

黄土高原的侵蚀沟及其摄影测量方法

周佩华 徐国礼 鲁翠瑚 刘建凯

(中国科学院西北水土保持研究所)

一、概 述

黄土高原是我国水土流失最严重的地区，侵蚀类型也极为复杂。由于黄土土层深厚、疏松，抗冲性弱，地面一有集中的径流发生，就会引起冲刷，形成各种类型的侵蚀沟，其中以切沟的危害最为严重。切沟中的径流已经相当集中，加速沟底下切、沟岸扩张和沟头溯源侵蚀，使沟道向长、宽、深三个方向发展，不仅蚕蚀和分割地面，使耕地面积日益缩小，使连片的土地被切割得支离破碎，而且促使沟岸崩塌、滑坡、泻溜等重力侵蚀发生。

切沟主要分布在邻近谷缘地带，但在耕种的斜坡甚至接近分水岭的地段上也可以见到。沟深一般由10多米到50米左右。切沟发展的初期，以沟头溯源侵蚀为主，在不同地区、不同地形部位，其发展速度有明显的差异。在塬地、垆地或塬地进展的速度较快，一次暴雨后常能进展数米到数十米，甚至可达数百米或千米以上。切沟下端汇入坡面以下的水路网。水路网的冲刷一般称之为沟道侵蚀。沟道侵蚀的方式除溯源侵蚀外，还有水流向两侧淘刷所引起的沟壁或谷坡的崩塌、滑坡等重力侵蚀以及沟谷底部的冲刷。

根据我们对延河支流——杏子河流域内沟道切割密度的量算资料，该流域平均沟道切割密度为7.39公里/平方公里，个别小流域高达13.32公里/平方公里；平均每平方公里内，有长度在100米以上的各种沟道25.5条，其中有一条小流域面积为1.123平方公里，共有各种沟道84条，平均每平方公里高达74.7条。从整个黄土高原来看，杏子河流域的沟道切割密度还不是最大的。从上述资料不难看出，黄土高原沟道数量之多已相当惊人！沟道内的侵蚀情况也远远比坡面要复杂得多。但并不是说径流泥沙量主要来自沟道，有关泥沙来源问题是一个很复杂的问题，在这里只是强调沟道内的侵蚀类型比较复杂。所以，为了掌握黄土高原的水土流失规律，首先必须详细地研究各种沟蚀的发生发展规律。这一研究，对水土保持工作也将起重大作用。已故中国科学院副院长竺可桢同志曾经提出：“在黄土高原上水土流失的根本问题是对于沟的改造和利用问题。”这一点应该引起我们的注意。

目前对于沟蚀和沟道侵蚀的研究，还是一个比较薄弱的环节。现有的观测研究方法，还有相当大的局限性，还不能适应工作的需要。如小流域观测，一般只能测得该流域的侵蚀总量，对于各地形部位的侵蚀特征、沟道侵蚀和重力侵蚀的发生演变过程，则无法观测。由于沟道内的地形也比坡面复杂得多，地面坡度太陡，径流小区也很难布设。通过野外调查观测，可以分析各种沟道类型不同发育阶段的侵蚀特征，但缺乏量的概念。1963年，我们在子午岭地区曾用地形测量法对典型沟道进行测量，试图观测研究沟道演变过程，虽然能取得较好的结果，但耗费人力太大。看来，继续研究、改进并提出一套新的切实可行的观测方法，是沟蚀和重力侵蚀研究工作中亟待解决的重要课题。

用地面立体摄影测量，可提高测量精度，并且可以节省人力。但在黄土高原用地面立体摄影

测量研究侵蚀沟的发育，并达到能定量估算侵蚀量的精度，还有许多问题需要研究解决。1963年天水水土保持站曾用地面摄影测量法进行滑坡体位移量和产沙量观测，可惜由于种种原因而未能继续进行下去，但总算有了一个良好的开端。

从1978年起，我们开始探索用地面摄影测量法研究侵蚀沟发育的有关问题。地面立体摄影测量是利用摄影经纬仪摄影，把沟道各部分的形状和位置准确而迅速的记录下来。应用一条基线上所摄得的两张相互重迭的象片，组成一个立体象对，用前方交会法或立体观测的原理即可确定立体象对上各空间点的位置，通过转绘仪即可绘制成地形图，或者用刺点法求出各空间点的数据座标，存入数据库，用以说明侵蚀沟各部位的具体情况。每隔一定时间，在固定的地点对同一对象进行摄影测量。根据两次测量结果的对比，可以看出侵蚀沟各部位的变化情况。如果对影响侵蚀沟发展的有关因素同时进行观测，即可进一步分析沟蚀发展的原因。当摄影测量达到足够的精度时，还可以对沟蚀量进行量算。

1978年，我们在天水市龙王沟内选择了一条小支沟，用地面立体摄影法观测沟道的演变过程。所选的小支沟沟长约250米，沟宽约90米，从沟底到分水岭相对高差约150米，地面坡度一般在 20° 左右，多为不整齐的台阶式坡地。靠近沟头附近，地面有少量黄土覆盖，沟口附近红粘土裸露，沟谷坡滑坡、泻溜等重力侵蚀比较活跃，见照片1。我们布设的控制点多，并且控制点之间的距离也比较小，一般在30米左右。



⊙——控制号； A_x ——点号
照片1 天水点沟道摄影测量及部分控制点

二、与摄影测量精度有关的问题

提高摄影测量精度，是一个关键问题。如果精度达不到要求，就没有实用价值了。所以我们始终把提高测量精度作为考虑问题的中心。下面简单介绍有关这方面的几个问题，其中有经验也有教训。一般的摄影测量程序就不多讲了。

1、**控制网的布设。**在工作中遇到的第一个困难是控制测量的精度问题。控制网是摄影测量的基础，如果控制网的精度达不到要求，直接影响摄影测量的精度。根据各种类型侵蚀沟的大小以及它们的发展变化速度，必须采用超大比例尺的摄影测量，才能显示出侵蚀沟的发展变化情况。我们采用的比例尺是1/400和1/200两种。

根据地面立体摄影测量的要求，比例尺为1/200时，摄影最远距离不能超过80米；比例尺为1/400时，摄影最远距离不能超过200米。同时在每一个象对内，至少要有三个固定点，作为推算各空间点数据坐标的依据。我们所采用的比例尺为：沟头部分用1/200；沟口部分用1/400。为了满足上述要求，需要布设的控制点是比较多的，并且控制点与控制点之间的距离也比较小，一般在30米左右，并且点与点之间的高差较大，如16号点与17号点之间，水平距离不足32米，高差为21.7米，垂直角将近 35° ，这就不能满足摄影测量的要求。在每次摄影之前，还必须根据已知控制点补充若干附加点。

由于地面起伏较大，有些点子之间互不通视，使控制网的布设遇到许多困难。经过多次实地勘察，先后共拟定了四个方案，经过对比，最后确定的方案如图1所示，共布设了三个闭合多边形和一个三角锁。第Ⅰ、第Ⅱ闭合多边形及三角锁都可以根据第Ⅰ个闭合多边形的已知边进行推算，具有同一精度水平。

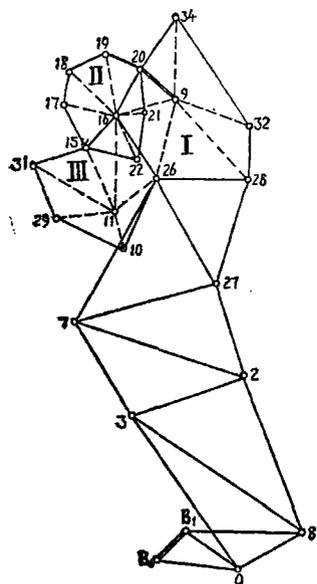


图1 控制网布设

水平控制用T020光学经纬仪（刻度1′，可估读6″）测角，用全圆测回法，前后两个半测回的角度值之差不得超过12″。基线丈量使用25米之钢钢尺（进行温度、拉力校正），丈量6次取平均值，如图1，基线9—20丈量结果为27.4615米；校核基线B₀—B₁丈量结果为23.5086米。以9—20基线为起始边进行推算，计算结果校核基线B₀—B₁=23.4999米，误差为23.5086-23.4999=0.0087米。传距边总长度为676.646米，相对误差=0.0087÷676.646≈1/77,000。根据测量结果，分别计算各闭合导线网之导线点坐标。计算结果，相对闭合差都不超过1/20,000。

高程控制使用江光仪器厂出产的S₃型水准仪，按四等水准测量施测。用5毫米一格刻划的塔尺，在每一测站测出高差之后，重新安置仪器，将仪器升高或降低一些，再观测一次，两次测得高差之差不得超过5毫米。整个控制网水准测量路线长约1公里，闭合差为3毫米。

从这些测量结果可以得出结论：在黄土丘陵区，经过努力，完全可以提高控制测量的精度，以满足超大比例尺地面立体摄影测量的要求。

2、埋设水泥桩。为了提高控制测量的精度，我们除了作好控制网布设、注意消除仪器误差之外，对于影响测角精度的三个主要因素（仪器对中、照准、读数）也都给以特别注意。为此，我们在每个控制点都埋设了固定水泥桩。水泥桩的尺寸为高50厘米，顶部为15厘米见方，底部20厘米见方，如图2。在水泥桩顶部有一个直径为5厘米、深3厘米的圆形槽。通过圆形槽的中心，在水泥桩中埋设直径1厘米的圆钢筋，钢筋顶端与水泥桩顶齐平。在圆形槽中，钢筋顶端露出水泥桩3厘米，在摄影测量时，用以插觇牌。在钢筋顶端，钻有直径2.1毫米、深1厘米的小孔，在小孔内插入缝纫机针，针尖朝上，作为观测觇标。在测量时，要尽量照准针尖，针一定要直立，并把阻挡的东西都清除掉。由于地面起伏较大，为了清除障碍物往往要花费很多劳力，如果照准针尖实在有困难，可以选一段特别直的草棍，套在针尖上，测量时直接照准草棍。用光学对中器对中时，对中与整平密切相关，如果仪器没有严格整平，就不可能准确对中，并且整平与对中需要反复多次进行。由于控制网的边长都比较小，要求对中和照准的误差，均不得超过0.5毫米。

3、觇牌。摄影测量时，控制点应设明显的标志，以便能在立体象对上比较清晰地辨认出。我们设计了大小两种觇牌作为地面点的标志。觇牌用白铁皮作成，涂黑白两种颜色的油漆，使与周围的地形背景有显著区别。觇牌嵌在内径为1厘米的铝管上，铝管的长度为一固定值，可以根据控制点的高程直接推算出觇牌

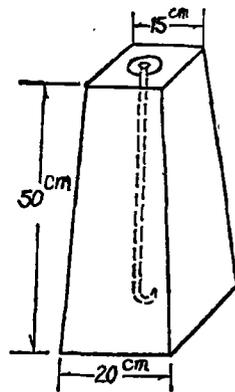


图2 水泥桩示意图

中心点的高程，如图3。摄影测量时，将铝管套在控制点的钢筋上，保证觇牌中心点的铅垂线通过控制点的中心。由于我们用的水泥桩是先预制好再拿到山上埋设，水泥桩顶部的钢筋，很难保证完全铅直，这样很难使觇牌立直，并给以后的内业成图工作带来不少困难。因此，我们在进行第二个摄影测量点（在安塞县茶坊水土保持实验区）的控制网布设时，水泥桩改为现场浇筑，在水泥凝固之前，可以轻微摆动钢筋，并用经纬仪定向，保证钢筋铅直，取得良好的效果。

4、摄影。摄影象片的质量，对摄影测量的精度起很大作用。所以必须确定准确的曝光时间，以保证象片质量。如果地面被很大的阴影遮盖，由于被摄地物的照度不均匀，会给正确选择曝光时间造成困难，同时阴影部分也很难成像。在这种情况下，最好不进行摄影。我们在天水所选择的沟道大致为东西走向，沟道中某些部分，一年当中只有很少时间没有阴影，每次摄影测量时，都要花费很长时间等待合适的摄影时机，造成很大不便。因此，在选择摄影测量沟道时，最好选择由北向南走向，或由东北向西南、由西北向东南走向的沟道。

三、几年来的观测结果

根据摄影测量结果，转绘为1/200地形图，等高距为20厘米，成图精度为7厘米。1979年进行第一次摄影测量并成图，1981年沟道内即发生了较明显的滑塌，1982年又进行了第二次摄影测量并成图。根据两次测得的地形图，对滑塌还进行了量算。

1、首先把1982年的地形图迭置在1979年的地形图上，在滑塌和堆积区周围，以等高线重合的地方为界，划出整个量算区的边界线，如图4。

2、再以量算区内1979年和1982年两年的同一高程等高线的相交点作为分界点，连接各分界点成一分界线，把整个量算区划分为滑塌区和堆积区两部分。

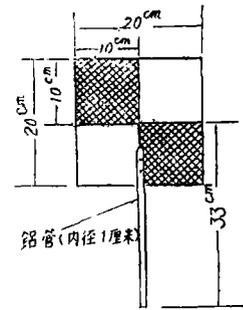


图3 觇牌示意图

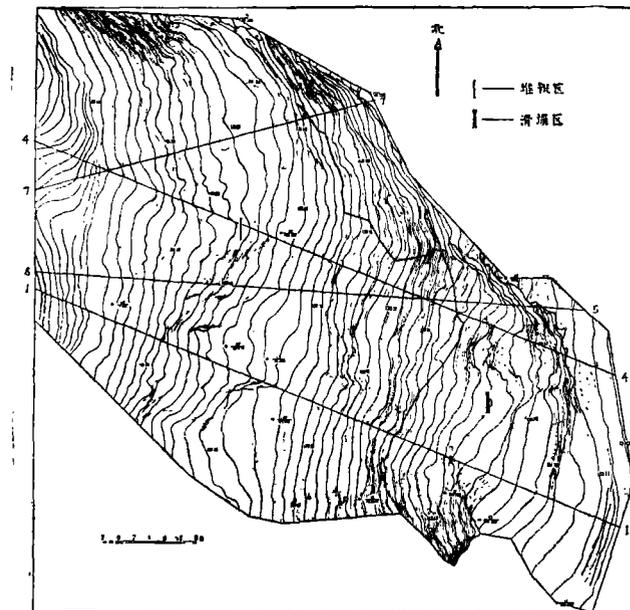


图4 滑塌和堆积区地形图

$$3、按土方量计算公式 $V = h \left(\frac{A_1}{2} + A_2 + A_3 + \dots + A_{m-1} + \frac{A_m}{2} \right) + \frac{1}{3} A_m h$$$

分别计算1979年滑塌区的土方总量和1982年滑塌区的土方总量，二者之差即为滑塌土方量。

用同样方法可以计算出堆积区的土方堆积土方量。计算结果：滑塌土方量为777.07立方米，堆积土方量为805.57立方米，堆积土方量较滑塌土方量大28.05立方米，约占堆积量的1/28，这主要是由于堆积区的土体比较疏松的缘故。

4、在量算区内，选择了1—1、4—4两个断面，如图4，并分别绘制纵断面图，如图5。

各纵断面图的高程和水平距离用相同的比例尺，反映了坡度的真实变化情况。从图4及各个纵断面图，可以看出土体的移动变化情况。土体的水平移动距离，最远不超过80米。滑塌前，地面最大坡度大约为 48° ，堆积区的地面坡度大致为 $30-35^\circ$ 。

这次滑塌也可能与1981年雨量较多有关。天水地区多年平均降雨量528.8毫米，主要集中在6—9月，占年雨量的66.7%。而1981年全年降雨575.1毫米，特别是6—9月降雨量较常年同时期降雨量多将近100毫米。这次滑塌并没发生在雨季，而是雨季过后的10月份。

由于观测资料太少，对上述现象还不能下结论，只能为今后的研究工作提供一些线索。

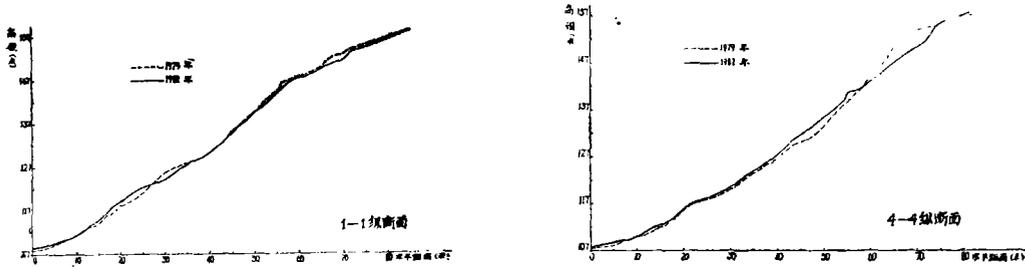


图5 滑坡区和堆积区变化

从图5各断面图可以看出，滑塌区和堆积区各点高程的变化，大都在50厘米以上，高程变化最大的将近5米。我们测绘的地形图等高距为0.2米，用来说明滑塌、堆积等发生的部位、范围、数量等以及用来研究沟道变化情况当无问题，但用来计算流失量还有很大差距，还需要作不断的努力。如能系统地大量积累有关这方面的资料，对于研究重力侵蚀及沟道发生演变规律，无疑是具有重大意义的。

(上接第63页)

成片剥蚀	peeling	冲积阶地	alluvial terrace
持水	water retentivity	河川作用	fluviation
持水力	water retaining capacity	冲积土	fluviogenic soil
持续坡度	sustained grade	冲积物	alluvium; sediment
迟滞暴雨	delayed storm	冲蚀	scour erosion
迟滞径流	delayed runoff	冲蚀槽	scour channel
冲沟	gully; valley	冲蚀深槽	scour depression
冲积层	alluvial layer	冲刷	erosion (sluicing)
冲积地	alluvial ground	冲刷程度	magnitude of degradation
冲积河流	alluvial river	冲刷力	scouring force
冲积黄土	fluvial loess	冲刷速度(率)	scouring velocity
冲积坡	alluvial slope		