

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.027

基于 QuickBird 影像的黄土丘陵区坡面浅沟侵蚀速率研究

张岩 范聪慧 龚颖华 张佳华

(北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以陕西省吴起县黄土丘陵沟壑区封禁流域(合沟小流域)为研究对象,通过野外实地测量 60 条浅沟形态参数,建立浅沟长度与体积回归模型,使用 2007 年和 2013 年 2 期同时相 QuickBird 影像,提取 245 条浅沟的长度,计算浅沟侵蚀速率。结果表明:在 2007—2013 年的 6 a 内,浅沟的数量基本不变,总长度从 2007 年的 13.74 km 增长到 2013 年的 14.12 km,浅沟密度为 36.21 km/km²。浅沟长度变化分为缩减与增长 2 类,缩减类浅沟占 46.94%,沟口多数与切沟沟头相连,由于切沟溯源侵蚀速率高于浅沟的发育速率,导致浅沟长度缩减。依据构建的浅沟长度与体积回归模型,基于影像解译的 245 条浅沟在 6 a 间总侵蚀量从 1 889.97 m³ 增加到 1 961.49 m³,若不考虑体积减小的浅沟,平均每条浅沟每年增长 0.20 m³,草本覆盖的坡面浅沟平均侵蚀速率约为 215 t/(km²·a)。

关键词: 浅沟侵蚀; 高分遥感; 封禁流域; 黄土丘陵区

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)08-0239-06

Investigation on Ephemeral Gully Erosion Rate Based on QuickBird Images in Loess Hilly Region

ZHANG Yan FAN Conghui GONG Yinghua ZHANG Jiahua

(Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Ephemeral gully is a common erosion process and represents one of the significant watershed sediment resources in the hilly region on the Loess Plateau of China. A watershed with closure measures implement in Wuqi County, Shaanxi Province was taken as case study to quantify the relationship between the lengths of ephemeral gullies and eroded volume and assess the erosion rate in six years period. A total of 60 ephemeral gullies were surveyed under field conditions, and lengths of 245 ephemeral gullies were identified by two QuickBird images with the same time phase in years of 2007 and 2013. Results revealed that ephemeral gully density was 36.21 km/km² in 2013 and the total length of ephemeral gullies was changed from 13.74 km in 2007 to 14.12 km in 2013. Among 245 ephemeral gullies interpreted from images, the lengths of 46.94% gullies were decreased owing to connecting with gully heads with larger erosion rate or measurement error. Assuming that the cross section of an ephemeral gully is quadrangular frustum pyramid, the volume of 60 investigated ephemeral gullies was ranged from 0.4 m³ to 15.43 m³, which was 4.06 m³ on average. Based on the built regression model, the volume change of 245 ephemeral gullies from 2007 to 2013 was 71.52 m³. For 53.06% of ephemeral gullies with longer length than previous conditions, the average increasing rate was 0.2 m³ per year for each growing ephemeral gully and the total increased volume was 157.51 m³. The estimated erosion rate of ephemeral gullies was 67.31 m³/(km²·a) on the 12 slope units with area of 0.39 km². The total eroded volume was about 100.97 t/(km²·a) if the average soil bulk density was taken as 1.5 g/cm³. Assuming that the average erosion rate of the other 46.94% ephemeral gullies was similar to those with increased length, the average erosion rate on the slope covered by herbal could be 215 t/(km²·a). The results showed that ephemeral gully erosion rate could be estimated using very high resolution remote sensing such as QuickBird images, which could provide reference for the soil and water conservation on hilly Loess Plateau.

Key words: ephemeral gully erosion; high resolution remote sensing; blockading watershed; loess hilly region

收稿日期: 2017-01-21 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501604-05)和国家自然科学基金项目(41671272)

作者简介: 张岩(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: zhangyan9@bjfu.edu.cn

引言

浅沟侵蚀是介于细沟侵蚀和切沟侵蚀之间的一种过渡形态,不影响横向耕作,但不能消除其形态痕迹^[1]。浅沟侵蚀不仅是坡面主要的侵蚀产沙源^[2],而且导致土地退化^[3-5]。国内外学者在浅沟侵蚀的监测和发育机制等方面取得了大量研究成果^[6],但是较长时间尺度的浅沟侵蚀监测仍有难度。早期的浅沟侵蚀测量以野外实测为主,研究的时空尺度较小。张永光等^[7]在东北黑土区,以矩形模拟断面面积计算各段体积后加和得单条浅沟体积。胡刚等^[8]通过野外测量,研究黑土区浅沟形态参数特征以及浅沟体积估算模型。鉴于浅沟体积测量难度较大,CAPRA等^[9]建立了浅沟侵蚀预测的概念性模型,强调了浅沟长度对预测侵蚀体积的重要性。很多学者先后在不同地区建立了浅沟长度与体积的关系模型^[9-12]。

随着遥感技术的飞速发展,浅沟侵蚀研究不再局限于野外测量手段^[13],因而,某些地区在较大尺度上取得了浅沟侵蚀的测量结果。TEASDALE等^[14]利用航空测量技术测量了美国西部农耕地的浅沟侵蚀,平均为 $33.6 \sim 88.4 \text{ Mt/km}^2$,占地表产沙量的 $2.3\% \sim 7.7\%$ 。FIORUCCI等^[15]利用无人机和立体像对测量了意大利中部的科拉左内 48 km^2 范围内555条细沟和浅沟的长度、宽度和深度,由此计算浅沟侵蚀的体积在地块尺度为 28.4 Mg/hm^2 ,在小流域尺度为 0.68 Mg/hm^2 。

黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一,浅沟侵蚀是黄土高原重要的侵蚀类型,也是导致沟

状侵蚀加剧的主要原因之一^[16]。野外试验表明裸露黄土坡面浅沟侵蚀量达 $7\,000 \sim 8\,000 \text{ t/(km}^2 \cdot \text{a)}$,占坡面总侵蚀量的 $66.2\% \sim 71.4\%$ ^[17]。到目前为止,黄土高原区浅沟侵蚀研究主要局限于较小尺度^[16,18-19]或者是仅限于研究浅沟的密度、分布特征及影响因子^[20-21],较大时空尺度上的黄土区浅沟侵蚀量或浅沟体积变化研究还未见报道。本文以陕西省吴起县合沟小流域为研究对象,通过实地测量,建立浅沟长度和体积的关系模型,使用2007年和2013年2期QuickBird遥感影像估算黄土丘陵区浅沟长度的发育速率,从而计算小流域尺度浅沟侵蚀量和侵蚀速率,以期为黄土区浅沟发育研究和水土流失治理提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

研究区为黄土高原中部陕西省吴起县合沟小流域,位于 $36^\circ 53' 23'' \sim 36^\circ 55' 27'' \text{ N}$ 、 $108^\circ 12' 21'' \sim 108^\circ 13' 55'' \text{ E}$,属典型的黄土高原梁状丘陵沟壑区。小流域总面积为 4.3 km^2 ,海拔高度在 $1\,290 \sim 1\,580 \text{ m}$ 之间,属暖温带大陆性季风气候。年均气温 7.8°C ,多年平均降水量 478.3 mm ,7—9月份降水量占全年降水量的64%以上,降水年际变化大。多年平均陆地蒸发量为 $400 \sim 450 \text{ mm}$,属于半干旱区。主要土壤类型是在黄土母质上发育起来的黄绵土,质地为轻壤土^[22]。研究区位置见图1。

1.2 遥感数据源与处理方法

使用2007年6月30日和2013年7月5日的QuickBird影像,包括 0.61 m 分辨率全色波段数据

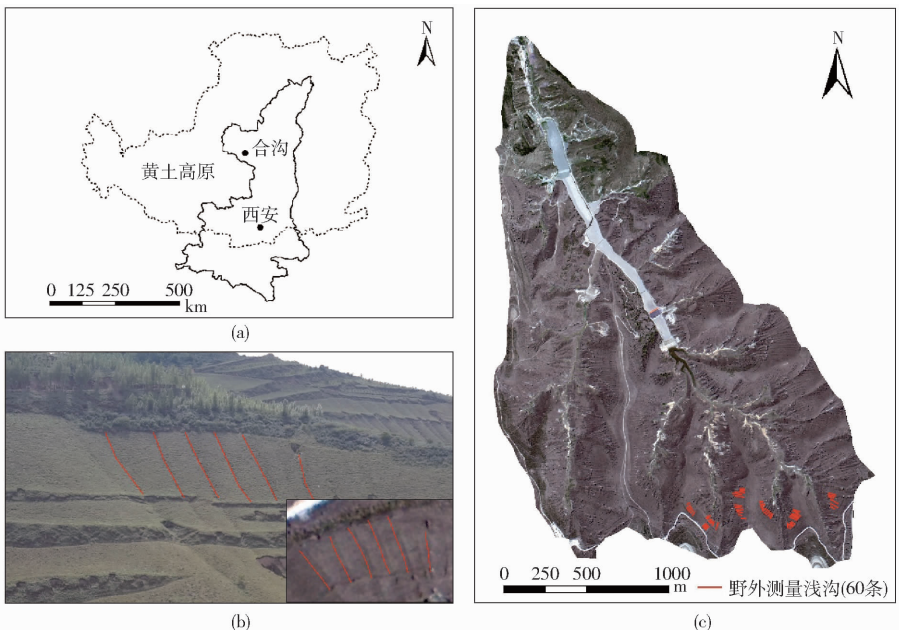


图1 研究区位置示意图和局部浅沟照片

Fig. 1 Location of study area and photo of ephemeral gullies

与 2.4 m 分辨率多光谱数据 ($0.45 \sim 0.90 \mu\text{m}$)。首先,在 ERDAS 9.3 中,按主成分分析法分别将 2 期 QuickBird 遥感影像融合,以三次卷积法重采样,进行正射校正以及边界锐化处理,最后按研究区范围进行掩模裁切,形成 0.61 m 分辨率的合沟小流域真彩图像。然后确定浅沟位置,选取 12 个独立坡面单元,勾绘坡面边界,选择 2007 年与 2013 年浅沟分布及特征较为清晰的区域,通过目视解译,利用 ArcGIS 9.3 对浅沟进行目视解译和数字化,生成浅沟线状图层。共提取 245 条在 2 幅影像上都可识别的浅沟。基于 1:10 000 地形图生成尺寸为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的 DEM,提取坡度。采用属性计算获取浅沟投影长度,再除以对应浅沟坡度的余弦,得到浅沟长度。在此基础上,计算 2007—2013 年浅沟密度和长度及其变化速率。

1.3 浅沟野外测量及其体积估算

在遥感解译的基础上,于 2014 年 7 月份对研究区部分易于识别和调查的浅沟进行实地测量。根据野外观察,浅沟横截面接近 U 型,横截面可以按照梯形计算。浅沟两截面之间的容积可视为上下底面都为梯形的四棱台,先估算其分段容积,进而合计各段容积,即为每条浅沟侵蚀的体积。因此,需要将浅沟分段,使用测绳和卷尺实地测量各段的距离、截面深度、截面顶宽度、截面底宽度,才能计算每段四棱台的体积。由于浅沟形态的不规则性致使精确测量浅沟体积存在一定的困难,如果选取截面过于稀疏会增加测量误差。本次测量过程中,除沟头和沟口为必测截面外,在每条浅沟内,依据浅沟长度,平均选取 2~4 个截面。沟头的判别标准是沟壁与坡面夹角超过 30° 。采用上述方法在研究区范围内实测浅沟 60 条,如图 1 所示。

2 结果与分析

2.1 浅沟长度发育速率

为了验证遥感解译浅沟长度的精度,对比分析了 60 条浅沟的实测长度和解译长度的差异。实测浅沟总长度 2 514.11 m,平均沟长 41.90 m,遥感解译浅沟总长度 2 655.64 m,平均长度 44.26 m,每条浅沟长度绝对差值平均值为 4.38 m。即使在高分影像上,精确确定沟头的位置仍有一定难度,而且部分浅沟沟头被植被覆盖或发育了一些陷穴,也影响解译浅沟长度的精度。

在研究区选取的 12 个独立坡面单元总面积为 0.39 km^2 ,解译浅沟共计 245 条,2007 年浅沟总长 13.74 km,密度 $35.23 \text{ km}/\text{km}^2$,单沟平均沟长 56.07 m;2013 年浅沟总长 14.12 km,浅沟密度 $36.21 \text{ km}/\text{km}^2$,

单沟平均沟长 57.62 m。浅沟和坡面单元的空间分布见图 2。

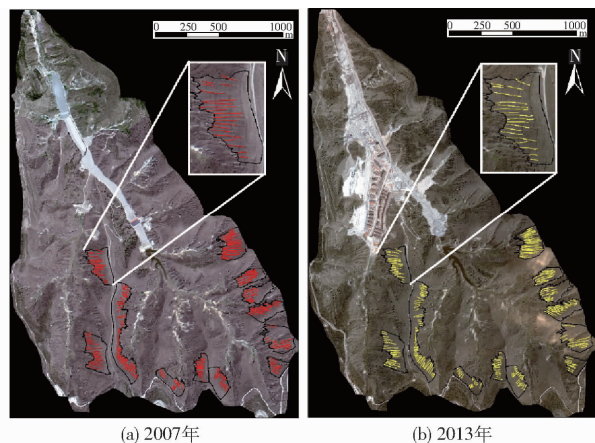


图 2 浅沟和坡面单元空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of slope units and ephemeral gullies

对比 2007 年与 2013 年 2 期影像相对应的 245 条浅沟可知,浅沟长度变化明显。从浅沟长度变化的频率分布(图 3)来看,浅沟长度在 6 a 间平均增长 1.55 m,有 53.06% 的浅沟长度增长,其余 46.94% 的浅沟长度缩减,60% 以上的浅沟长度变化集中在 $-5 \sim 5 \text{ m}$ 之间。进一步可分为 6 种情况:浅沟长度重度缩减(差值 $\Delta L < -10 \text{ m}$)、中度缩减($-10 \text{ m} \leq \Delta L < -5 \text{ m}$)、轻度缩减($-5 \text{ m} \leq \Delta L < 0 \text{ m}$)、轻度增长($0 \text{ m} \leq \Delta L < 5 \text{ m}$)、中度增长($5 \text{ m} \leq \Delta L < 10 \text{ m}$)、重度增长($\Delta L \geq 10 \text{ m}$) (图 4)。如果只考虑长度增长的浅沟,平均每条浅沟的长度发育速率为 $1.06 \text{ m}/\text{a}$ 。浅沟长度缩短,可能有 3 方面原因:①研究区浅沟的沟口多数与切沟沟头相连,而部分切沟溯源侵蚀速率大于浅沟发育速率导致浅沟长度缩短。②个别切沟沟头形成陷穴也造成浅沟长度的严重缩短。③ 2 期影像配准导致切沟长度解译误差。但无论哪种情况下,浅沟侵蚀仍然可能发生,只是无法准确计算。

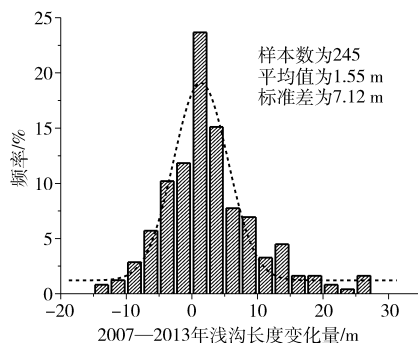


图 3 浅沟长度差异的频率分布直方图

Fig. 3 Frequency histogram of ephemeral gully length difference

2.2 浅沟体积计算模型

60 条野外实测浅沟的总长度为 2.51 km,平均

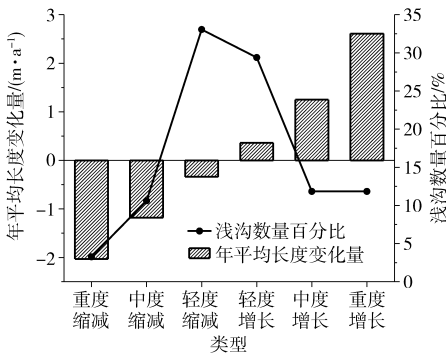


图4 6种类型浅沟数量分布和长度的年平均变化量

Fig.4 Percentage of six types of ephemeral gullies and change rates of gully length

长度41.90 m,总体积为241.4 m³。60条浅沟体积均值为4.02 m³,标准差为3.32 m³。76%的单条浅沟体积集中在5 m³范围内,只有极少数(10%)浅沟体积超过10 m³。长度较长且宽度较宽的浅沟侵蚀量基本在5~10 m³范围内。

利用实测的60条浅沟建立浅沟长度与体积之间的回归方程(图5),以便利用遥感解译的浅沟长度计算浅沟侵蚀量以及侵蚀速率。由于在60条浅沟中存在2条浅沟的局部深度大于1 m,属于浅沟和切沟的过渡类型,因此,在回归分析中作为异常值,未予考虑。58条浅沟长度(L)与体积(V)之间的回归方程表明,在一定程度上,浅沟长度与体积之间存在指数关系,即浅沟长度越长体积越大。研究可根据浅沟长度进一步推算出浅沟的体积。

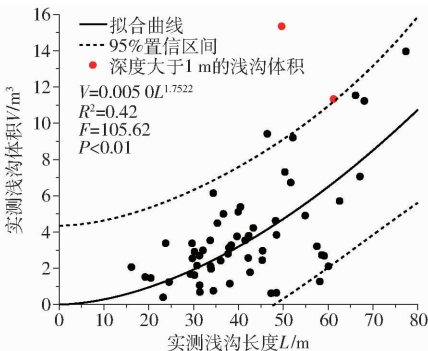


图5 实测浅沟体积与长度的回归模型

Fig.5 Regression model of gully volume and gully length based on field measurements

2.3 浅沟侵蚀量和侵蚀速率估算

根据上述回归模型,利用遥感影像解译的245条浅沟的长度,估算出研究区每条浅沟在2007年和2013年的体积,进而估算出6 a间研究区浅沟侵蚀量和侵蚀速率。结果表明,2007年245条浅沟总体积为1 889.97 m³,平均每条浅沟体积为7.71 m³;2013年总体积为1 961.49 m³,平均每条浅沟体积为8.01 m³。245条浅沟中,有53.06%呈现体积增长,

其余呈现体积减小的情况,与浅沟长度变化是一致的。如前所述,即使浅沟长度缩短,侵蚀仍然可能发生,只是无法准确计算。如果不考虑这部分体积减少的浅沟,6 a间平均每条浅沟体积增长1.21 m³,即平均每条浅沟每年增长0.20 m³(图6)。进一步计算得出,6 a间,长度增加的所有浅沟体积增加157.51 m³,平均每年增加26.25 m³。245条浅沟所在的12个独立坡面单元,总面积为0.39 km²,坡面浅沟侵蚀速率为67.31 m³/(km²·a)。

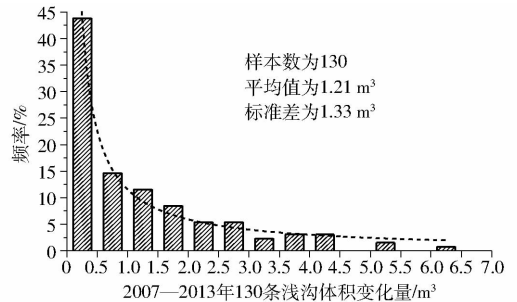


图6 基于遥感解译的130条浅沟体积增长的频率直方图

Fig.6 Frequency histogram of gully volume growth of 130 gullies based on QuickBird images

3 讨论

CASALI等^[23]总结了世界多地15项研究成果,浅沟侵蚀量变化范围为0.09~6.49 kg/(m²·a),而且大多数浅沟侵蚀研究是在耕作农地上开展的。VALCARCEL等^[24]在西班牙实测的农地浅沟侵蚀量为1.06 m³/(hm²·a),CHENG等^[25]在我国内蒙古太仆寺旗农地使用GPS监测的浅沟侵蚀量为8.8 m³/(hm²·a),CAPRA等^[26]在意大利监测的浅沟侵蚀量为0~10 m³/(hm²·a),其中部分浅沟未监测到侵蚀。在黄土高原区基于野外实测的浅沟侵蚀研究很少。ZHENG^[17]在野外小区观测无植被覆盖的黄土坡面浅沟侵蚀量约为7 000~8 000 t/(km²·a)。本文基于陕北黄土丘陵区野外调查和遥感解译,对245条浅沟进行计算,得出2007—2013年封禁小流域中草本覆盖的坡面浅沟中53%的长度增加,侵蚀速率为67.31 m³/(km²·a),如果平均土壤容重按1.5 g/cm³计算,约为100.97 t/(km²·a),假设其余47%的浅沟也具有相同的平均侵蚀速率,在坡面浅沟平均侵蚀速率为143.21 m³/(km²·a),约215 t/(km²·a),远低于ZHENG^[17]在裸露黄土坡面的观测结果,也低于其他区域大部分耕作土地上的研究成果^[23],说明在封禁条件下,即使是草本覆盖,浅沟侵蚀也已经得到有效控制。

本研究利用野外实地调查数据,建立了浅沟长度和体积的回归模型($V = 0.005 0L^{1.7522}$, $R^2 =$

0.42), 但与其他研究结果^[9,11-12,27]相比, 回归模型的决定系数较低。实地调查表明黄土区浅沟的深度变化较大, 而且有陷穴出现。野外调查 60 条浅沟的 256 个截面, 平均深度 0.19 m, 标准差 0.14 m, 最大深度达 1.22 m, 浅沟深度变化大, 导致相比于其他地区浅沟体积与长度的关系较差。

黄土丘陵区浅沟形成和发育受到坡度、坡长、汇流面积等多种因素影响^[20], 而本文只研究了 6 a 内草地覆盖坡面浅沟侵蚀的总体状况, 还不能反映降水量、地貌阈值等因素对浅沟发育的影响, 也不能代表退耕还林条件下黄土丘陵区总体浅沟侵蚀状况, 进一步研究可以选择多个研究区域、多种生态修复模式进行浅沟侵蚀的对比研究, 从而更好地分析黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀的总体状况。

通过遥感影像解译监测浅沟的长度变化会产生误差, 每条浅沟的解译长度和测量长度绝对差值的平均值为 4.38 m, 约为 10%。造成误差的原因有: ①研究区是封禁治理流域, 对于植被覆盖较好的浅沟沟头, 无论是在影像上还是在野外都很难确定, 因此在影像解译和野外测量的过程中都会产生较大的误差。②部分浅沟上发育着大小不等的陷穴, 对遥

感解译和野外测量的精度产生了较大的影响。③黄土高原地区土质疏松, 遭遇暴雨等情况, 侵蚀沟形态可能会发生较大改变, 而影像拍摄时间和野外测量时间相差 1 a, 也可能造成部分误差。

4 结论

(1) 在 2007—2013 年的 6 a 内, 单个浅沟平均沟长从 56.07 m 增长至 57.62 m, 浅沟密度由 35.23 km/km² 增加至 36.21 km/km², 浅沟的数量基本不变。浅沟长度变化主要集中在 -5 ~ 5 m 之间, 浅沟长度减小的主要原因是与切沟相连, 切沟的溯源侵蚀导致的浅沟长度减小。

(2) 根据实际测量的 60 条浅沟, 建立了浅沟体积与长度的关系模型 $V = 0.005 0L^{1.7522}$, $R^2 = 0.42$ 。在此基础上, 计算得到 245 条浅沟在 6 a 间总侵蚀量从 1 889.97 m³ 增加到 1 961.49 m³。若不考虑体积减少的浅沟, 平均每条浅沟每年增长 0.20 m³, 所在坡面的浅沟平均侵蚀速率为 67.31 m³/(km²·a)。在封禁条件下, 草本覆盖坡面浅沟侵蚀已得到有效控制。

参 考 文 献

- 1 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99 - 115.
ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region [J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99 - 115. (in Chinese)
- 2 POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. CATENA, 2003, 50(2): 91 - 133.
- 3 FOSTER G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning [J]. International Journal of Sediment Research, 2005, 20(3): 157 - 175.
- 4 XU M, LI Q, WILSON G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155(1): 9 - 18.
- 5 CASALI J, LOPEZA J J, GIRALDEZ J V. A process-based model for channel degradation: application to ephemeral gully erosion [J]. CATENA, 2003, 50(2-4): 435 - 447.
- 6 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.008.
ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48 - 59. (in Chinese)
- 7 张永光, 伍永秋, 刘洪鸽, 等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J/OL]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 35 - 39. http://stbxb.alljournal.com.cn/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20070109&journal_id=stbxb. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2007.01.009.
ZHANG Yongguang, WU Yongqiu, LIU Honghu, et al. Effect of topography on ephemeral gully erosion in Northeast China with black soils[J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 35 - 39. (in Chinese)
- 8 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 449 - 454.
HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 449 - 454. (in Chinese)
- 9 CAPRA A, MAZZARA L M, SCICOLONE B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy [J]. CATENA, 2005, 59(2): 133 - 146.
- 10 CHENG H, ZOU X, WU Y, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 4 - 14.
- 11 NACHTERGAELE J, POESEN J, VANDEKERCKHOVE L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two

- Mediterranean environments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(1):17-30.
- 12 ZHANG Y, WU Y, LIU B, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1-2):28-41.
- 13 CASALI J, LOIZU J, CAMPO M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion[J]. *CATENA*, 2006, 67(2):128-138.
- 14 TEASDALE G N, BARBER M E. Aerial assessment of ephemeral gully erosion from agricultural regions in the Pacific Northwest [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(6):807-814.
- 15 FIORUCCI F, ARDIZZONE F, ROSSI M, et al. The use of stereoscopic satellite images to map rills and ephemeral gullies[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10):14151-14178.
- 16 张科利,唐克丽,王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J/OL]. *水土保持学报*, 1991, 5(2):8-13. http://stbcxb.alljournal.com.cn/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=19910215&journal_id=stbcxb. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.1991.02.002.
- ZHANG Keli, TANG Keli, WANG Binke. A study on characteristic value of shallow gully erosion genesis on slope farmland in the Loess Plateau[J/OL]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(2):8-13. (in Chinese)
- 17 ZHENG Fenli. Ephemeral gully erosion process and modeling on the Loess Plateau of China[C]//*Proceedings of the 8th Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC)*, 2006:689-690.
- 18 郑粉莉,武敏,张玉斌,等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. *地理科学*, 2006, 26(4):438-442.
- ZHENG Fenli, WU Min, ZHANG Yubin, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4):438-442. (in Chinese)
- 19 武敏,郑粉莉,黄斌. 黄土坡面汇流汇沙对浅沟侵蚀影响的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4):74-76.
- WU Min, ZHENG Fenli, HUANG Bin. Experimental study on upslope runoff effects on ephemeral gully erosion processes at loessial hillslope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4):74-76. (in Chinese)
- 20 秦伟,朱清科,赵磊磊,等. 基于RS和GIS的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6):58-64.
- QIN Wei, ZHU Qingke, ZHAO Leilei, et al. Topographic characteristics of ephemeral gully erosion in loess hilly and gully region based on RS and GIS[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6):58-64. (in Chinese)
- 21 赵维军,许智超,张岩,等. 半干旱黄土区沟间地浅沟分布特征[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(4):586-591.
- ZHAO Weijun, XU Zhichao, ZHANG Yan, et al. Study on distribution of ephemeral gullies in semiarid loess area[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(4):586-591. (in Chinese)
- 22 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 CSAE*, 2014, 30(20):179-186. (in Chinese)
- 23 CASALI J, BENNETT S J, ROBINSON K M. Processes of ephemeral gully erosion[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2000, 15(1):31-41.
- 24 VALCARCEL M, TABOADA M T, PAZ A, et al. Ephemeral gully erosion in Northwestern Spain[J]. *CATENA*, 2003, 50(2-4):199-216.
- 25 CHENG Hong, ZOU Xueyong, WU Yongqiu, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(1):4-14.
- 26 CAPRA A, PORTO P, SCICOLONE B. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(1):77-87.
- 27 CAPRA A, SPADA C L. Medium-term evolution of some ephemeral gullies in Sicily (Italy)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154(12):34-43.