

采用不同方法测量切沟的误差分析*

尹佳宜, 伍永秋, 汪言在

(北京师范大学 防沙治沙教育部工程研究中心, 中国沙漠研究中心, 北京 100875)

摘 要: 使用卷尺测量切沟的体积和面积是研究土壤侵蚀中最常用也是传统的测量方法, 着重分析使用卷尺测量切沟时, 测得切沟体积的误差。其误差主要包括由卷尺精度限制而导致的误差, 以及由测量原理所造成的系统误差。运用误差传递公式计算由卷尺精度限制导致的误差, 这种误差与测量相邻横截面的间隔长度无关, 只与测量仪器即卷尺有关; 对于不同的切沟, 卷尺精度导致的误差占所测切沟体积的百分比也基本相同, 不到 2%。由测量原理造成的系统误差又可分为两种: 由于横截面不规则造成的系统误差, 最多可达到体积的 2%; 由于相邻 2 个横截面之间形状不规则造成的系统误差。在野外测量的时候, 每次测量距离保持在 10 m 左右比较合适。卷尺测量与差分 GPS 测量的切沟体积的比较表明, 单次测量误差较大, 在 10% 左右, 而两次测量的体积差, 即两种方法所得的切沟体积的年际变化量相差不大, 说明用卷尺测量切沟体积的年际变化是有效的。

关键词: 切沟; 切沟测量; 误差分析

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2008)01-0012-05

Error Analysis of Gullies' Measurement with Different Methods

YIN Jia yi, WU Yong-qiu, WANG Yan-zai

(MOE Engineering Center of Desertification and Blownsand Control at Beijing Normal University, China
Center of Desert Research at Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The authors mainly study the error of the gullies' volume when they are measured with tapes, since it's a very traditional method to measure gullies' volume and area with tapes in the research of gully erosion. The error is mainly caused by limited precision of tapes and mechanism of measurement. The error caused by limited precision of tapes can be calculated with error transfer formula, and it was found that this kind of error does not depend on the distance between two neighbouring cross sections, but only relate to the tapes we used. The ratio of the error to gullies' volume is less than 2%, which is the same for different gullies. The system error caused by mechanism of measurement is comprised of two parts. One is due to the nonidentity of cross sections, which has maximum value of 2%; the other one is caused by irregularity of cross sections. In order to minimize the system error caused by the nonidentity of cross sections, it's important to decrease the distance between two neighbouring cross sections, which was about 10 meters in our outdoor measurement. Additionally, we also compare the gullies' volume measured with tapes and GPS. It's found that the error of single measurement is about 10%, and that the annual variations of gullies' volume measured with tapes and GPS are almost the same. Therefore, it's an effective method to measure annual variation of gullies' volume with tapes.

Key words: gully; gullies' measurement; error analysis

1 引 言

切沟是以不能横过耕作为主要特征的沟谷, 作为一种线状侵蚀形态, 其深度足以影响正常的耕作, 切沟本身不能被耕作消除^[1-2]。切沟的横截面积超过 929 cm²^[3], 成为了一种永久的地貌特征。切沟的发育加剧了水土流失过程, 使土地变得破碎, 阻碍农业生产的机械化作业, 造成粮食减产和交通不便^[4-5]。目前, 我国的黄土高原、东北黑土区以及南方红土区, 切沟数量巨大。据统计, 仅黑土区内现有侵蚀沟 25 万多条, 侵蚀耕地 39 万 hm² 多, 切沟也成为造成黑土地区水土流失的主要原因之一^[6-7]。

随着切沟侵蚀在土壤侵蚀中的重要性为越来越多的

研究者所认识, 切沟侵蚀研究获得了迅速的发展。但是长期以来, 对于切沟测量来说, 测量误差的研究比较缺乏。卷尺和 GPS 在测量切沟体积时的误差大小一直没有明确说明, 以及使用卷尺和 GPS 这两种测量方法所测量出的切沟体积的差别究竟有多大, 一直没有明确的答案。

研究区选择黑龙江省九三农垦分局鹤山农场, 地理位置为东经 125°16', 北纬 48°58'。这里是典型的黑土区, 地处小兴安岭西南麓, 小兴安岭向松嫩平原过渡的漫川漫岗地带; 地形起伏不大, 有坡长坡缓的特点, 耕地坡度一般为 1~3°, 大坡度在 3~6°。但是坡长较长, 一般在 500~2 000 m, 最长的可达 4 000 m。

* 收稿日期: 2006 10 26
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407204); 国家科技攻关项目(2005BA517A06)
作者简介: 尹佳宜(1982-), 女, 在读硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。

2 测量方法及测量结果

切沟的地貌形态一般表现为纵剖面与所在坡面基本一致,横剖面一般为 U 或 V 字形^[8]。切沟的横截面如图 1 所示,横截面 S 一般为梯形或者近似为梯形。在野外测量时,由于有些切沟的长度比较长,以及野外工作量的限制,通常在测量时每隔 10 m 或 20 m 甚至是 50 m 测量一个横断面,用以计算切沟的体积。用这种方法,计算得到的体积并不十分准确。

目前测量切沟的方法主要是 2 种:用卷尺测量和用差分 GPS 测量。使用差分 GPS 测量切沟,可以精确测得切沟的体积、侵蚀面积、切沟的形状,连续监测可获得切沟的动态变化,并且可以达到较高的精度要求,但是使用差分 GPS 测量切沟时,野外工作量较大。所以对于空间尺度较大的沟蚀调查,例如只是要求统计切沟侵蚀的面积或体积,采用传统卷尺测量的方法则简便易行,操作方便。以下对 2 种方法进行对比分析。

2.1 卷尺测量

为了研究野外用卷尺测量的误差,分别对 3 条切沟进行比较细致的测量。每隔 1 m 测一个横断面,用以计算每个横断面的面积。将切沟分成 n 个长度为 H 米的小段。切沟的总面积为 n 段切沟的体积之和(图 2)。

横截面面积为

$$S_i = \frac{1}{2}(l_i + l'_i)h_i \tag{1}$$

单个小段切沟的体积

$$V_i = \frac{(S_i + S_{i+1})H}{2} = \frac{1}{4}[(l_i + l'_i)h_i + (l_{i+1} + l'_{i+1})h_{i+1}]H \tag{2}$$

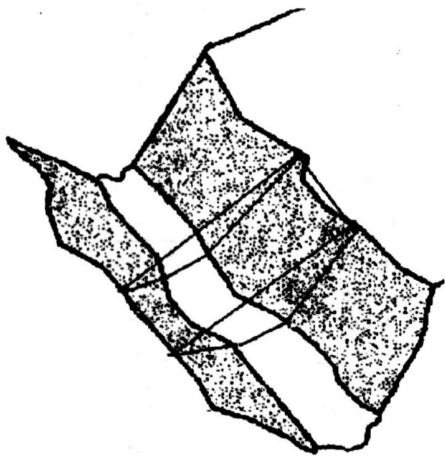


图 1 切沟的横截面示意图

切沟的总体积为

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n [(l_i + l'_i)h_i + (l_{i+1} + l'_{i+1})h_{i+1}]H \tag{3}$$

式中: S_i ——第 i 个横截面的面积; V_i ——第 i 小段切沟的体积。 l_i, l_{i+1}, h_i ——第 i 个横截面的上底、下底和高; H ——每小段切沟的长度。

2.2 利用 GPS 进行切沟侵蚀测量及监测

所采用的 GPS 配置主要包括基准站、移动站、电台和手簿。接收机为 2 台 Trimble 4700 双频 GPS 接收机,1 台安置在基准站,另 1 台安置在流动站。通过对切沟两边沟沿线及切沟的沟底线处进行测量^[9],使用 ESRI 公司的 GIS 软件

ARCGIS 8.3,生成分辨率为 0.4 m 的 DEM。

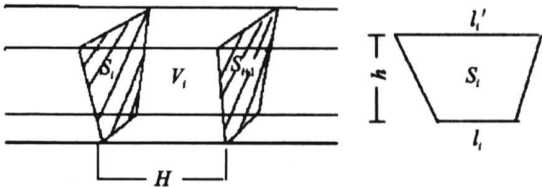


图 2 切沟的体积

测量的切沟沟边线及沟底的地形特征线的点连接起来形成隔断线,利用连接起来的隔断线和测量的点数据得到反映切沟形态及地貌特征的不规则三角网 TIN^[9-10],进而获得切沟的规则格网 DEM,对不同时间测量的切沟所作的 DEM 进行相减运算,得到反映切沟形态变化的 DEM,可以明确反映切沟的沉积与侵蚀^[9]。同时用上述方法生成的反映切沟形态的 DEM,与同次测量仅用沟边生成的 DEM 进行相减运算,可得到切沟的体积。

利用 GPS 监测切沟侵蚀,其精度主要取决于所建立的切沟 DEM 的质量。在建立 DEM 的过程中,DEM 的质量又主要受作为隔断线的沟沿线和沟底地形特征线的影响。因此,利用 GPS 进行切沟侵蚀监测,要确保沟沿线、沟底地形特征线测量的质量,这样才能得到高精度的研究结果^[9]。

2.3 测量结果

研究所选取的切沟位于黑龙江省鹤山农场鹤北小流域中的 3 条切沟。其为:六队上游小沟、四队沟、2 号流域谷底沟。分别在 2005 年 5 月和 2006 年 5 月用卷尺和 GPS 2 次测量这 3 条切沟。

分别取单位小段切沟的长度 H 为 1, 2, 3, 4, 5 m, 8, 10, 15, 20, 25, 30 m 进行计算,即相当于对于每条沟按照间隔 1, 2, 3 m 到 30 m 测量一个横断面,计算体积,结果见表 1。

3 误差计算

误差按照自身的特点和服从的规律分为系统误差、偶然误差和过失误差^[11]。偶然误差是指在相同的测量条件下,多次重复测量同一个量,测得的值也不尽相同,并满足高斯分布^[12];系统误差则是由仪器的准确度和实验方法以及原理不完善而引起的。一般来说,在任何一次测量中,系统误差与偶然误差是同时存在的。但是对于野外测量数据时,由于切沟的不规则形状,致使系统误差远远大于偶然误差,则测量误差可按照系统误差来处理,对于被测量只需把单次测量值作为测量结果即可,无需求偶然误差^[11]。系统误差又分为两部分,一是由仪器准确度所限制而导致的误差,另一部分是由测量原理所造成的误差^[11]。

3.1 仪器准确度造成的误差

通常在试验中仪器的最大测量误差是仪器的最小刻度。在测量中,测量切沟高和宽的卷尺为 7.5 m 长的卷尺,最小刻度为 1 mm,测量切沟长度的卷尺为 50 m 长的卷尺,最小刻度为 1 cm。但是考虑到在野外用米尺测量的实际精度达不到卷尺的最小分度。根据实际经验,将卷尺测量切沟高和宽的误差定为 5 mm,将测量切沟长度的卷尺精度定为 0.5 m。即: $\Delta l_i = \Delta l'_i = \Delta h_i = 0.005 \text{ m}$, $\Delta H = 0.5H/50$ (即若单位小段切沟的长度 H 为 1 m 时, $\Delta H = 0.01 \text{ m}$, H 长度为 2 m 时 $\Delta H = 0.02 \text{ m}$)。由于卷尺直接测量存在误差,必然会导

致由公式(3)而间接计算得到的切沟体积产生相应的误差, 即为误差的传递^[11]。

表 1 测量横断面间隔不同为 1~ 30 m 时, 2 号流域沟、六队小沟、四队沟的体积 m³

2005 年 5 月	GPS	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	8 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
六队上游小沟体积	614. 89	604. 58	600. 11	597. 47	601. 99	617. 44	597. 79	606. 50	607. 53	618. 90	572. 55	547. 79
四队沟体积	772. 77	841. 67	842. 74	850. 41	836. 19	856. 37	846. 14	854. 29	870. 91	898. 59	893. 91	920. 70
二号流域谷底沟体积	1193. 03	1096. 39	1090. 91	1106. 54	1088. 98	1081. 22	1155. 05	1099. 35	1150. 55	1112. 45	997. 73	1159. 36
2006 年 5 月	GPS	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	8 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
六队上游小沟体积	-	888. 66	888. 00	873. 84	873. 71	886. 68	861. 58	892. 33	850. 25	904. 59	876. 74	823. 34
四队沟体积	860. 12	982. 87	996. 71	968. 78	988. 78	977. 72	982. 63	1000. 36	934. 75	1061. 61	1017. 30	990. 95
二号流域谷底沟体积	1252. 92	1157. 19	1159. 77	1173. 31	1155. 71	1108. 51	1149. 29	1118. 92	1092. 75	1081. 74	1054. 12	1039. 15

注: 其中由于 GPS 出现故障, 所以 2006 年 5 月二号流域谷底沟没有使用 GPS 进行测量。

由误差传递公式^[11] $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 大绝对误差; $\Delta l_i, \Delta l_{i+1}, \Delta h_i$ ——第 i 个横截面的上底、下底和高的最大绝对误差; ΔH ——单位小段切沟长度的最大绝对误差; ΔV ——是由卷尺造成的整个切沟体积的最大绝对误差。则整个切沟由卷尺精度造成的最大绝对误差为

则其误差 Δy 为

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (4)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_i ——直接测量值; $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_i$ ——直接测量值的最大绝对误差; y ——间接计算得到值; Δy ——间接计算得到值 y 的最大绝对误差。

式(2) 带入式(4) 得到卷尺测量切沟体积的最大误差:

$$\Delta V_i = \frac{1}{4} \Delta H [(l_i + \dot{l}_i) h_i + (l_{i+1} + \dot{l}_{i+1}) h_{i+1}] + \frac{1}{4} H [(l_i + \dot{l}_i) \Delta h_i + (l_{i+1} + \dot{l}_{i+1}) \Delta h_{i+1}] + [(\Delta l_i + \dot{\Delta l}_i) h_i + (\Delta l_{i+1} + \dot{\Delta l}_{i+1}) h_{i+1}] \quad (5)$$

式中: ΔV_i ——由卷尺造成的第 i 个单位小段切沟体积的最

表 2 由卷尺精度造成 2 号流域沟、六队小沟、四队沟的误差 m³

2005 年 5 月	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	8 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
六队上游小沟体积	9. 28	9. 22	9. 29	9. 25	9. 44	9. 21	9. 31	9. 28	9. 47	8. 85	8. 54
四队沟体积	12. 04	12. 06	12. 15	11. 96	12. 25	12. 12	12. 23	12. 44	12. 76	12. 75	13. 06
二号流域谷底沟体积	14. 78	14. 70	14. 88	14. 68	14. 62	15. 42	14. 78	15. 43	14. 91	13. 77	15. 62
2006 年 5 月	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	8 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m
六队上游小沟体积	13. 20	13. 20	13. 00	13. 01	13. 18	12. 87	13. 27	12. 66	13. 40	13. 08	12. 31
四队沟体积	13. 85	14. 02	13. 67	13. 90	13. 78	13. 54	14. 03	13. 19	14. 78	14. 27	13. 85
二号流域谷底沟体积	15. 69	15. 72	15. 88	15. 67	15. 06	15. 53	15. 18	14. 84	14. 69	14. 33	14. 17

表 3 横截面面积与精确值比较

	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5	截面 6	截面 7	截面 8
横截面面积/ cm ²	35672	20882	48024	55350	40420	56011. 5	73245	40077
精确值/ cm ²	37290	24025	48580	53165	40130	52880	67290	37435
误差/ %	- 4. 34	- 13. 08	- 1. 14	4. 11	0. 72	5. 92	8. 85	7. 06
	截面 9	截面 10	截面 11	截面 12	截面 13	截面 14	截面 15	
横截面面积/ cm ²	40076	29786	72960	83616	85754	87676	80114. 5	
精确值/ cm ²	39705	27400	74996	79434	90150	91355	81995	
误差/ %	0. 93	8. 71	- 2. 71	5. 26	- 4. 88	- 4. 03	- 2. 29	

3.2 测量原理造成的系统误差

用卷尺测量切沟体积时, 由于将切沟的每个横断面近似视为梯形, 并且切沟的总体积是由规则的 n 小段规则六面体体积相加得出。但实际上切沟的形状不规则, 这种由切沟的不规则形状带来的测量误差为测量原理造成的系统误差。

为了解这种系统误差究竟有多大, 将这种系统误差分为 2 部分: 一是由于切沟的横截面不规则造成的误差: 横截面都是不规则的多边形, 并不是标准的梯形(图 3); 二是由切沟深宽不规则变化造成的误差: 在计算一小段切沟的体积时, 认为横截面之间是规则的六面体, 而实际上切沟宽深变化不规则(图 4)。

3.2.1 由截面形状不规则造成的系统误差

图 3 是在测量的 3 条切沟中, 随机测量的切沟横截面。其中每个横截面每隔 10 cm 测量一个深度, 由此得到比较精确的切沟形状(图 5), 并可以计算其横截面的面积(以相临 2 个切沟深为梯形的上下底, 2 次测量深度的距离 10 cm 为梯形的高, 计算每个梯形的面积, 然后求和), 近似认为此横截面面积为精确值。将横截面面积的精确值, 与只测量切沟上底、下底和高得到的横截面面积做比较(表 3), 可得到由横截面面积不规则所引起的误差。

由图 3 可以看出, 在不规则的切沟横截面中, 沟底相对比较平缓、规则, 而切沟壁的不规则程度较大。将切沟的横

截面近似成图 6 中的 a, b, c 3 种情况, 其中阴影部分面积为 中截面实际值比测量值小, 图 6c 中则两者相差不大。误差的主要来源。其中图 6a 截面实际值比测量值大, 图 6b

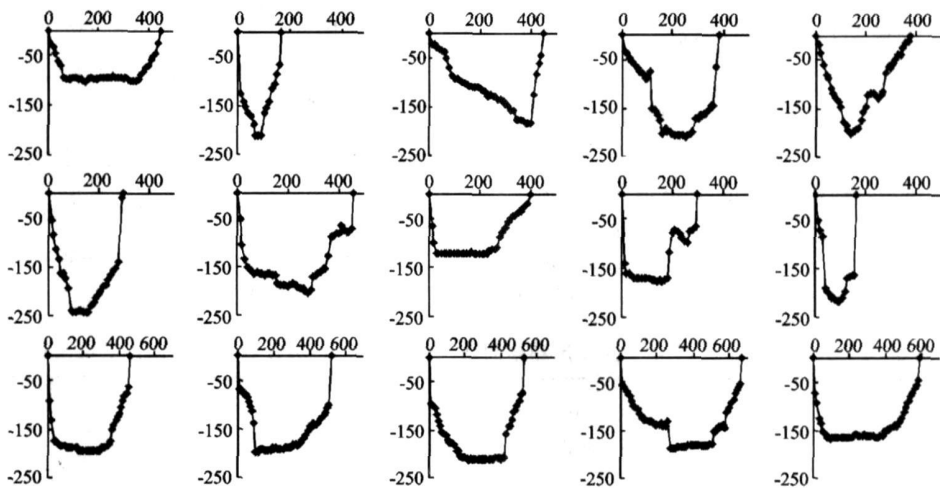


图 3 15 个随机测量切沟的横截面(坐标单位为 cm)

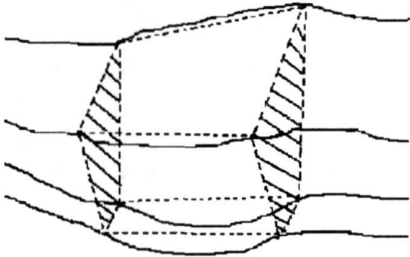


图 4 切沟深宽不规则变化造成的误差

可以估算出图 6 中的阴影面积。图 6d 为图 6a 放大图, 阴影面积 $S_{\triangle ABC} = \frac{1}{2} AE \cdot BD$, 同理可得图 6b 中的阴影面积, 且与图 6a 阴影面积相等。由 3 条切沟的上底、下底和高的平均值以及图 6d 中 BD 的长度(由于所测量的 3 条切沟的上底和下底差均为 2 m 左右, 所以取 BD 的值为 0.5 m) 可以计算出阴影面积占切沟横截面面积的百分比 S_{ABC}/S_{ACFG} (表 4)。这与表 3 中实际测量的切沟横截面面积与精确值的误差较为一致。

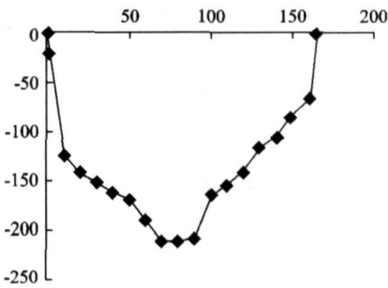


图 5 切沟精确的横截面

假设切沟壁中图 6a 与图 6b 形状的沟壁所占比例之差为整个沟壁的 20%, 则此种系统误差可以估算为: $\Delta_1 = 20\% \cdot S_{\triangle ABC}/S_{ACFG}$ 。并且可以计算得到 3 条切沟的这种系统误差分别为 1.90%, 1.13% 和 1.70% (表 4)。

3.2.2 由每小段切沟形状不规则造成的系统误差

如图 4 所示, 由于切沟高度宽度变化不规则, 使得计算切沟体积时计算得到的每个小段切沟的体积(即虚线部分的体积)与实际切沟体积(实线部分)有所不同, 并且随着测量相邻两个横截面间隔的增大, 这种误差将会逐渐增大。



图 6 切沟横截面的近似形状

表 4 由截面面积不规则值造成的系统误差

2006 年 5 月	上底平均值/ m	下底平均值/ m	高的平均值/ m	$S_{ABC}/$ m^2	$S_{ACFG}/$ m^2	$S_{ABC}/$ S_{ACFG}	$\Delta_1/\%$
4 队沟	3.44	1.83	1.57	0.39	4.14	9.42%	1.90
六队上游小沟	5.40	3.42	1.62	0.40	7.13	5.61%	1.13
2 号流域谷底沟	3.37	2.53	1.16	0.29	3.41	8.50%	1.70

要计算这种的系统误差, 假定 $H = 1$ 的时候, 测得的切沟体积是最准确的, 并以 $H = 1$ m 的时候测得的切沟体积为基准, 计算相对误差:

$$\Delta V_h = | (V_h - V_1) / V_1 | \tag{7}$$

式中: V_h ——按横断面间隔为 h 米计算的切沟体积;
 ΔV_h —— V_h 与 V_1 的相对误差的百分比。计算结果见图 7。

由图 7 可以看出随着测量相邻 2 个横截面间隔的增大, 切沟形状不规则造成的系统误差也不断增大。在 $H < 5$ 的时候, 这种误差基本上在总体积的 2% 以下, 在 $H < 10$ 的时候, 这种误差小于 5%。当 $H > 10$ 的时候, 误差会进一步扩大。所以为了得到比较准确的切沟体积, 在野外测量时, 应该尽量缩短 2 次测量切沟横截面的距离, 将每次测量距离保持在

10 m 以内,这样,使得由每小段切沟形状不规则造成的系统误差保持在 5% 以下,这是野外调查所可以接受的范围。

4 卷尺与 GPS 测量切沟体积的比较

如表 5 所示,对比用卷尺与 GPS 测量得出的体积。可以看出,用 GPS 测得的切沟体积与用卷尺测量计算的切沟体积在总量上有一定的误差,鉴于使用卷尺测量切沟体积的方法是传统方法,以卷尺的体积为标准,两者的误差分别为 1.36%, 10.20%, 12.49%, 8.81% 和 8.27%, 从这 3 条沟对于这两种测量方法上的误差在 10% 左右,在可接受范围之内。至于卷尺测量与 GPS 测量切沟体积的差异,是由卷尺

表 5 2005 年 5 月与 2006 年 5 月卷尺测量的切沟体积与差分 GPS 测量的切沟体积相比较

	GPS 测量		GPS 测量 年体积变化	卷尺测量		卷尺测量 年体积变化	2005 年卷尺 与 GPS 测得 体积差/ %	2006 年卷尺 与 GPS 测得 体积差/ %
	2005 05	2006 05		2005 05	2006 05			
2 号流域谷底沟	612.82	—	—	604.58	888.66	284.08	1.36	—
4 队沟	755.83	860.12	104.29	841.67	982.87	141.20	10.20	12.49
六队上游小沟	1193.03	1252.92	59.89	1096.39	1157.19	60.81	8.81	8.27

注:其中由于 GPS 出现故障,所以 2006 年 5 月 2 号流域谷底沟没有使用 GPS 进行测量,年体积变化量指 2005 年与 2006 年的变化量。

5 卷尺测量切沟体积的年际变化

与单次测量切沟体积时卷尺和 GPS 的测量值出现较大差异相比,卷尺与 GPS 测得的 2005-2006 年切沟体积的年际变化量差相差不大。分析其原因可能是由于以下几点:①测量的 3 条切沟都是处于强烈侵蚀的切沟初期状态,年体积变化量较大,可达到 10% 以上;②用卷尺测量切沟体积,当相邻横断面的距离为 10 m 时,测量结果的最大绝对误差不超过 10%,切沟的年体积变化量比卷尺测量造成的最大误差量要大;③当多次测量同一条切沟时,系统误差相似(测量值比真实值共同偏大或偏小)。所以表现出用卷尺测量切沟的单次体积误差较大,而用来表现切沟体积的年际变化误差较小。

6 结 论

对于由卷尺精度限制而导致的误差,对于同一次测量某条切沟来说,这种误差基本上是不变的,而与测量相邻横断面的间隔长度无关,只与测量仪器即卷尺有关。对于不同的切沟来说,这种误差占所测切沟体积的百分比是基本相同的,且比较小,在 2% 以下。由于横截面不规则造成的系统误差,其可达到体积的 2%;由于单位小段切沟的形状不规则造成的系统误差,当测量的横断面间距保持在 10 m 以内时,可以使得单位小段切沟形状不规则造成的系统误差保持在 5% 以下,整体的最大绝对误差在 10% 以内。

卷尺测量的切沟体积与差分 GPS 测量的结果比较表明,单次测量切沟体积两种测量方法的误差可达到 10% 左右,但是卷尺得到的切沟体积的年际变化量相差不大。用卷尺测量某一条切沟体积的时候,在两次测量横断面间距保持在 10 m 以内时,其绝对误差不超过切沟本身体积的 10%;在测量切沟体积的年际变化时,卷尺测量应更为准确,并且在东北黑土区,可以比较准确地表现出切沟体积的变化。

利用 GPS 监测切沟侵蚀,其精度主要取决于所建立的切沟 DEM 的质量。在建立 DEM 的过程中,DEM 的质量又主要受作为隔断线的沟沿线和沟底地形特征线的影响。因

测量与 GPS 测量误差共同作用的结果。

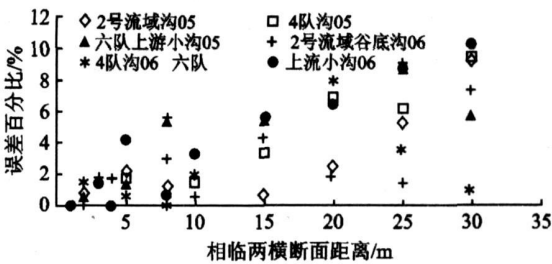


图 7 由每小段切沟形状不规则造成的系统误差占切沟体积的百分比

此用 GPS 测得的结果其误差较为复杂,留待以后继续研究。

致谢:感谢刘宝元教授对本文提出的宝贵意见和热情指导,感谢张永光、郑秋红和董一凡在野外工作中的帮助。

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.

[2] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区沟谷和沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956,22(3):201-221.

[3] Poesen J. Gully typology and gully control measures in the European loess belt in farm land erosion in temperate plains environment and hills[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993: 221-239.

[4] 陈棣.漫川漫岗区沟道侵蚀的预防治理[J].黑龙江水专学报,1992(增刊):64-66.

[5] 张金福,李喜奎,刘绪军.黑龙江黑土区沟壑侵蚀的危害及其治理[J].水土保持科技情报,1999(3):52-53.

[6] 程宏,伍永秋.切沟侵蚀定量研究进展[J].水土保持学报,2003,17(5):32-35.

[7] 李和信.忍看黑土付流波?:东北黑土区水土流失调查[N].人民日报,2002-08-15.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19.

[11] 曾贻伟,龚德唇,王书颖,等.普通物理试验教程[M].北京:北京师范大学出版社,1989:29-37.

[12] 沙定国.实用误差理论与数据处理[M].北京:北京理工大学出版社,1993:103-114.