

# 陕北黄土丘陵地区土壤侵蚀强度 遥感分析方法探讨

陈正宜 陈捷

(中国科学院遥感应用研究所)

1991年3月22日收稿

## 摘 要

在地形破碎的黄土丘陵地区,利用航空遥感图像分析沟谷密度、沟谷发育阶段、地貌形态及其与土壤侵蚀强度之间的相关性,收到了良好的效果。研究表明,包括切沟在内的黄土丘陵区的沟谷密度值可高达  $20 \text{ km/km}^2$  以上;黄土冲沟的发育阶段不同,其侵蚀强度也相应变化;切沟发育最活跃和最密集的地段,其侵蚀强度也最大。根据土壤侵蚀总量与侵蚀强度之间的相关,建立了土壤侵蚀模型,并利用遥感图像划分了土壤侵蚀综合类型,从而可用多元回归分析方法求算各侵蚀类型的侵蚀强度,为预测区域侵蚀总量开辟了新的技术途径。

**关键词** 遥感分析 沟谷密度 土壤侵蚀综合类型 侵蚀强度

陕北黄土丘陵地区是一个超限度垦殖和生态环境遭到严重破坏的水土流失区。为了清查该地区的资源及环境条件,研究区域开发中存在的问题,在“七五”期间进行了遥感调查与系列制图。在制图中,利用航空与航天遥感图像提供的综合信息与宏观效果,对该地区的地貌发育和水土流失问题进行了分析,显示了遥感技术在土壤侵蚀强度研究中的特殊作用和效果,并取得了一些新的认识和见解。

## 一、黄土地貌形态与土壤侵蚀强度的相关分析

影响土壤侵蚀的因子有地貌条件、植被类型、降雨强度及人为活动等。但是从土壤侵蚀的结果来看,不论受什么因子条件的影响,其最终结果都以地貌形式表现出来。由于黄土高原地区的土层深厚,土质松散,抗侵蚀能力很差,所以在降水作用下,水土流失严重,并形成千沟万壑的黄土地貌特征及水系结构;同时由于侵蚀时间、程度、方式和强度的不同,其地貌形态又有明显差异。因而遥感图像反映出黄土地貌的结构特征及水系形迹,为分析该地区的土壤侵蚀强度提供了重要信息。

### 1. 黄土丘陵区沟谷密度的遥感分析

沟谷密度是指单位面积内的沟道长度(以  $\text{km/km}^2$  表示),沟谷密度越大,地面的破碎程度越高,陡坡地的面积比例增加,侵蚀也因此而加强。所以一个地区的沟谷密度值能间接地反映出该地区土壤侵蚀强度的大小。黄土丘陵区的沟谷密度值,在以往文献中经常引用的多是  $6 \text{ km/km}^2$  左右,最大的为  $8 \text{ km/km}^2$ <sup>[1]</sup>。但是,根据遥感图像提供的信息分

析,这一沟谷密度值明显偏低,远未反映出黄土丘陵区千沟万壑的地貌特征和罕见的土壤侵蚀强度。

黄土丘陵区的沟谷有河沟、干沟、冲沟、切沟、浅沟和细沟等 6 个等级,类型复杂。因受制图比例尺的限制,在一般的地形图上,只能反映到冲沟一级的沟谷系统,因此,在以往的地形图上所量取的沟谷密度值都不包括切沟及其以下的沟谷,从而造成沟谷密度值偏低。但是用遥感图像分析的结果表明,黄土丘陵区沟谷密度最大的地段,主要是在切沟发育的地段。由于切沟密集的地段,其沟谷形态和结构特殊,沟壁陡直,小型的滑坡和崩塌等重力侵蚀作用普遍存在,所以它又是土壤侵蚀强度最大的地段。因此,在量沟谷密度时,只有包括切沟在内的沟谷密度值,才能够比较真实地反映黄土丘陵区的地貌破碎程度和土壤侵蚀强度。

不同分辨率的遥感图像所能反映出的沟谷密度也各不相同。1:10 万的陆地卫星 TM 图像,只能反映出冲沟及其以上的沟谷系统,其密度值为  $8 \text{ km/km}^2$  (图 1),而放大到 1:1 万的航空像片,则可以精确地揭示出切沟和浅沟的沟谷系统及其地貌形态。根据放大的 1:1 万航空像片上反映出的沟道长度进行实际量测的结果表明,黄土丘陵沟壑区的沟谷密度值,一般为  $20 \text{ km/km}^2$  左右(图 2),而在切沟特别发育的局部地区可高达 30

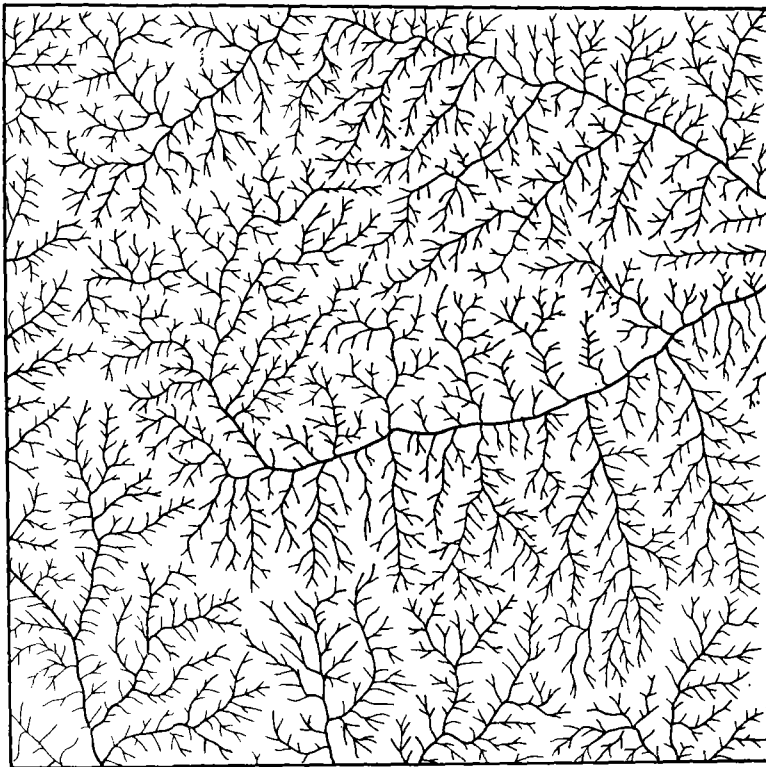


图 1 用 TM 图像描绘的黄土丘陵区沟谷系统图(1:10 万)

Fig. 1 Gully system map drawn up with TM image in hilly loess region.  
(scale:1:100 000)

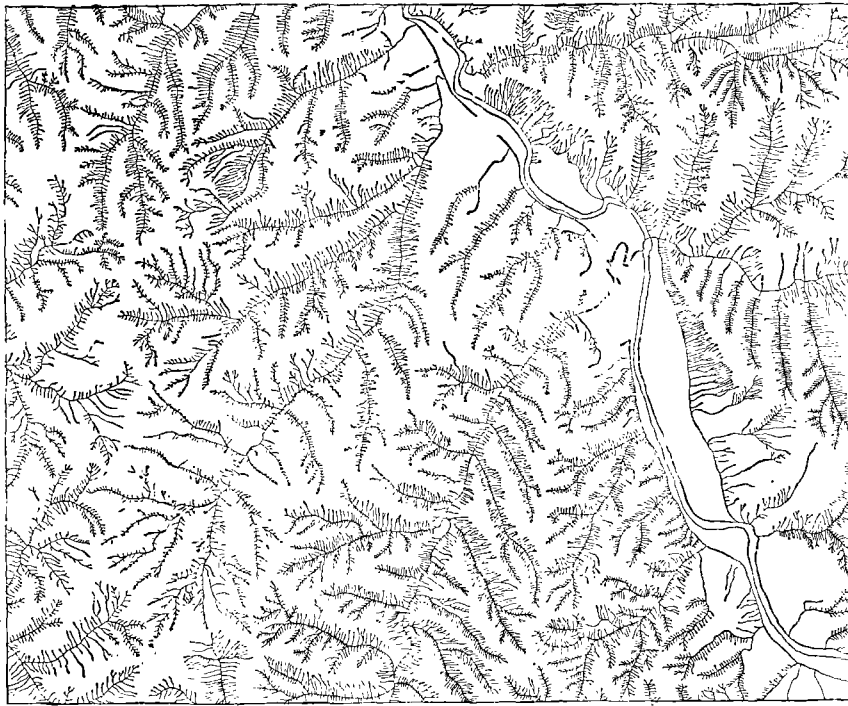


图 2 用 1:1 万航空像片描绘的黄土丘陵区沟谷系统图 (1:5 万)

Fig. 2 Gully system map drawn up with 1:10 000 areial photograph in hilly loess region (scale: 1:50 000)

km/km<sup>2</sup> 以上。由于采用了新的信息源,新的沟谷密度值约是以往常用最大密度值的 3—4 倍,这是其它地区所未有的。但是这一新的沟谷密度值,却比较真实地反映了黄土丘陵区特有的地貌破碎程度,而且与该地区强烈的土壤侵蚀是相对应的。

## 2. 沟谷发育及其侵蚀强度分析

黄土丘陵区的地貌形态,可分为沟谷地和沟间地两大类型单元,两者之间多以明显的陡坎或坡折线为分界,习惯上称之为“沟缘线”。沟缘线以上的沟间地是正地形,侵蚀方式较单一,主要以面状侵蚀为主,侵蚀强度相对较弱。而沟缘线以下的沟谷地是负地形,其形态特征和侵蚀方式都十分复杂,不仅有流水冲刷的作用,而且有滑坡、崩塌和泻溜等重力侵蚀作用发生,侵蚀强度大。因此,在黄土地貌发育过程中,沟谷地的侵蚀作用占主导地位。

在黄土地区的众多沟谷中,河沟和干沟已进入中老年发育阶段,属比较成形和稳定的河谷类型。而冲沟和切沟则处在发展变化的兴盛时期,土壤侵蚀强度大,地貌形态演变快。尤其是切沟,属于临时性的沟谷,其形态和位置多难以长期保存,很快将因侵蚀而消失,只有少数可能继续发展成为新的冲沟。但是,从侵蚀强度来讲,那些新生性的切沟,则是分布最广、滑坡和崩塌等重力侵蚀作用最强和最活跃的沟谷发育阶段,它直接影响冲沟的发生和发展及土壤侵蚀的变化。冲沟和切沟的侵蚀作用,在塑造黄土地貌中占主导地位,它

全面控制着黄土丘陵地区土壤侵蚀强度的变化。

从切沟的分布位置和形态特征分析,它是黄土冲沟发生和发展的重要组成部分。即黄土冲沟是在切沟的基础上发展而成的,而且由于冲沟的流水冲刷侵蚀作用的增强,沟道下切速度快,因而在冲沟两侧又形成新的呈羽毛状分布的切沟。而这些新的切沟的形成和发展,又直接影响着冲沟的发展和侵蚀强度的变化。根据遥感图像提供的信息分析,黄土冲沟的发育过程,按其地貌形态和侵蚀强度的变化,可分为如下三个侵蚀阶段。

**初期侵蚀阶段** 这是切沟发展延伸而成的冲沟雏形。在该侵蚀阶段内,由于流水的冲刷侵蚀作用强,沟道下切速度快,因而沟谷切割深度大,溯源侵蚀快,沟形简单,沟道狭窄,多成巷道型沟谷(图版 I 图 3)。在沟谷两岸由于沟坡多呈陡壁状,并伴随有崩塌作用发生,因而侵蚀强度将迅速发展和增强。

**中期侵蚀阶段** 在初期侵蚀阶段形成的巷道型冲沟,由于侵蚀基准的变化,其两侧迅速发展新的切沟,而且沟谷密度大,成羽毛状排列(图版 I 图 4),沟间地狭窄且不稳定,小型的滑坡与崩塌作用普遍发生,因而重力侵蚀作用进一步发展和增强,进入水土流失的高峰期。

**后期侵蚀阶段** 进入侵蚀高峰期的黄土冲沟,由于侵蚀基准的逐渐稳定,滑坡与崩塌等重力侵蚀作用逐步减缓或消失,沟坡变缓,沟谷两侧已发展成为较开阔而又稳定的滑塌和泻溜坡面(图版 I 图 5)。至此冲沟两侧开始进入以坡面侵蚀为主的阶段,沟底与坡麓自然堆积现象较明显,侵蚀强度也明显减弱。

上述沟谷发育的三个侵蚀阶段,在整个黄土地貌发育过程中可以称之为一个地貌侵蚀期。在当代这个地貌侵蚀期中,由于不同的沟谷所处的发育阶段和地貌条件不同,其侵蚀强度也有明显差异。处在初期和中期侵蚀阶段的黄土冲沟,由于流水冲刷及重力侵蚀作用强等原因,土壤侵蚀强度大,沟谷发育速度快,因而这里是退耕还林或采取工程措施治理的地段,尤其是切沟发育密集的地区,是水土保持的重点治理地段。

### 3. 沟间地的侵蚀强度分析

在当代这个侵蚀期中,沟间地的坡度较沟谷地为缓,地貌部位较高,以坡面侵蚀为主,因而其侵蚀强度比沟谷地弱。从整体来看,由于黄土物质的均一性和其它外界因素基本相近,在多期沟谷侵蚀作用下所形成的梁峁坡地,都成近似的浑圆型地貌形态,其坡度组合特征也基本一致,因此,在黄土丘陵区,各梁峁坡地都有近似的侵蚀强度和性质,属同一性质的侵蚀类型。

当然,在同一个梁峁坡地上,其地貌形态并非一个侵蚀期作用的结果,而是多个侵蚀期综合作用的产物。在不同侵蚀期形成的地段上,其侵蚀强度也不尽相同。

由于每一个侵蚀期的沟谷侵蚀区与其上部的沟间地之间都存在有明显的坡度转折或陡坎,即沟缘线,所以在地貌形迹保留完整、由多期侵蚀形成的沟间地上,多遗留有成阶梯状分布的多期侵蚀形成的沟缘线形迹。根据遥感图像提供的这些地貌形迹分析,在陕北黄土丘陵区的沟间地上,从现在的梁峁顶部到沟谷侵蚀区之间,最多可以发现 4—5 个侵蚀期所形成的陡坎或阶梯状地貌形迹。在不同侵蚀期的阶梯上,因其所处的地貌部位、地

面坡度及切沟和浅沟的发育程度不同,其侵蚀强度也存在着差异。早期所形成的侵蚀阶梯,因其所处的位置较高,上部汇水面积小,切沟和浅沟不甚发育,原始的滑崩坡面受后期侵蚀作用的改造和影响,使地面坡度变缓,所以当前的侵蚀强度相对较弱。而处在沟间地下部,后期侵蚀形成的阶梯,因其上部汇水面积较大,切沟、浅沟较发育,地表坡度较大,因而其侵蚀强度也较上部大。

## 二、土壤侵蚀强度的遥感定量方法探讨

土壤侵蚀的定量研究方法,通常多是从分析影响土壤侵蚀的因子入手<sup>[2]</sup>,建立土壤侵蚀数学模型,然后用此模型估算一个地区的产沙总量和侵蚀模数。但是在黄土丘陵地区,由于当地的物质组成、地貌条件、生态环境及人为活动等条件特殊,影响土壤侵蚀的因子众多而且复杂,因而在实际工作中难以全面掌握各侵蚀因子在土壤侵蚀中的确切作用,并且难以量化,因此,用这种因子分析法建立的土壤侵蚀数学模型,其预测土壤侵蚀的精度和适用性受到了较大的影响和限制。

为了改善预测黄土丘陵区土壤侵蚀的方法和效果,本文试图利用航空遥感图像划分出黄土丘陵区土壤侵蚀综合类型,再根据土壤侵蚀综合类型与区域产沙总量之间的相关关系,建立黄土丘陵区土壤侵蚀模型,并依此估算各综合侵蚀类型的土壤侵蚀强度和预测区域侵蚀总量。其思路是,利用遥感图像求出区域产沙总量;划分土壤侵蚀综合类型,并量测各类型面积;用多元回归分析方法将区域产沙总量合理分配到各综合性侵蚀类型区,即求出各土壤侵蚀综合类型的侵蚀强度。

### 1. 区域产沙总量的求算

为了便于求算一个地区的产沙总量,人们常以小流域为单位,来估算本流域内的土壤侵蚀总量。常用的方法有河流输沙量估算法和水库(或淤地坝)淤积体积测量法。前者是用水文站河流泥沙含量统计法求得,后者是用实地量测或航空遥感图像量测方法取得。航空遥感图像量测法,是在室内用航空像片建立光学立体模型,按照摄影测量规范,精心量测库坝高度、淤积厚度,淤积面积及沟道比降等与淤积体积有关的因子,然后用公式求算淤积体积。

范瑞瑜等通过研究提出了如下计算淤积量的公式:

$$V = 3.648 \times 10^{-5} H^{2.172} B^{0.897} J^{1.061}$$

式中:  $V$  为年淤积总量,  $H$  为坝高,  $B$  为淤积平均宽度,  $J$  为沟道比降。

王德甫等<sup>[3]</sup>在陕北米脂县选择了 50 个淤地坝,用上述航空遥感立体量测方法,测量了坝高、淤地平均宽度和沟道比降,并用上述公式计算了库坝淤积总量。将 50 个淤地坝的实测数据与用公式计算的数据进行对比,在 50 个库坝中,误差小于  $\pm 5\%$  的占 98%。这一试验结果说明,利用航空遥感图像立体量测法,求算库坝淤积量是可行的。

### 2. 黄土丘陵区土壤侵蚀综合类型的划分

陕北黄土丘陵地区的土壤侵蚀类型,在 1:10 万比例尺的遥感调查与制图中,共划分

了 40 多个侵蚀类型,为了便于掌握和了解各侵蚀类型的侵蚀强度,又将这 40 多个侵蚀类型按侵蚀强度分为微弱侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、高强度侵蚀、强烈侵蚀和剧烈侵蚀等 7 个等级。从适用的观点来看,这种划分侵蚀等级的方法,简单明了,便于了解黄土丘陵区的土壤侵蚀强度状况。据此,本文在建立土壤侵蚀模型时,利用遥感图像提供的综合信息,按三级分类,将黄土丘陵区的土壤侵蚀状况,划分为两个侵蚀类型、4 个亚类、7 个综合性的侵蚀型。

一级分类按地貌形态分为沟谷地与沟间地两个侵蚀类型。沟缘线以上的梁峁坡地,都成近似的浑圆型地貌单元,从整体来讲,各梁峁坡地都有近似的坡度组合及地貌形态,以面状侵蚀为主,侵蚀强度相近,属同一侵蚀类型。而沟缘线以下的沟谷地,多是大于  $35^\circ$  的陡坡地,流水冲刷及滑坡、崩塌等重力侵蚀作用较强烈,侵蚀强度大于沟间地。

二级分类是按坡度组合特征分为 4 个亚类。即在沟间地侵蚀类型中,分为梁峁坡地和梯田坡地两个亚类。前者为自然侵蚀形成的梁峁坡面,其横剖面的坡度组合特征成近似的抛物线型;而后者,由于受人为改造作用的影响,使原先的抛物线型坡度组合变成了梯级坡面,侵蚀强度大大减弱。

在沟谷地侵蚀类型中,按坡度变化也分为两个亚类,即分布在沟谷底部的沟底地侵蚀亚类,坡度多小于  $8^\circ$ ,侵蚀微弱(河床除外);沟坡地侵蚀亚类坡度多在  $30^\circ$  以上,多有滑坡与崩塌等重力侵蚀作用,侵蚀强度大。

三级分类按地表覆盖类型分为 7 个侵蚀型(表 1)。由于黄土丘陵区的植被类型比较简单,林地的分布面积小(5%左右),而且多以灌木为主,与草地减缓土壤侵蚀的作用基本相同,故将林地与草地合并为一个具有减缓侵蚀作用的覆盖类型。

表 1 黄土丘陵区土壤侵蚀综合类型分类表

Table 1 The classification of multiple types of soil erosion in hilly loess region

侵蚀类型	侵蚀亚类	侵蚀型	侵蚀强度等级
沟谷地	沟底地	川坝地	微弱侵蚀
		陡崖裸土沟坡地	剧烈侵蚀
	沟坡地	耕作或裸土沟坡地	强烈侵蚀
		草灌沟坡地	高强度侵蚀
沟间地	梁峁坡地	耕作梁峁坡地	强度侵蚀
		草灌梁峁坡地	中度侵蚀
	梯田坡地	梯田坡地	轻度侵蚀

### 3. 建立土壤侵蚀数学模型, 求算综合性土壤侵蚀类型的侵蚀强度

根据同一侵蚀类型其侵蚀强度基本一致的原则, 一个地区的土壤侵蚀总量与其侵蚀强度和侵蚀面积之间, 存在如下关系:

$$\text{侵蚀总量} = \text{侵蚀强度} \times \text{侵蚀面积}$$

黄土丘陵区在划分土壤侵蚀综合类型的基础上, 其土壤侵蚀模型可用下式表示:

$$M = F_1X_1 + F_2X_2 + \cdots + F_nX_n$$

式中,  $M$  为侵蚀总量,  $F$  为侵蚀类型面积,  $X$  为侵蚀强度,  $n$  为土壤侵蚀综合类型数。

根据多元回归求算方法的要求, 在黄土丘陵区只要选择有代表性的 7 个小型库坝, 用遥感图像立体量测法, 量测出每个库坝的淤积量, 作出其控制面积内的土壤侵蚀综合类型图, 并量算出各侵蚀类型的面积, 即可用多元回归分析方法求出各土壤侵蚀综合类型的侵蚀强度。

上述 7 个综合性的土壤侵蚀类型, 在黄土丘陵区具有较广泛的代表性, 因此, 求出其侵蚀强度之后, 只要利用航空遥感图像作出任何一个地区的土壤侵蚀综合类型图, 量测出各类型面积, 即可计算和预测该地区或该区任何一个侵蚀类型的土壤侵蚀总量。

### 三、结 语

在地形破碎的黄土丘陵地区, 研究如何发挥遥感技术的优势, 挖掘其在资源调查、水土流失及环境评价等方面的应用潜力, 提高该地区的工作效率和专题研究深度是本研究的目的并取得了实际效果。

应用遥感图像分析黄土丘陵地区的沟谷密度、沟谷发育阶段、地貌形态特征及其与土壤侵蚀强度之间的相关, 收到了良好的效果, 取得了一些新的认识和新的概念。在黄土丘陵地区, 不同类型、不同等级和不同发育阶段的黄土沟谷, 其沟谷密度和侵蚀强度各不相同; 黄土切沟最密集和最发育的地段, 其侵蚀强度最大; 包括黄土切沟在内的沟谷密度可高达  $20 \text{ km/km}^2$  以上; 只有这样的沟谷密度值, 才比较符合当地的实际情况, 才能与当地的侵蚀强度相适应。

本文提出的应用遥感技术划分土壤侵蚀综合类型、建立新的土壤侵蚀数学模型和求算土壤侵蚀强度的设想, 是预测区域土壤侵蚀总量的一种新的技术途径。根据初步量测和运算试验证明, 这种技术途径是可行的。希望有关方面继续进行试验研究, 应用高精度的量测技术或可靠的侵蚀总量实际资料, 求算各侵蚀类型的精确的侵蚀强度数据, 为预测区域侵蚀总量提供实用的数据资料。

### 参 考 文 献

- [1] 罗来兴, 黄土地貌, 中国自然地理, 科学出版社, 1981 年。
- [2] 王明堂, 通用土壤流失方程 (USLE) 在黄土高原土壤侵蚀遥感定量研究中的应用, 黄土高原遥感专题研究论文集, 北京大学出版社, 1990 年。
- [3] 王德甫, 米脂县土壤侵蚀量遥感测量与分析, 遥感信息, (3), 1990。

## Discussion of Methods of Remote Sensing Analysis on Erosion Intensity in Hilly Loess Region of North Shaanxi Province

Chen Zhengyi Chen Jie

*(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)*

### Abstract

In the topographically-broken gullied and hilly region of the loess plateau, we analyse the relationship among the density of gully, the developmental stage of gully, geomorphic form and soil erosion intensity with aerial photograph, and get some better results. Density of gully in this area is so high that it can reach  $20\text{km}/\text{km}^2$ ; the erosive intensity varies with the different gully developmental stage; at the most active and densely gullied area, it has the most erosive intensity. According to the relationship between soil erosion total and erosion intensity, we set up a soil erosive model, divide multiple types of soil erosion using remote sensing image, measure erosive area and deposit total, and calculate the erosion intensity of varied erosive types with multivariate regression analysis methods. Finally we discuss some new technical ways to forecast regional erosive total.

**Key words** Remote sensing Density of gully Multiple types of soil erosion Erosion intensity

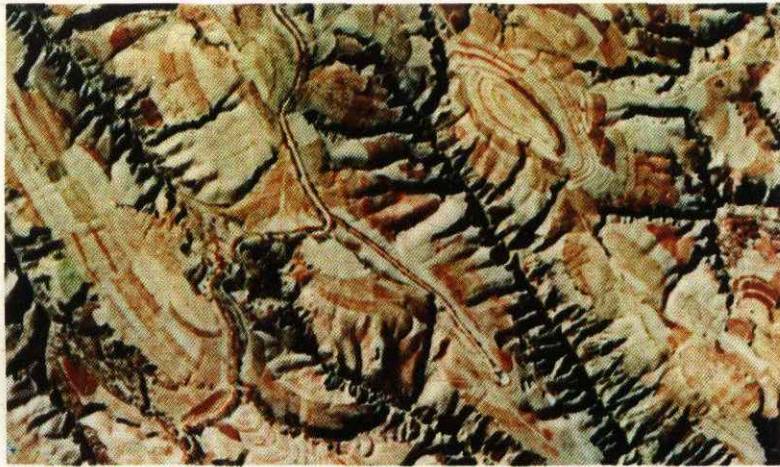


图 3 初期的黄土冲沟  
(1:1 万航空像片)



图 4 中期的黄土冲沟  
(1:1 万航空像片)



图 5 晚期的黄土冲沟  
(1:1 万航空像片)