积-体积幂函数模型，如图 5a 所示， $a=0.0866$ ， $b=1.4726$ ，判断系数  $R^2=0.934$ ，说明冲沟（按照罗来兴的分类方法<sup>[21]</sup>属于第一期冲沟）体积和面积之间具有良好的函数关系。以往研究表明，在切沟  $V-A$  模型中， $b$  值在 1.097~1.381 之间<sup>[16]</sup>。 $b$  反映了环境的脆弱性，可以看作是单位冲沟面积上沟深的增长率。本研究得到的冲沟  $V-A$  模型的  $b$  值略大于切沟  $V-A$  模型的  $b$  值，说明随着冲沟面积的增大，沟深增长率大于切沟（图 5b）。

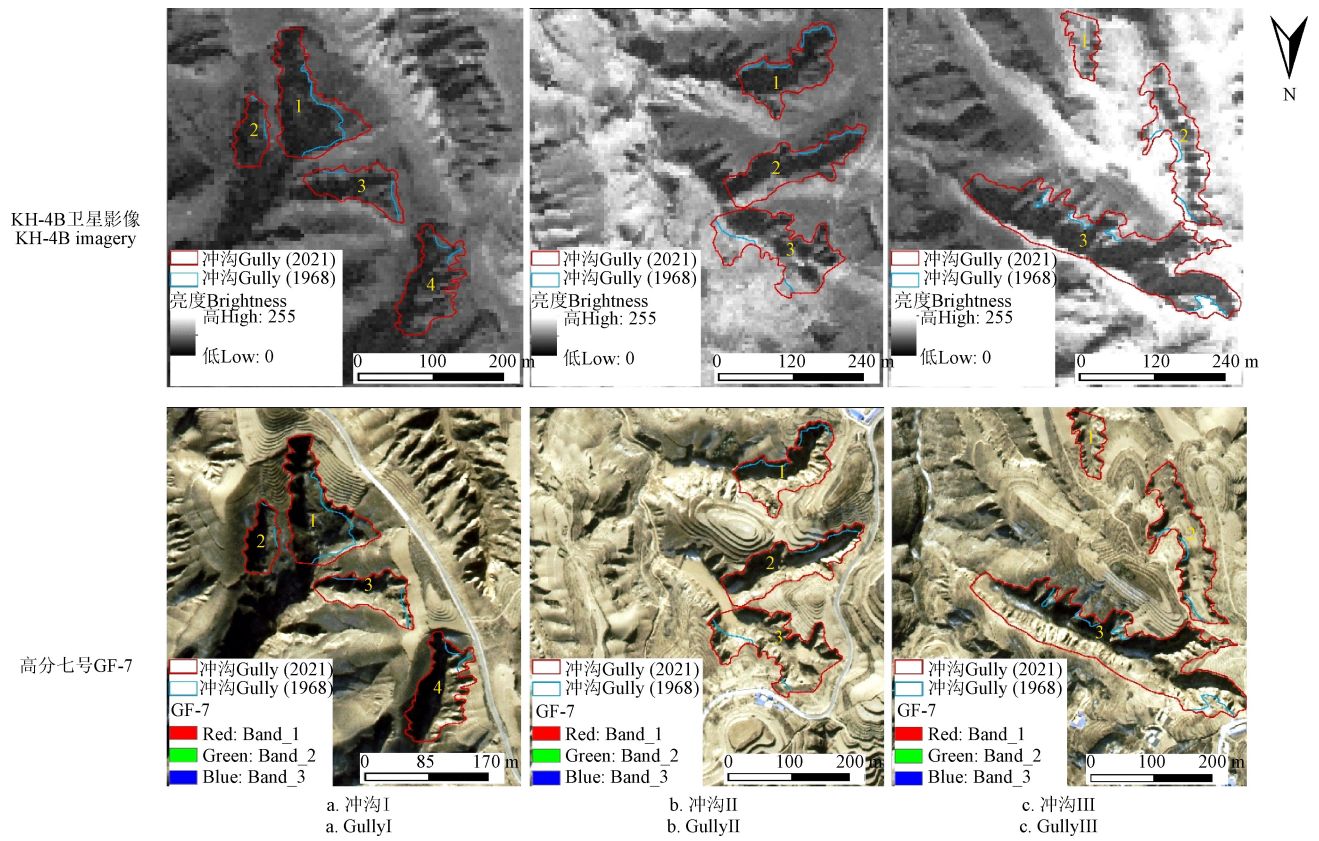


图3 1968和2021年10条发育冲沟的影像对比  
Fig.3 Comparison of growing gullies in images of 1968 and 2021

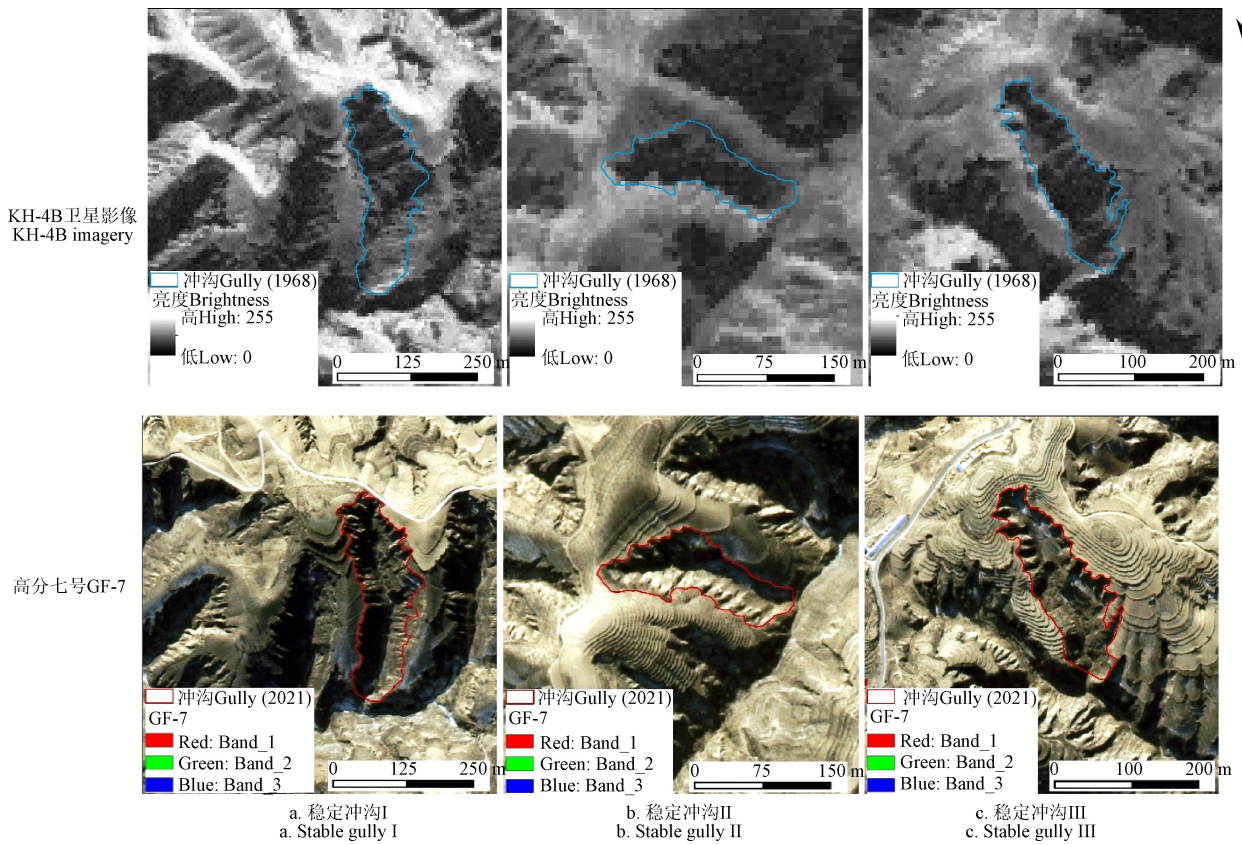


图4 1968和2021年3条稳定冲沟的影像对比  
Fig.4 Comparison of stable gullies in images of 1968 and 2021

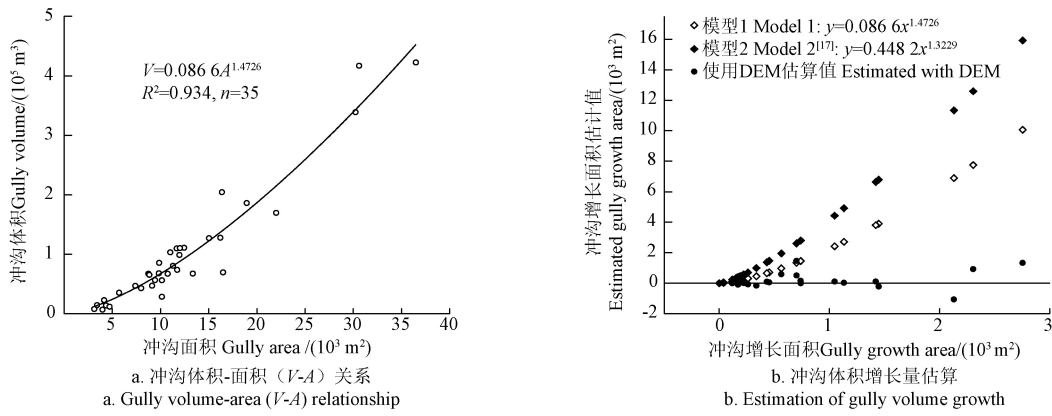


图 5 基于高分 7 号 DEM 建立的冲沟体积-面积 ( $V-A$ ) 关系和冲沟体积增长量估算  
 Fig.5  $V-A$  relationship based on GF-7 DEM and estimated gully volume growth

使用 2021 年高分 7 号立体像对生成的 DEM, 也可以计算每条冲沟增长部分的体积, 但结果表明这种方法计算的冲沟体积增长量精度很低, 甚至出现负值, 主要原因是冲沟增长的面积大多是沟缘线切沟, 沟壁陡峭, DEM 误差较大。使用 Li 等在同一副区 (绥德县桥沟流域) 通过三维激光扫描数据建立的切沟  $V-A$  模型<sup>[17]</sup>, 基于冲沟面积增长量估算了体积增长量, 如图 5b 中模型 2 的计算结果所示。估算结果表明 25 条发育冲沟体积增长率均值为  $62.87 \text{ m}^3/\text{a}$ , 中位数为  $27.70 \text{ m}^3/\text{a}$ , 变化范围  $1.09 \sim 300.33 \text{ m}^3/\text{a}$ 。使用本文提出的冲沟  $V-A$  模型分别计算 1968 年和 2021 年冲沟的体积, 二者之差可以看作是冲沟体积增长量 (图 5b 中的模型 1), 中位数为  $75.39 \text{ m}^3/\text{a}$ , 均值为  $161.21 \text{ m}^3/\text{a}$ , 与 2021 年 25 条发育冲沟体积均值之比为 0.54%; 冲沟体积增长量最大值为  $723.62 \text{ m}^3/\text{a}$ , 占 2021 年该冲沟体积的 0.19%。冲沟体积增加量不仅包含了面积增长部分的体积, 还包括冲沟下切侵蚀增加的体积。这种方法也存在明显不足, 很可能低估了冲沟体积增长量, 因为冲沟面积增长不明显的情况下, 也可能发生明显的下切侵蚀。

其应用研究较多, 用于生产数字地形模型的地面精度约为  $3 \text{ m}$ <sup>[25]</sup>, 垂直精度可达  $1.02 \text{ m}$ <sup>[26]</sup>。也被用于重现历史景观格局和冰川变化分析<sup>[27]</sup>以及解译历史作物种植<sup>[28]</sup>等。在黄土高原沟蚀监测方面, KH-4B 被用于丘陵沟壑区分析沟头前进速率和沟谷区面积变化<sup>[12]</sup>, 及残塬沟壑区切沟发育特征<sup>[19]</sup>。黄土高原丘陵沟壑区地貌形态复杂, 基于遥感影像提取沟谷边界主要还是依赖目视解译<sup>[12-13,19,23]</sup>, 对地貌特征和遥感影像特征的掌握是提取精度的重要保证。同时, 基于切沟形态参数时, 影像栅格大小不能大于表征切沟形态参数数值的  $1/2$ <sup>[24]</sup>。本研究使用 KH-4B 影像, 也是通过目视解译提取 1968 年冲沟边界, 与 2021 年高分 7 号影像比较, 可以发现部分冲沟发育明显。本研究选取的冲沟沟宽最小值大于  $30 \text{ m}$ , 沟长最小值大于  $80 \text{ m}$ , 远远大于 KH-4B 影像的栅格长度, 解译的冲沟变化面积也远远大于 KH-4B 影像的分辨率。因此, 用于估算 53 年来冲沟沟长和面积的误差较小, 结果具有参考价值。利用 KH-4B 立体像对还可以生成  $5 \text{ m}$  分辨率的 DEM。从图 6d 可以看出, 与高分 7 号生成的 DEM 相比, KH-4B 影像生成 DEM 无法准确重建冲沟沟底地形, 因此无法用于准确估算 1968—2021 年冲沟的沟深和体积变化。

### 4 讨论

#### 4.1 基于历史影像估算冲沟发育速率的可行性

KH-4B 间谍卫星影像解密时间较晚, 国内外学者对

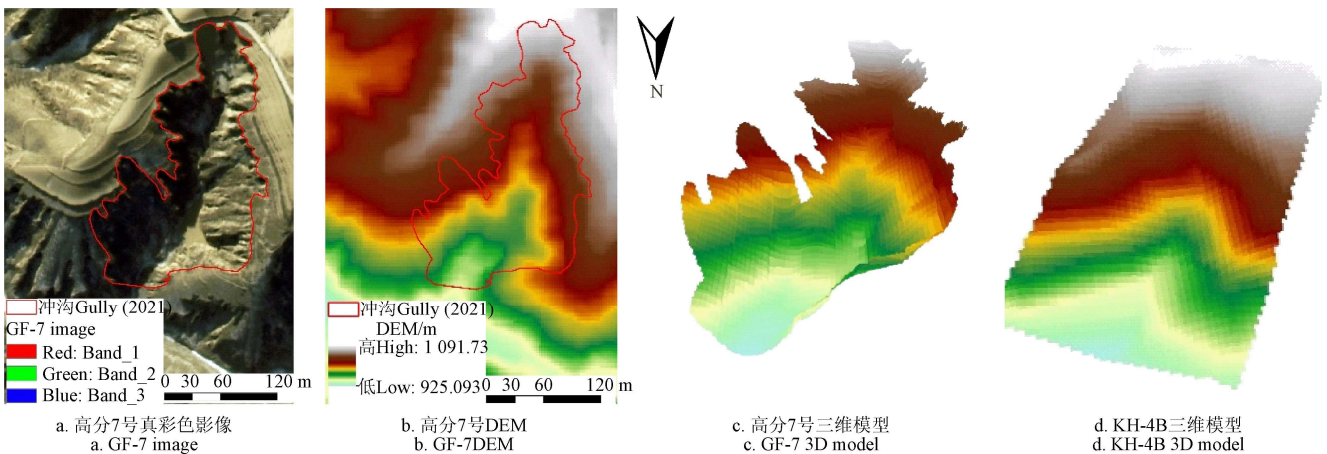


图 6 冲沟边界和数字高程模型  
 Fig.6 A gully boundary and comparison of 3D models from GF-7 and KH-4B

## 4.2 冲沟发育速率估算的可靠性

陈一先等<sup>[11]</sup>使用两期 1:1 万地形图估算了陕西西安寨县 7 条大切沟 (相当于本文的冲沟) 1976—1997 年的发育速率, 面积增长率 11.01%~180.46%, 沟长前进速率为 0.26~0.84 m/a<sup>[11]</sup>。杨力华等<sup>[12]</sup>使用 KeyHole 影像和 WorldView 影像估算了绥德县王茂沟 1968—2004 年沟头前进速率为 0.30 m/a。西班牙东南部切沟中等时间尺度 (21~38 年) 溯源侵蚀速率为 0 至 0.86 m/a<sup>[29]</sup>。本文比较了近 53 年来冲沟的面积变化, 估算冲沟 (相当于沟缘线切沟) 的发育速率 0.00~0.93 m/a, 结果与上述研究有可比性。此外, 如前所述, 由于 1968 年卫星影像分辨率相对较低, 难以精确勾绘冲沟边界, 在基于两期影像叠加分析确定冲沟面积变化时, 只是提取了明显变化的部分, 有可能低估了冲沟长度和面积增长量。

以往对于冲沟发育速率的估计大多局限于沟长和面积的变化, 很少能够估算中长期体积发育速率。本研究使用覆盖面积广的历史间谍卫星影像与高分 7 号立体像对相结合, 探索了一种适用于估算较大时空尺度冲沟体积发育速率的方法。黄土高原东北边缘的浑源县地貌类似于高塬沟壑区, Guan 等<sup>[10]</sup>使用历史航片和无人机航拍估算切沟体积长期发育速率均值为 58.3 m<sup>3</sup>/a, 最大值为 373.0 m<sup>3</sup>/a, 小于本文在丘陵沟壑区的冲沟的研究结果 (161.21 m<sup>3</sup>/a), 但从侵蚀沟的规模、影响沟蚀的地貌和气候环境来看, 都具有合理性。同时, 需要说明的是本文结果只是对冲沟体积发育速率的保守估计。使用高分卫星立体像对生成的 DEM 估算侵蚀沟体积可能小于实测值<sup>[30]</sup>。因此, 基于  $V-A$  模型可能低估冲沟的体积增长量。实际冲沟发育速率可能大于本文的研究结果, 有待将来使用更精确的方法加以验证。

## 5 结论

以黄土高原丘陵沟壑区第一副区绥德县枣林坪流域为研究区, 选取 35 条冲沟, 利用历史间谍卫星影像和高分 7 号影像, 分析黄土高原丘陵区近 53 年来的冲沟发育速率, 评估历史卫星影像提取冲沟和分析其长期发育特征的可行性, 取得如下研究结论:

1) 1968—2021 年, 在 35 条调查的冲沟中, 有 10 条冲沟在影像上没有明显增长。另外 25 条的沟长增长在 0.09~0.93 m/a 之间, 均值为 0.30 m/a; 面积增长在 0.74~51.93 m<sup>2</sup>/a 之间, 均值为 14.03 m<sup>2</sup>/a。冲沟发育的主要部位在支沟沟头。没有明显发育冲沟的共同特点是沟型狭长, 沟头接近黄土塬, 冲沟两侧谷坡接近分水岭。

2) 黄土高原丘陵沟壑区第一副区冲沟体积和面积具有良好的幂函数关系:  $V=0.0866A^{1.4726}$ , 判定系数  $R^2=0.934$ 。使用该模型及 1968 和 2021 年冲沟面积, 计算得到 1968—2021 年 25 条发育冲沟的体积增长量均值为 161.21 m<sup>3</sup>/a, 最大值为 723.62 m<sup>3</sup>/a。

3) 历史间谍卫星影像 KH-4B 覆盖面积广, 可以分析较大空间尺度 50 年前的冲沟形态特征, 提取冲沟边界, 与当前影像比较, 进而估算冲沟二维参数 (沟长和面积

等) 发育速率, 与高分 7 号立体像对相结合, 适用于估算较大时空尺度冲沟体积发育速率, 具有较高的可靠性, 但是 KH-4B 立体像对生成的 DEM 精度较低, 难以用于提取冲沟的三维参数 (沟深和体积等)。历史间谍卫星影像在中长期时间尺度微地貌发育及土壤侵蚀评估方面的适用性还有待进一步探讨。

## [参 考 文 献]

- [1] 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.  
Wu Yongqiu, Liu Baoyuan. Gully, Gully erosion and prediction[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(2): 134-142. (in Chinese with English abstract)
- [2] Frankl A, Nyssen J, Vanmaercke M, et al. Gully prevention and control: Techniques, failures and effectiveness[J]. Earth Surf. Process. Landforms. 2021, 46, 220-238.
- [3] 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 Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59. (in Chinese with English abstract)
- [4] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2): 91-133.
- [5] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63(2/3): 132-153.
- [6] Slimane A B, Raclot D, Rebai H, et al. Combining field monitoring and aerial imagery to evaluate the role of gully erosion in a Mediterranean catchment (Tunisia)[J]. Catena, 2018, 170: 73-83.
- [7] Yuan M T, Zhang Y, Zhao Y Y, et al. Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River basin, China[J]. Sci. Total Environ, 2020, 739: 140066.
- [8] Vanmaercke M, Panagos P, Vanwalleghem T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art[J]. Earth-Sci. Rev, 218, 103637.
- [9] Vanmaercke, M, Poesen, J, Van Mele, B, et al. How fast do gully headcuts retreat[J]. Earth Sci. Rev, 2016, 154: 336-355.
- [10] Guan Y B, Yang S T, Zhao C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau[J]. Soil Till. Res, 2021, 205: 104800.
- [11] 陈一先, 焦菊英, 魏艳红, 等. 陕北黄土区退耕前 (1976-1997) 坡面切沟发育特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 120-127.  
Chen Yixian, Jiao Juying, Wei Yanhong, et al. Characteristics of gully development in Northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976-1997)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 120-127. (in Chinese with English abstract)

- [12] 杨力华, 庞国伟, 杨勤科, 等. 近 50 年来王茂沟流域侵蚀沟变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 64-70.  
Yang Lihua, Pang Guowei, Yang Qinke, et al. Changes and influencing factors of erosion gully in Wangmaogou Watershed in the last 50 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 64-70. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄婷婷, 杨扬, 史扬子, 等. 基于 WorldView-2 影像估算黄土高原六道沟小流域退耕还林(草)后的切沟发育速率[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(1): 1-10.  
Huang Tingting, Yang Yang, Shi Yangzi, et al. Using WorldView-2 images to estimate gully development of the Liudaogou catchment in the Loess Plateau after the Grain for Green project[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李镇, 张岩, 姚文俊. 切沟侵蚀监测与预报技术研究述评[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 110-115.  
Li Zhen, Zhang Yan, Yao Wenjun. A review of monitoring and predicting technology on gully erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 110-115. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于 QuickBird 影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 141-148.  
Li Zhen, Zhang Yan, Yao Wenjun, et al. Estimating gully development rates in Hilly Loess Region of Western Shanxi province based on QuickBird images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 141-148. (in Chinese with English abstract)
- [16] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2015, 228: 462-469.
- [17] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area[J]. Catena, 2017, 148: 195-203.
- [18] 闫业超, 张树文, 岳书平. 近 40a 黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 109-115.  
Yan Yechao, Zhang Shuwen, Yue Shuping. Dynamic change of hill slope and gully erosion in typical area of black soil region during the past 40 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 109-115. (in Chinese with English abstract)
- [19] Wang J X, Zhang Y, Deng J Y, et al. Long-term gully erosion and its response to human intervention in the tableland region of the Chinese Loess Plateau[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 5053.
- [20] 李国元, 唐新明, 陈继溢, 等. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1338-1348.  
Li Guoyuan, Tang Xinming, Chen Jiayi, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1338-1348. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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, 22(3): 201-222.  
Luo Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(3): 201-221. (in Chinese with English abstract)
- [22] Wu YQ, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system[J]. Catena, 2005, 63: 154-166.
- [23] 李镇, 张岩, 杨松, 等. QuickBird 影像目视解译法提取切沟形态参数的精度分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 179-186.  
Li Zhen, Zhang Yan, Yang Song, et al. Error assessment of extracting morphological parameters of bank gullies by manual visual interpretation based on QuickBird imagery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 179-186. (in Chinese with English abstract)
- [24] Warren S D, Hohmann M G, Auerswald K, et al. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data[J]. Catena, 2004, 58(3): 215-233.
- [25] Altmaier A, Kany C. Digital surface model generation from CORONA satellite images[J]. Photogrammetry & Remote Sensing, 2002, 56(4): 221-235.
- [26] Galiatsatos N, Donoghue D N M, Philip G. High resolution elevation data derived from stereoscopic CORONA imagery with minimal ground control: An approach using Ikonos and SRTM Data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(9): 1093-1106.
- [27] Sahu R, Gupta R D. Glacier mapping and change analysis in Chandra basin, Western Himalaya, India during 1971-2016[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(18): 6914-6945.
- [28] Fowler M J F, Fowler Y M. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of Southern England[J]. Archaeological Prospection, 2005, 12(4): 257-264.
- [29] Vandekerckhove L, Poesen J, Govers G. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements[J]. Catena, 2003, 50(2/3/4): 329-352.
- [30] 唐杰, 张岩, 范聪慧, 等. 使用高分遥感立体影像提取黄土丘陵区切沟参数的精度分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 111-117.  
Tang Jie, Zhang Yan, Fan Conghui, et al. Accuracy assessment of gully morphological parameters from high resolution remote sensing stereoscopic satellite images on hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 111-117. (in Chinese with English abstract)

# Estimating the gully growth rate in the hilly Loess Plateau using historical satellite images

Zhang Yan<sup>1,2</sup>, Gao Chiyu<sup>1,2</sup>, Yang Jin<sup>1,3</sup>, Zhang Qi<sup>1,2</sup>, Wang Jiayi<sup>1,2</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Forest Ecosystem Studies, National Observation and Research Station, Jixian 042200, China;

3. Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Gully erosion is one of the most important drivers of land degradation, accounting for more than 50% of the total sediment production in the Loess Plateau. However, the volumetric gully erosion rate is limited during the medium to long term, due to a variety of historical information of the gullies previously unavailable. In this study, the gully growth rate over the past 53 years was estimated to compare the KH-4B imagery acquired in 1968 with the GF-7 satellite imagery in 2021. Digital Elevation Model (DEM) generated with GF-7 stereo pairs was used to calculate the gully volume. A watershed was taken as the study area, located in the first sub-region of the hilly and gully area on the Loess Plateau, well known for the severe soil erosion and high gully density. After that, 35 large gullies with the gully area ranging from 3132-34694 m<sup>2</sup> were selected to estimate the gully linear and areal growth rates using the visual interpretation, and then to estimate gully volumetric growth rates with a volume-area relationship model. The following results were obtained. 1) There were 10 gullies undeveloped significantly, among the 35 surveyed ones. The rest of the 25 gullies increased 0.09-0.93 m/a in length, with an average value of 0.30 m/a; and the gully area increased between 0.74-51.93 m<sup>2</sup>/a, with an average value of 14.03 m<sup>2</sup>/a. 2) The growing gullies developed mainly by the head-cutting of the branches. The gully head on the shady slopes grew more quickly than those on the sunny slopes. The reason was that most gully heads on the sunny slopes were close to the ridge lines, approaching the threshold conditions of gully retreat. The terraces on the drainage area were considered to prevent the gully development, particularly for 4 of the 10 stable gullies. 3) A power function was also fitted between the volume and area of the 25 growing gullies, i.e.,  $V=0.0866A^{1.4726}$ , with  $R^2=0.934$ . Each gully volume was calculated to evaluate the average gully volumetric growth rates of 161.21 m<sup>3</sup>/a, with a maximum of 723.62 m<sup>3</sup>/a. It infers that the historical KH-4B imagery was probable to extract the gully boundaries, further to estimate the gully length and area growth rates. The KH-4B imagery covering a large area in China at the end of the 1960's has been widely used to rebuild historical scenes, and then assess long term change of landscape. However, only a conservative estimate of the gully growth rate can be obtained over the past 53 years, because the 2-m resolution of the KH-4B imagery can be used to only identify the gully length growth larger than 2 times of the resolution. Meanwhile, the gully volume from the GF-7 stereoscopic satellite images can be lower than what is probably the real amount. The accuracy of the generated DEM from KH-4B stereoscopic images is not enough to extract the depth and volume of gullies. This finding can provide an important reference to estimate the gully volumetric growth rate on a large region for the medium to long periods.

**Keywords:** gully; growth rate; KH-4B imagery; GF-7 imagery; medium to long term; Loess Plateau