

基于 Google Earth 的一种浅沟侵蚀量的测算方法

郭子豪^{1,2}, 高建恩^{1,2,3†}, 吴莉娜⁴, 娄现勇⁵, 张元星⁶

(1. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 中国科学院大学, 100039, 北京;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100, 陕西杨凌;
5. 陕西省环保集团生态建设管理有限公司, 710000, 西安; 6. 湖南省水利厅, 410000, 长沙)

摘要: 针对黄土高原丘陵沟壑区浅沟侵蚀量测量费时耗力的问题, 提出一种新的浅沟沟道侵蚀量测算方法。基于传统的“三棱柱”侵蚀量测算方法及 Google Earth 所提供的公共数据图像源, 利用 Google Earth 地形工具快速精确地测得浅沟侵蚀量。以在 2013 年延安极端降雨中, 安塞马家沟流域多级梯田出现的典型浅沟侵蚀为算例, 运用此方法, 与实测值相比, 田面高程相对误差 23.2%, 田面面积相对误差 2.7%, 侵蚀沟深度相对误差 14.8%, 侵蚀量相对误差 4.8%, 虽然在侵蚀量的一系列测算中存在误差, 但完全可以通过数学方法进行削减。基于 Google Earth 的浅沟侵蚀量的测算方便快捷, 是一种利用公共数据测量浅沟侵蚀量的新方法, 可为高效开展黄土高原丘陵沟壑区坡面水土流失调查及治理提供技术参考。

关键词: Google Earth; 浅沟; 侵蚀量; 三棱柱法

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2018)04-0138-06

DOI: 10.16843/j.sswc.2018.04.018

A measurement method for shallow gully erosion amount based on Google Earth

GUO Zihao^{1,2}, GAO Jianen^{1,2,3}, WU Lina⁴, LOU Xianyong⁵, ZHANG Yuanxing⁶

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing, China;
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
5. Shaanxi Environmental Protection Group Ecological Construction Management Co., Ltd., 710000, Xi'an, China;
6. Hunan Provincial Water Resources Department, 410000, Changsha, China)

Abstract: [**Background**] Shallow gully erosion is a very common and important type of erosion in the Loess Plateau, and the amount of shallow gully accounts for a large proportion of the total erosion on the slope. Shallow gully erosion is not only the main source of sand production, but also the main cause of low agricultural output and land degradation. Shallow gully is widely distributed, but the measure of it is inefficient. Therefore, there is an urgent need for a quick and easy way to complete this work. [**Methods**] Google Earth can provide information such as path length, elevation and area for public, so the erosion amount of a shallow gully can be measured by it without GIS software or other tools for

收稿日期: 2017-02-09 修回日期: 2018-05-02

项目名称: 陕西省自然科学基金基础研究计划“造地工程水平平衡与生态保育技术研究”(2016ZDJC-20); 国家重点研发计划“黄土丘陵沟壑区边坡工程-沟道整治生态安全调控技术”(2017YFC0504703); 国家自然科学基金“复杂下垫面暴雨径流侵蚀相似性模拟实验研究”(41371276); 中国科学院水土保持研究所创新工程重要方向项目“水土保持工程关键技术与集成示范”(A315021615)

第一作者简介: 郭子豪(1992—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zihaoghost@gmail.com

† 通信作者简介: 高建恩(1962—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 水土保持工程。E-mail: gaojianen@126.com

secondary processing. As for channel volume measurement, the “Triangular prism method” is feasible, means that the erosion gully can be simplified into a triangular prism whose bottom surface is a triangle with a vertex facing down, the volume of “triangular prism” is the volume of the gully roughly, the resulting value is the amount of erosion. Specifically, the erosion gully surface on the digital map can be divided into rectangular blocks by using terrain tools of Google Earth. We can view each rectangular block as the base of a “triangular prism”, then base on the traditional “Triangular prism method” erosion measurement method and use the relevant parameters the Google Earth provides for public, the volume of each “triangular prism” is measured. Finally, superimpose every volume of “triangular prism” all, the total amount of shallow gully erosion can be measured quickly and accurately. [**Results**] Although Google Earth is deviant in eroded region, but this error can be regarded as a systematic error which can be eliminated mathematically, as for the minuteness error values that still exist after the elimination can be ignored. And the random error of this study is mainly derived from the slight differences in the operation of shadow analysis under Google Earth, for the nature of random error, it can be corrected through repeated calculations. The following is the actual test validation, after the extreme rainfall in Yan’an, 2013, a representative shallow gully erosion in terraces occurred in the Majiagou basin. The relative error of elevation is 23.2%, the relative error of area is 2.7%, the relative error of gully depth is 14.8% and the relative error of shallow gully erosion amount is 4.8% compared with the measured. It shows the accuracy of shallow gully erosion amount measurement method based on Google Earth is meets the requirements of erosion amount measurements in soil and water conservation. [**Conclusions**] Shallow gully erosion amount measurement method based on Google Earth is a new method of shallow trench erosion measurement, which can provide a technical reference for the investigation and control of soil erosion on slope surface in the Loess Plateau.

Keywords: Google Earth; shallow gully; erosion amount; triangular prism method

侵蚀沟是一种具有陡坡的遭受间歇性洪水冲刷的集水道,作为输沙通道和侵蚀主体,其研究对揭示水土流失规律和进行流域产沙模拟有重要意义^[1]。在黄土高原浅沟侵蚀是十分常见和重要的侵蚀类型,侵蚀量通常占坡面总侵蚀量的 26.6% ~ 59.2%^[2],浅沟侵蚀不仅是坡面主要侵蚀产沙源^[3],而且降低农业产出、导致土地退化^[4]。浅沟分布广泛,测量费时费力,因此,找到一种简便易行的浅沟侵蚀量测量方法将会是侵蚀沟研究的一项突破。目前,常用的浅沟测量方法主要有填土法^[5]、容积法^[5]、摄像测量法^[5]、仪器法^[5-7]、地形测针板法^[8]、水准测量法和制图学方法相结合的方法^[9]等;但是这些方法均需要大量的野外作业,而且采样机械,工作量大,需利用专业软件进行后期处理,存在诸多不足,急需一种快捷简便的方法来完成这一工作。

Google Earth(GE)是著名网络公司 Google 向公众提供的一款全球地理信息系统,提供了非常丰富的地理信息^[10]。它可提供路径长度、高程以及面积等信息,对于水土保持行业来说,仅仅利用 GE 即可

测出侵蚀沟的侵蚀量,大大提高了工作效率。

沟道体积的测算运用“三棱柱法”^[11],即将侵蚀沟简化成三棱柱,其体积则大致为侵蚀沟的体积,所得数值即为此沟道的侵蚀量。

1 Google Earth 对地观测原理

以若干颗人造卫星,不断运用传感器对地球进行一遍遍探测扫描,再将所得到的多个地理信息,上传至服务器,在经过一系列的算法优化后,将各种地形信息,与在陆地低空完成的航拍图片相结合,以多个图层的形式,在 3D 建模的球体上来呈现,即我们现在所看见的 Google Earth,如图 1 所示。

2 系统与随机误差及消除

2.1 坐标系统误差

坐标误差主要来自 GE 采用的 WGS84 和西安 80 坐标系经纬度的差别;但是对于侵蚀量测量来说,具体位置的表述并不是主要影响因素,因此,本次研究并没有用专业软件进行位置纠偏处理。

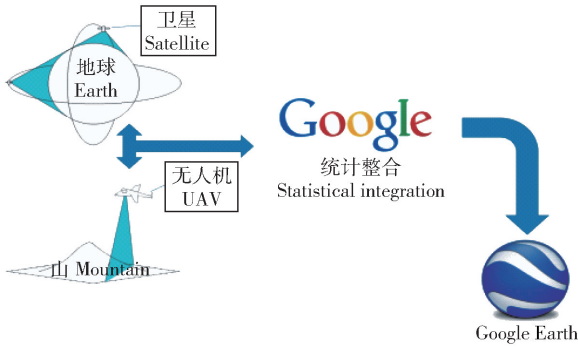


图 1 Google Earth 对地观测原理

Fig. 1 Earth observation principle of Google Earth

2.2 高程系统误差

卫星测高是利用卫星携带的高度计,实时测量地球表面高度随时间的变化信息,高程误差在所难免,具体分为卫星轨道误差、环境误差、仪器误差^[12]。为了叙述方便,将上述 3 种误差统称为高程系统误差。

卫星测高观测值客观上受着众多因素的影响,必须对其进行改正。如图 2 所示,精确的高程计算公式为

$$h_0 = h - h_e - h_a + \Delta h_0 \quad (1)$$

式中: h_0 为计算的绝对高程, m; h 为卫星质心到地球质心的距离, m; h_a 为卫星到星下点瞬时海面的高度, m; h_e 为星下点的椭球高度, m; Δh 为高程测量系统误差, m。

在侵蚀浅沟的测算中,所测算面积较小,因此,在卫星高程测量中,完全可以看作是 1 个很小的单元,无论是其到地球质心的距离 h , 还是星下点的椭球高度 h_e , 均可以看成是个常数,并定义 H 为所测区域卫星质心到地球质心的距离, H_e 为所测区域椭球高度:

$$\begin{aligned} h_{o_1} &= h_1 - h_{e_1} - h_{a_1} + \Delta h_1; \\ h_{o_2} &= h_2 - h_{e_2} - h_{a_2} + \Delta h_2; \\ &\vdots \\ h_{o_N} &= h_N - h_{e_N} - h_{a_N} + \Delta h_N; \end{aligned} \quad (2)$$

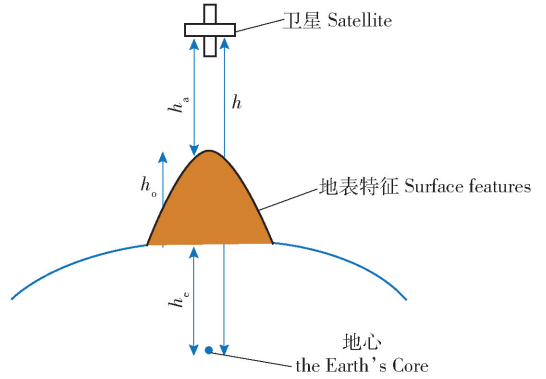


图 2 卫星测高原理

Fig. 2 Principle of satellite altimetry

即有

$$h_1 = h_2 = \dots = h_N = H; \quad (3)$$

$$h_{e_1} = h_{e_2} = \dots = h_{e_N} = H_e. \quad (4)$$

又在侵蚀量的计算中,所需求的高程均为相对高程,即:

$$h_{测_1} = H - H_e - h_{a_1} + \Delta h_{测_1};$$

$$h_{测_2} = H - H_e - h_{a_2} + \Delta h_{测_2};$$

$$h_{相对} = h_{测_1} - h_{测_2} = (h_{a_2} - h_{a_1}) + (\Delta h_{测_1} - \Delta h_{测_2}). \quad (5)$$

又有小区域中,系统误差可视为相近,故

$$\Delta h_{测_1} - \Delta h_{测_2} \approx 0.$$

既有卫星在该 2 星下点瞬时海面高的差值,即可认为是真实高度的差值。

在理论推算后,则是必要的实实验证。

由图 3 和表 1 可见,在这一梯田群附近,GE 所

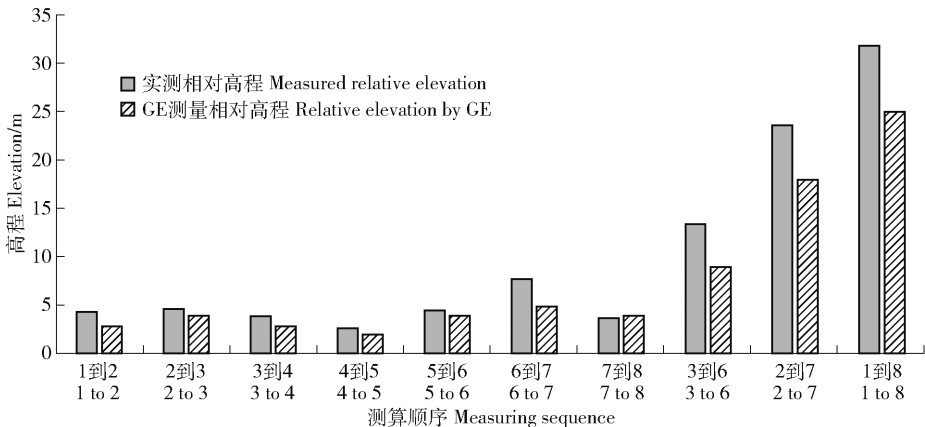


图 3 GE(Google Earth)数据与实测相对高程比较

Fig. 3 Comparison of GE data with the measured relative elevation

测相对高程均比实际偏小。在相对高差较小区域, 实测与 GE 数据的偏差也是相应较小, 反之, 相对高差越大, 也即在越陡峭的地方实测与 GE 数据的偏差也就越大, 符合遥感卫星“在越陡峭的地方误差

越大”的特征。

GE 在浅沟侵蚀区域数据存在一定误差, 田面高程相对误差为 23.2%, 但误差完全可以看作系统误差, 可以利用数学方法消除。

表 1 GE 数据与实测相对高程差值比较

Tab. 1 Differential value comparison of GE data and the measured relative elevation

测算顺序	1 到 2	2 到 3	3 到 4	4 到 5	5 到 6	6 到 7	7 到 8	3 到 6	2 到 7	1 到 8
Measuring sequence	1 to 2	2 to 3	3 to 4	4 to 5	5 to 6	6 to 7	7 to 8	3 to 6	2 to 7	1 to 8
差值 Difference/m	1.4	0.6	0.9	0.7	0.5	2.8	-0.2	4.4	5.5	6.7

注: 1 到 2 即指从上往下第 1 阶梯田到第 2 阶梯田其他类同。Notes: 1 to 2 refers to from the upper to lower 1st terrace to the 2nd terrace. The same below.

2.3 随机误差

随机误差主要来源于在 GE 中对阴影分析操作的微小差异, 针对随机误差的性质, 可以通过多次测算来进行缩小。

3 研究区域概况

马家沟流域位于陕西省延安市安塞县(E 109°08' ~ 109°22', N 36°45' ~ 36°58'), 流域内地形陡峻, 水土流失严重, 沟壑密度约为 4.5 km/km², 平均土壤侵蚀模数 14 000 t/(km²·a)^[13], 属于极强度土壤侵蚀区。研究区气候属于大陆性半干旱季风气候, 其中 6—9 月份降雨约占全年降雨的 80%^[14]。2013 年 7 月份延安出现极端强降雨, 月降水量达 568 mm, 降雨频率分析结果显示月降雨量超过万年一遇降雨标准^[15], 期间该流域出现多处典型浅沟侵蚀。

4 工具与方法

本研究主要使用的软件是 Google Earth Pro (7.1.2.2041), 选取马家沟流域曹新庄多级梯田作为特征算例。该处共有 8 阶梯田, 第 1 级梯田断面位于该多级梯田最上部, 按照高程从上到下依次为 1~8 阶梯田, 取第 8 阶梯田上侵蚀沟为算例。对沟道的概化方法为的“三棱柱法”, 即将侵蚀沟的两侧坡面与沟底的组合视为一个三角形顶点向下的三棱柱。

2 个坡面间虚线概化的是沟道底部, 当在 GE 中俯视此沟道时, 需做 2 条“测量线”, 实为 2 条路径线 a、b, 如图 4 所示, 这 2 条测量线的作用为:

1) 测量长度, 沟道覆盖面积, 即此三棱柱面底面积, 为 $a \times b$ 的值;

2) 显示坡降, 在 GE 中检视这 2 条路径的配置文件, 其中坡降大的方向为沟道走向;

3) 显示沟道深度, 垂直于沟道走向的 1 条路径

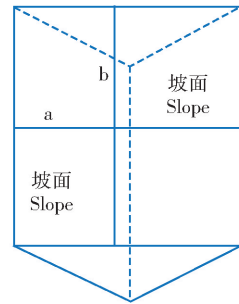


图 4 坡面概化及所做辅助线

Fig. 4 Slope generalized and guides

线, 其高度配置文件会显示此条路径线的海拔变化, 其海拔差即为所概化沟道的深度。

进行测算时, 首先, 需找出测算地点。以马家沟流域曹新庄第 8 阶梯田上的最大的侵蚀沟为例, 这里 GE 提供的是 2013 年 11 月 21 日的卫星图片。

接下来, 利用“添加多边形”工具, 控制视角海拔高度在 1.30 km, 勾勒出目标的轮廓, 可得到经纬度、周长、面积等基本信息。

第 3 步, 将所求侵蚀沟尽可能分割成几块矩形, 使其覆盖所有的侵蚀沟, 每块矩形为“三棱柱法”的底面。

第 4 步, 即可进行计算。以第 1 块为例, 做“辅助线”2 条相交线条 a、b, 利用“高度配置文件”, 来显示辅助线的高差, 确定“三棱柱”的走向, 先处理路径 a, 显示其为 1 205 m, 且高度差微小, 可以忽略, 按照将没有高度降低或者高度降低相对微小的那条辅助线作为“三棱柱”的底边的原则, a 即为三棱柱的底边, 可以看出长度为 3.28 m; 接下来, 从 b“辅助线”高度配置来看, 有明显的坡降, 即高度损益 -0.8 m, 因此, 按照将高度降低明显的那条辅助线作为三棱柱的长, 其高度降低作为底面三角形的高, 其坡降视作此“三棱柱”底面三角形的高, 即所概化侵蚀沟的深度, 此侵蚀沟深

0.8 m,长4.32 m。可计算出此“三棱柱”的体积为 5.66784 m^3 ,即可认为此三棱柱所代表的第1块侵蚀沟的侵蚀量为 5.67 m^3 。

5 结果

经过第1个图区的处理,同理可得剩下的6块区域的体积。如表2所示:

表2 第8梯田第1处浅沟分块测算

Tab.2 Block calculation of the first shallow gully in the eighth terrace

图块	底	高(深)	长	体积
Split number	Base/m	Height(Depth)/m	Length/m	Volume/ m^3
1	3.28	0.80	4.32	5.67
2	5.78	1.32	5.64	21.52
3	0.99	3.10	13.30	20.41
4	7.37	0.82	3.72	11.24
5	3.40	0.27	1.36	0.62
6	0.60	2.02	8.77	10.63
7	1.58	1.46	6.72	7.72
合计 Total/ m^3		77.84		

做完上述工作,即可确定此梯田的第1处侵蚀沟的侵蚀量为 77.84 m^3 。

6 精度分析及测算验证

6.1 精度分析

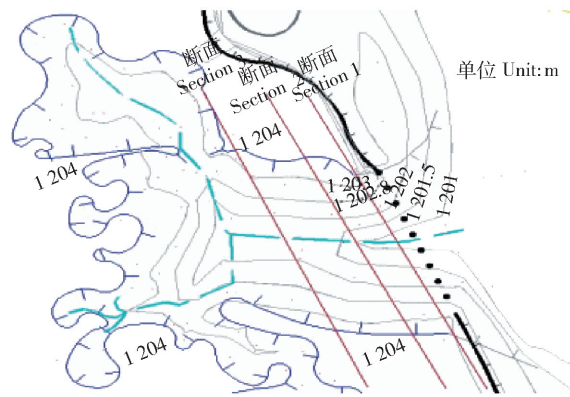
做完侵蚀量的测算后,随机选取1、2、8号梯田,对比张元星《流域水沙变化对水土保持梯田措施的响应研究》(2014)实测数据,进行面积精度验证,3块梯田相对误差分别为2.61%、0.18%、4.88%,其差别主要来自对GE中阴影边界选取问题,平均2.66%的误差,在不影响侵蚀量计算的情况下,可忽略;因此,在面积测算部分GE是准确的。

高程方面,据《流域水沙变化对水土保持梯田措施的响应研究》“原型梯田典型断面”实测,上文所测第3图块沟深,即图5“断面2”最大深度。实测“断面2”平均深度为2.7 m,而GE测算第3图块深度为3.1 m,误差为0.4 m,与实测相比,40 cm的误差是在容错范围内的。

在GE中进行面积测算得出的结果以及对比如下。

6.2 侵蚀量测算验证

侵蚀量的验证,将用GE测算第8号梯田的总侵蚀量与实测侵蚀量进行对比。第8梯田主要有2个大的侵蚀沟,将2处侵蚀沟侵蚀量均测算得出



等高线高差为0.5 m。Contour elevation difference is 0.5 m

图5 原型梯田典型断面

Fig.5 Typical cross sections of the prototype

第8梯田总侵蚀量为 $77.84\text{ m}^3 + 251.53\text{ m}^3$ 即为 329.37 m^3 ,与实测所得数据 314.26 m^3 相比,精度为95.2%,符合水土保持方面对侵蚀沟量测的要求。

表3 GE测算与实测数据对比

Tab.3 Comparison of the measured data by GE and the measured data

梯田	GE 测算面积	实测数据
Terrace	Area measured by GE/ m^2	Measured data/ m^2
第1梯田 First terrace	3 408	3 499.3
第2梯田 Second terrace	1 989	1 979.5
第8梯田 Eighth terrace	6 098	5 814.3

7 结论

在黄土高原丘陵沟壑区,尤其在比较平坦的塬面地区,基于Google Earth来测算侵蚀沟侵蚀量的方法简单易用,操作简捷,可以经过数学方法有效降低其误差。在2013年延安极端降雨天气后的安塞梯田典型浅沟侵蚀量计算中,运用此方法,与实测值相比,田面高程相对误差23.2%,田面面积相对误差2.7%,侵蚀沟深度相对误差14.8%,第8阶梯田总侵蚀量为 329.37 m^3 ,与实测所得数据 314.26 m^3 相比,相对误差为4.8%。因此,在侵蚀量测算中使用Google Earth能完全满足测算要求,提高计算效率,体现较强的实用性。

8 讨论

1)较传统方法而言,Google Earth可以更加方便地运用于侵蚀沟、滑坡、泥石流,甚至是大区域管道运输等建设项目侵蚀量的测量,其打破了传统方法

的局限,为研究人员了解实地情况提供了更加主动有效的数据。

2) 本方法对 Google Earth 的依赖性还是比较高,而且 Google Earth 的高程信息没有开放,尤其是微地形高程数据的精度较低,在某些区域存在较大的系统偏差,目前只能通实测来进行误差修正,但是随着 Google Earth 不断的更新和以后高程信息的开放,基于 Google Earth 侵蚀信息自动提取以及其自动处理将会是下一步研究重点。

9 参考文献

- [1] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报, 2008,45(5):802.
LI Zhanbin, ZHU Bingbing, LI Peng. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5):802.
- [2] 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.
ZHENG Fenli, WU Min, ZHANG Yubing, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4):438.
- [3] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003,50:91.
- [4] FOSTER G R. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning[J]. International Journal of Sediment Research, 2005,20:157.
- [5] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报, 1989(4):41.
ZHENG Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 1989(4):41.
- [6] 岳鹏,史明昌,杜哲,等. 激光扫描技术在坡耕地土壤侵蚀监测中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2012,10(3):64.
YUE Peng, SHI Mingchang, DU Zhe, et al. Application of laser scanner in soil erosion monitoring of cultivated slope land[J]. Science of Soil & Water Conservation, 2012, 10(3):64.
- [7] 肖海,夏振尧,朱晓军,等. 三维激光扫描仪在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报, 2014(3).
XIAO Hai, XIA Zhengyao, ZHU Xiaojun, et al. Application of three-dimensional laser scanner on research of slope soil erosion[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2014, 34(3):198.
- [8] 丁文峰,张平仓,李勉. 地形测针板在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. 中国水土保持, 2006(1):49.
DING Wenfeng, ZHANG Pingcang, LI Mian. The application of terrain measuring needle plate in the study of soil erosion on slope [J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(1):49.
- [9] 贾立志,高建恩,张元星,等. 黄土丘陵沟壑区梯田暴雨侵蚀状况及规律分析[J]. 水土保持研究, 2014,21(4):7.
JIA Lizhi, GAO Jianen, ZHANG Yuanxing, et al. Analysis of rainstorm erosion disaster in terrace field in loess hilly and gully region[J]. Research of Soil & Water Conservation, 2014,21(4):7.
- [10] 王自剑. Google Earth 软件在物探测线设计中的应用[J]. 硅谷, 2011(19):137.
WANG Zijian. Google Earth software application in the design of the measuring line in geophysical prospecting [J]. Silicon Valley, 2011(19):137.
- [11] 钱时勉. 三角棱柱体法计算土方量[J]. 甘肃冶金, 2003,25(3):49.
QIAN Shimian. Calculation of earth volume by triangular prism method [J]. Gansu Metallurgy, 2003,25(3):49.
- [12] 翟国君,黄谟涛,欧阳永忠,等. 卫星测高原理及其应用[J]. 海洋测绘, 2002,22(1):57.
ZHAI Guojun, HUANG Motao, OUYANG Yongzhong. Principle and application of satellite altimetry [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002,22(1):57.
- [13] 中国科学院水利部西北水土保持研究所. 黄土丘陵地区水土保持型生态农业研究[M]. 陕西杨凌:天则出版社, 1990:36.
Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources. Study on soil and water conservation ecological agriculture in loess hilly region [M]. Yangling, Shaaxi: Tianze Press, 1990: 36.
- [14] 陈凤娟,张晓萍,付艳玲,等. 陕北安塞县马家沟流域近 20 a 来土地利用变化分析[J]. 水土保持通报, 2011(1): 244.
CHEN Fengjuan, ZHANG Xiaoping, FU Yanling, et al. Land use change of Majiagou Catchment in Ansai county, Northern Shaanxi province in recent 20 years [J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2011(1):244.
- [15] 李慧娟,高建恩,张元星,等. 延安极端降雨特性分析及对梯田侵蚀灾害影响[J]. 水土保持学报, 2016(6):79.
LI Huijuan, GAO Jianen, ZHANG Yuanxing, et al. Analysis of Yan'an extreme rainfall characteristics and impacts of erosion disasters on terraces[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2016(6):79.