

地形描绘方法在黄土丘陵沟壑地区的应用

彭望球

(北京师范大学地理系)

1987年12月15日收稿

摘 要

本文探讨了地形描绘方法在地学中的应用效果。通过在山西黄土丘陵沟壑地区描绘河流沟网分布的多种比较计算可知,利用数字高程模型,用离散余弦变换进行小分面拟合以及导数分析,并注意选择适当小的拟合分面和可能在可能条件下提高信息源的分辨率,就可以得到较好的结果。这项工作对于产生地理信息系统数字地形模型的派生数据源是有意义的。

关键词 离散余弦变换 拟合 数字高程模型 (DEM)

一、引 言

用数学分析的方法处理数字图像,对图像中的每个像元进行地形分类,称之为地形描绘方法。这种方法是针对一般图像而言的,在分类中将类别仿照地形特征而冠以地理名词,如峰、盆、脊、沟、鞍、平、坡等类别,还可以进一步分出拐点、斜坡、凸坡、凹坡、鞍形坡面等子类^[1]。这种分类结果对于不同图像具有不同的含义。可以推论,如果图像的灰度表面就是地形的高度面,那么这种分类将带有真实的地理意义。

这项研究最早始于1972年,方法主要是中心点与邻域点的比较,如选择中心点周围 $n \times n$ 的邻域内,若邻域点值均小于中心点的值,则中心点为山峰;若邻域点值均大于中心点的值,则中心点为盆地;对于那些在某一方向上最高或最低的点,定义为山脊或沟谷。这种方法逐渐发展到图像表面的数学曲面拟合再分析的方法,随着分析方法的改进,计算的结果也越来越好。

1983年 R. M. Haralick, L. T. Watson, T. J. Laffey^[1] 在总结前人工作的基础上,提出一种对图像的地形初步描绘方法作为二维图像计算机视觉的基础,并对理想的数学图像和简单实际图像作了试验。这种方法是以前图像密度函数的一阶和二阶方向导数为基础来估计地形特征的。为了找到一阶和二阶方向导数的值,必须对像元的离散密度值用某种函数拟合。如:平面、斜面函数、二维三次多项式、广义样条、离散余弦变换等方法。当然,由于实际图像的复杂性,拟合必须采用开窗分面逐点运算。

这种方法在实际应用中效果如何是个值得探讨的问题。随着计算机视觉应用范围的扩大以及地理信息系统的发展,这种需要也随之增加。计算机数字高程模型的建立提供了研究其实际应用的可能性。图像中像元的灰阶,在这里是每个像元中心的高程值,局部

灰度曲面拟合成为局部地表形态的数学拟合, 因而便可试图从中提取真实的地形特征, 如: 山脊、沟谷、平原、坡面等。本文选择黄土丘陵沟壑地区的三川河流域局部地区为试验区域, 以描绘沟网分布为主要目标, 探讨将理论用于实际的可能性。

二、数学方法

为了用数学方法解决问题, 分别采用局部三次多项式拟合和离散余弦变换, 再用一阶和二阶方向导数分析得到地形特征, 最后比较结果。

信息源可从地形图读出数字高程模型 (DEM), 我们将这种图像称为实际图像。可以认为, 各像元点的灰度是从一个反映地形高度的连续曲面取样而来。由于地表形态的复杂性, 很难用一个简单的数学式子表示出这个曲面, 或说, 不可能表示出来。

为了估计一个实际图像的理想数学形式, 假设在图像的局部区域能较好地与某种数学关系拟合, 局部拟合后的图像称为理想图像。这种拟合产生的误差是随机的。于是, 数据信息图像分解成二个部分: 假定的理想图像和估计理想图像时产生的噪声图像。这个理想图像是假定在每一局部小面内图像灰度函数化, 即把图像在空间域中分解成多个有联系的小面, 在每一个小面内约束灰度值和形状, 使其符合在行、列坐标系内的数学函数小面模型。设图像行号为 x , 列号为 y , 令 M_x, M_y 分别为空间域图像的行数和列数。像元点 $(x, y) \in M_x \times M_y$; $B(x, y)$ 是以 (x, y) 为中心的 $R \times R$ 大小; $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$ 是 $M_x \times M_y$ 空间域划分的小面集合。作拟合运算时, 对于像元 $(x, y) \in \pi_n$, 存在像元 $(i, j) \in M_x \times M_y$, 有约束 $(x, y) \in B(i, j) \subseteq \pi_n$

则 $J(x, y) = F(x, y) + \eta(x, y)$

这里 $E[\eta(x, y)] = 0$

$$E[\eta(x, y)\eta(x', y')] = K\sigma(x - x', y - y')$$

$J(x, y)$ 表示实际图像的灰度值; $F(x, y)$ 表示理想图像的灰度值; $\eta(x, y)$ 为随机平稳噪声。我们的目的是寻找合适的 $F(x, y)$ 函数, 使 $J(x, y) - F(x, y)$ 为最小^[2]。

1. 三次多项式拟合

根据研究可知, 任何一个平滑的小面, 或叫图像的分面, 都可看作中心点周围邻域的一个二维多项式曲面。我们要求拟合基本函数 f 在某像元周围的邻域内连续, 且分别在行 x 列 y 的方向上有连续的一阶和二阶偏导数, 并使其满足以下性质: (1) 能较准确地保持原图像表面特征, 如山峰、盆谷、平面、斜坡、鞍形面、凸坡面、凹坡面等; (2) 能较好地近似原图像表面的另外一些特征, 如阶梯式边界, 山脊, 沟谷等; (3) 容易计算; (4) 数值上稳定。

以一维离散正交多项式为例。若 $P_n(x)$ 是第 n 阶多项式, 假定 $P_0(x), P_1(x), \dots, P_{n-1}(x)$ 已定义, $P_n(x) = x^n + C_{n-1}x^{n-1} + \dots + C_1x + C_0$, 则 $P_n(x)$ 正交于每个多项式 $P_0(x), P_1(x), \dots, P_{n-1}(x)$, 即

$$\sum_{k \in R} P_k(x)(x^n + C_{n-1}x^{n-1} + \dots + C_1x + C_0) = 0$$

$K = 0, 1, \dots, n-1$, R 对 x 为对称区间(即 $x \in R, -x \in R$)

由此,可求出系数 $C_i, i = 0, 1, \dots, n-1$

对于二维离散正交多项式,可用一维离散正交多项式 $P_n(x)$ 和 $Q_m(y)$ 的张量积,则当 $n \neq i$ 或 $m \neq j$ 时, $P_i(x)Q_j(y)$ 与 $P_n(x)Q_m(y)$ 正交,即

$$\begin{aligned} & \sum_{x \in R} \sum_{y \in C} P_i(x)Q_j(y) \cdot P_n(x)Q_m(y) \\ &= \sum_{x \in R} P_i(x)P_n(x) \cdot \sum_{y \in C} Q_j(y)Q_m(y) \\ &= 0 \end{aligned}$$

R 对 x 为对称区间 (即 $\begin{matrix} x \in R \\ -x \in R \end{matrix}$);

C 对 y 为对称区间 (即 $\begin{matrix} y \in C \\ -y \in C \end{matrix}$)。

将这种离散正交多项式的拟合理论用到实际计算时,我们选择 f 为在 x 和 y 方向上的三次多项式,对于实际图像上的每个小分面作离散的最小二乘法多项式近似。将 f 表示为

$$\begin{aligned} f(x, y) = & C_1 + C_2x + C_3y + C_4x^2 + C_5xy \\ & + C_6y^2 + C_7x^3 + C_8x^2y + C_9xy^2 + C_{10}y^3 \end{aligned}$$

其中每个拟合小面区域的中心像元作为 x, y 的原点,得

$$J(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y)$$

$J(x, y)$ 为原图像对应于 (x, y) 像元点的灰阶值, $f(x, y)$ 为相应像元点的拟合灰阶, $\eta(x, y)$ 为该像元点的拟合误差。对小分面内邻域值作计算(这个小分面又叫窗口),可以解得每一参数 C_1, C_2, \dots, C_{10} , 而完成拟合运算^[3]。

2. 离散余弦变换

对图像作分面拟合的另一方法是离散余弦变换。1974年,这种方法已被 Ahmed, Natarajam 和 Rao^[4] 运用到图像处理上,后来逐渐发展到用于图像的拟合函数。这种离散正交函数,对于一维函数,像元点

$$x_j = \frac{(2j+1)L}{2(n+1)} \quad j = 0, 1, \dots, n, \quad x_j \in [0, L]$$

令

$$\langle f, g \rangle = \sum_{j=0}^n f(x_j) \cdot g(x_j) \quad (1)$$

式中 $g(x_j)$ 为原图像的灰阶值。则有余弦函数 $1, \cos(\pi x/L), \cos(2\pi x/L), \dots, \cos(n\pi x/L)$ 与(1)式所表示的函数正交。类似地,对于二维函数

$$\langle f, g \rangle = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n f(x_i, y_j) \cdot g(x_i, y_j) \quad (2)$$

二维余弦函数是一维余弦函数的张量积,表示为

$$\phi_{r,s} = \cos(r\pi x/L) \otimes \cos(s\pi y/L)$$

与(2)式所表示的函数正交。

这样,具有最小残差平方和的拟合函数为

$$f(r, s) = \sum \alpha_{r,s} \cdot \phi_{r,s}$$

其中 $\alpha_{r,s}$ 为权重系数。

在这种情况下,运算可以简化为解等式的线性对角系统的具体问题,比较简单易行^[5,6]。

这种离散余弦变换的拟合理论,在实际计算时,仍取实际图像上以某像元为中心的奇数像元大小的方形邻域作为拟合小面(窗口),计算余弦展开式的系数,为减少计算量,只取前 10 个系数。

3. 地形信息的提取

为了从数字高度图像中搜寻出山峰、盆谷、山脊、沟谷等,从而勾绘出地形特征,必须以各小面拟合函数 f 的一阶和二阶方向导数为基础。

设 ∇f 为函数 f 的梯度矢量,则其大小和方向为:

$$|\nabla f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

$$\beta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\partial f}{\partial x} / \frac{\partial f}{\partial y}\right)$$

设: ω_1 是二阶方向导数具有最大值的方向上的单位矢量; ω_2 是与 ω_1 正交的单位矢量; λ_1 是在 ω_1 方向上的二阶方向导数值; λ_2 是在 ω_2 方向上的二阶方向导数值; $\nabla f \cdot \omega_1$ 为在 ω_1 方向上一阶方向导数的值; $\nabla f \cdot \omega_2$ 为在 ω_2 方向上一阶方向导数的值。

为了找到河流或小溪,必须找到沟底;为了找到流域,必须找到山脊的连线。整个分类按以下规律运算:

(1) 山脊 将像元点判为山脊,必须满足

$$|\nabla f| \neq 0, \lambda_1 < 0, \nabla f \cdot \omega_1 = 0$$

或

$$|\nabla f| \neq 0, \lambda_2 < 0, \nabla f \cdot \omega_2 = 0$$

或

$$|\nabla f| = 0, \lambda_1 < 0, \lambda_2 = 0$$

(2) 沟谷 将像元点判为沟谷,必须满足

$$|\nabla f| \neq 0, \lambda_1 > 0, \nabla f \cdot \omega_1 = 0$$

或

$$|\nabla f| \neq 0, \lambda_2 > 0, \nabla f \cdot \omega_2 = 0$$

或

$$|\nabla f| = 0, \lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$$

(3) 山峰 将像元点判为山峰,必须满足

$$|\nabla f| = 0, \lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$$

(4) 盆谷 将像元点判为盆谷,必须满足

$$|\nabla f| = 0, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$$

(5) 其它 当像元点不满足以上条件时,可进一步分析为其它类别,如平面、山坡面或进一步分类为斜面、凸坡面、凹坡面、鞍形坡面等^[1]。

根据以上方法,在实际计算时,可利用三次多项式拟合或离散余弦变换结果,进一步求出梯度和导数,从而将各像元点分类为山脊、沟谷、山峰和盆谷及其它,分别给每一像元一个标号。如:设标号 1 为山脊,标号 2 为沟谷,标号 3 为鞍形山,标号 4 为山峰,标号 5 为盆谷……。这样,实际的数字高度图像即被分类为标号图像。当显示标号 1 时可以得到本区域的流域网,当显示标号 2 时可以得到河流、小溪及沟网等,从而使结果图像成为数字地形模型的一部分。

三、应 用

为了进一步研究和对比这种地形分类理论,选取黄土丘陵沟壑地区的三川河流域局部地区为试验区域。本区域地形复杂,沟壑纵横,描述河溪沟网及小流域有一定典型意义。为便于分析,只取出类别中的沟类,采用对比方法来描绘河流沟网,通过计算着重比较,(1)不同拟合方法对于结果的影响以探讨拟合方法与地形的关系;(2)拟合时窗口选择的影响,即以像元为中心所选小分面的大小的影响;(3)数字高程模型形成图像时,分辨率(即像元大小)对结果精度的影响;(4)地形对结果的影响。通过分析达到选择最佳条件和探讨实用的可能性的目的。

1. 试验区域的地形特征

试验区选择在吕梁山脉中段西翼的三川河流域,地处柳林县和中阳县界内,为三川河及其支沟区域,地形类型为黄土丘陵沟壑区。其特征是沟壑纵横,梁峁成群,支离破碎,土地瘠薄,植被稀少,坡度陡且变化大。在三川河两岸的大片黄土覆盖区,海拔 650—1300 米左右,相对高差 200—400 米。由于风力的吹扬、流水的侵蚀及陡壁崩塌等,水土流失极为严重,把整块连片的黄土垣面切割得支离破碎,形成各种形状的黄土丘陵沟壑景观。在流域中部多见梁峁丘陵,西部则几乎都是峁状丘陵,包括残垣、梁地、峁地、黄土台坪和侵蚀堆积河谷阶地等地貌类型。整个三川河地区,除三条较大的支流,还有流域面积 100 平方公里以下的支沟 12 条,50 平方公里以下的支沟 54 条,10 平方公里以下的支沟 32 条及 5 公里以下支毛沟一、二千条,这些大小不一的支沟和支毛沟呈树枝状地排列在三川河两岸,许多支叉相互交错,形成密密麻麻的河流、沟网。整个区域沟壑面积占流域总面积的 40%,这些沟道除了三川河的几条支流外,多数沟道有明显的夏雨形和山地性的特征,造成枯水季节无水或少水,流量甚微,而洪水季节,流量很大,冲刷严重¹⁾。基于地形的这个特点,勾画出沟网就勾画出了洪水季节的河网分布。

在计算机处理时,选择多块支沟流域作为比较区域,计算后得到类似的结果。这里以其中二块为例加以说明,分别称为区域一和区域二。区域一选择在位于三川河东南侧的,中阳县张家庄附近 9 公里 × 11 公里的长方形区域,地势东南高、西北低,为典型黄土丘陵沟壑区。这个区域的高程数据来自 1:5 万地形图,分辨率为 100 米 × 100 米,本区高程最高 1320 米,最低 930 米,由于有些深沟极为狭窄,在数据中不可能全部反映出细节。图 1(见封三)为区域一的数字高程模型放大图像。原图为高度分层彩色图,图中浅灰色为沟地和坝地,往外逐渐加深,表示高度增大,最亮区为最高区,山脊线经过其中。区域二

1) 山西省吕梁地区三川河流域水土保持规划报告,吕梁地区水利水保局,1986 年。

在柳林县境内,位于黄河东岸三交镇附近,面积为 4.65 公里 \times 5.5 公里,这里河流支流较多,自东向西,但沿岸较平缓,等高线密度较区域一明显稀疏,最高 992 米,最低 620 米,达到全区最低点。本区 DEM 取自 1:1 万地形图,分辨率为 50 米 \times 50 米。现以不同分辨率,不同地形特点作为参数比较的依据。

2. 比较

(1) 拟合方法的比较 利用区域一进行三次多项式拟合方法与离散余弦变换进行拟合的比较(图 2 和 3, 见封三),拟合窗口都选用 5×5 大小。由于地形起伏,为改善拟合效果,使噪声成分减少,首先对图像进行预处理,即用 3×3 窗口取局部平均,扫描全图,自左至右,自上至下,用平均后的图像进行拟合及地形分类的运算。结果表明,两种方法都是可行的。图中东西走向和西北东南走向的三条主要支沟已表现出来,支毛沟也有所表现,但离散余弦变换结果比三次多项式为好。主要表现在支毛沟,线条连续性较好,如图 2 和 3 (见封三)中箭头所示。白色为地形分类后的河沟类像元分布。

对于沟壑地区,离散余弦变换的优越性很容易理解,即起伏越缓和的山地丘陵,余弦变换就越易描述其地形特征,因此效果越好。而三次多项式对于起伏的特征则表现较差。

(2) 窗口大小的比较 在拟合时窗口的大小,就是拟合小分面的大小,可以由用户自行选择。有时窗口越大,效果越好^[1]。对于当前这种地形特征,选取区域二进行窗口 5×5 与窗口 9×9 比较(图 4 和 5, 见封三)。离散余弦变换后地形分类的结果表明, 5×5 的拟合小面可以描绘出支沟和毛沟,并与原地形图重合很好。窗口加大后,不加预处理计算,主要的支沟形态可以保留,但对支毛沟只能勾绘出个别星星点点而无连续线条。由于起伏的地表形态,尽管对于区域二,其起伏特征已有所缓和,为较细致地描绘河网形态,窗口仍以取得较小为好。图中背景色调是高度分层,左上角为黄河。

(3) 分辨率的比较 分辨率的影响是采用二种方法进行比较的。一种是取来自不同信息源的数据。区域一数据是取自 1:5 万地形图,分辨率 100 米,区域二数据取自 1:1 万地形图,分辨率 50 米。另一种是同一信息源,将区域一数据内插加密到 50 米,再分别用离散余弦变换,窗口 5×5 进行分类计算。结果表明,无论用哪一种方法,分辨率越高,越能更细致地表现出支毛沟的分布状况。加密后的区域一图像高度层次增加,差异变小,像元数大大增加,细节更易描述。所以得到的计算结果,主要支沟变化不大,而支毛沟却清晰多了(图 6, 2, 3, 见封三)。要注意的是加密后的数据不能提高数字高程模型原信息源的分辨率,因而不宜再继续加密,增加不必要的计算量。如应用时仍嫌支毛沟描绘较粗糙,则应从提高原数字高程模型分辨率入手。

(4) 地形条件的比较 从不同区域分别作出来的结果看,区域二效果较好。这与地形起伏比较和缓有关,有些地区最高和最低高度差大,但局部起伏又较小,这时从数学上拟合较困难,使结果受到影响。

从另一方面综合分类结果,可看出宽阔的河流及河漫滩、坝地提取河网连续线条是个困难。由于低洼处不只是一个像元,可能出现二个甚至更多像元点,因此拟合后求导数极值会在这里出现断点,如区域二的左上角黄河入口附近,区域一的左上角刘家庄附近坝地都在描绘时出现断线,使沟网失去连续性。再者,受分辨率的限制,在地形破碎区,有些山脊线或沟谷线在数字化时被隔过而呈现平坦的假象,使描绘时出现不连续现象(图 4—6, 见封

三)。解决的办法,可利用先验知识或地学经验采用人机对话加以修正,并用裂痕连续的图像处理手段连通狭窄断处,去掉孤立点。这在本文中不讨论。

四、结 论

经过多种比较计算,利用数字高程模型 DEM 描绘黄土丘陵地区河流沟网分布,用离散余弦变换进行小分面拟合,再利用导数分析作地形分类,是个可应用的方法。在计算时,要注意根据起伏的地形条件,选择局部平均预处理,选择适当小的拟合分面和可能在条件下,提高信息源的分辨率。无论哪一种选择都会对结果有某些改善,因此处理时必须注意参数的选择。

对地形分类的结果进一步作某些人机交互式的修正工作,可以作为地学工作者的分析资料,也可作为 DEM 的附加叠合图件,从而成为地理信息系统的一部分——数字地形模型派生数据源。因此这个工作是有应用意义的。

参 考 文 献

- [1] R. M. Haralick, L. T. Watson, T. J. Laffey, The Topographic Primal Sketch, The International Journal of Robotics Research Vol. 2, No. 1, Spring 1983.
- [2] R. M. Haralick and L. Watson, A Facet Model for Image Data Computer Graphics and Image Processing 15, pp. 113—129, 1981.
- [3] R. M. Haralick, The Digital Edge, Proceedings of the 1981 Conference on Pattern Recognition and Image Processing, Dallas, Texas pp. 285—294, 1981.
- [4] N. Ahmed, T. Natarajan and K. R. Rao, Discrete Cosine Transform, IEEE Transactions on Computers, Jan. 1974.
- [5] L. T. Watson, T. J. Laffey and R. M. Haralick, Topographic Classification of Digital Image Intensity Surfaces Using Generalized Splines and the Discrete Cosine Transformation, Computer Vision, Graphics and Image Processing 29, pp143—167, 1985.
- [6] F. A. Kamangar and K. R. Rao, Fast Algorithms for the 2-D Discrete Cosine Transform, IEEE Transactions on Computers Vol C-31, No. 9, Sep. 1982.

The Use of Topographic Sketch Method in the Region of Loess Hilly Ravine Land

Peng Wanglu

(Dept. of Geography, Beijing Normal University)

Abstract

This paper describes experiments of the use of topographic sketch method in the region of Sanchuan river basin, Shanxi province, this basin is a region of loess hilly ravine land. Better results can be obtained when following choices are employed: using the discrete cosine transformation facet; smaller window size; DEM from better resolution data.

The experiment shows that the topographic sketch method is practicable for extraction of ravine network or basin network from DEM and able to use it for geographic information system.

Key words

Discrete Cosine Transformation Fit Digital Elevation Models (DEM)

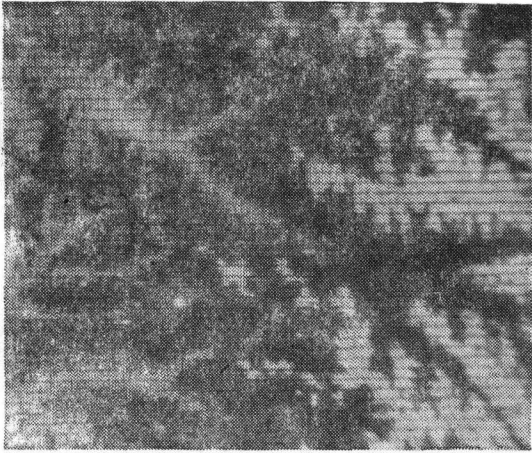


图1 试验区的数字高程模型图像放大图

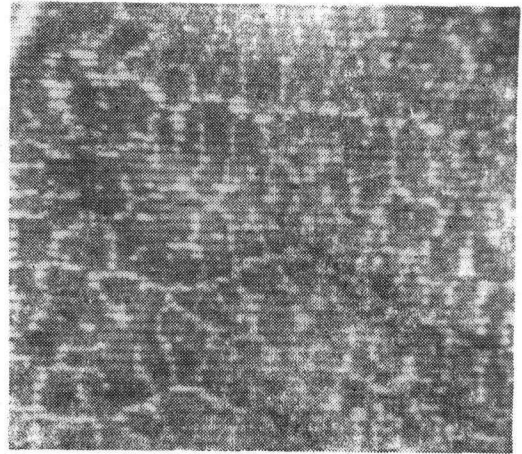


图4 选择窗口 5×5

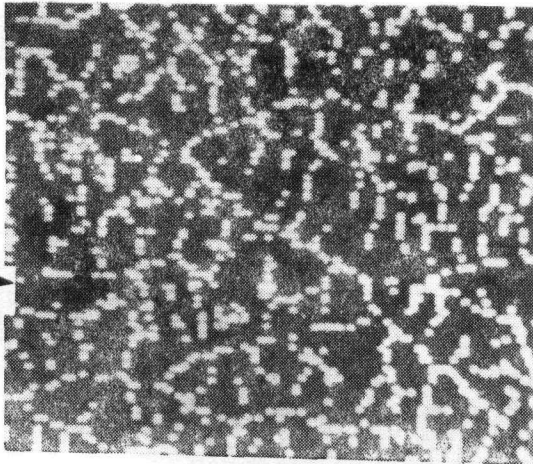


图2 离散余弦变换拟合方法

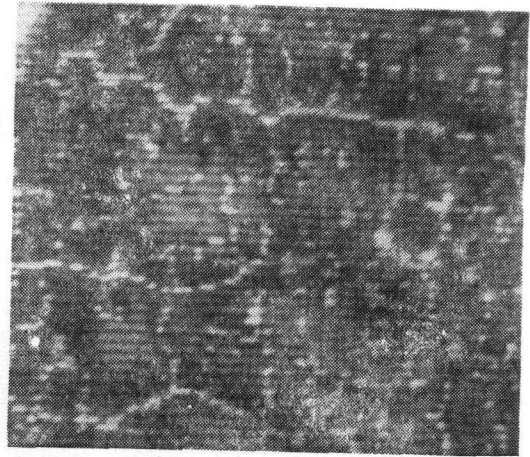


图5 选择窗口 9×9

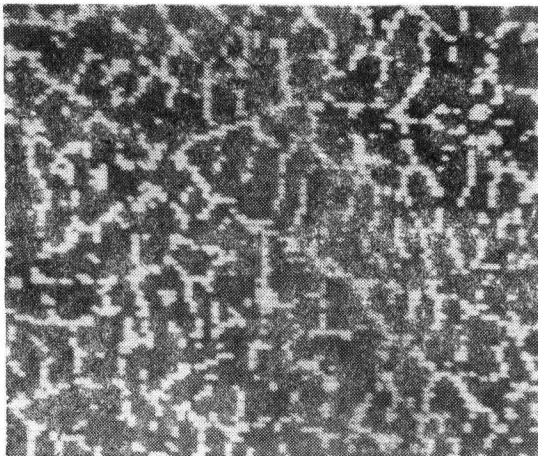


图3 三次多项式拟合方法

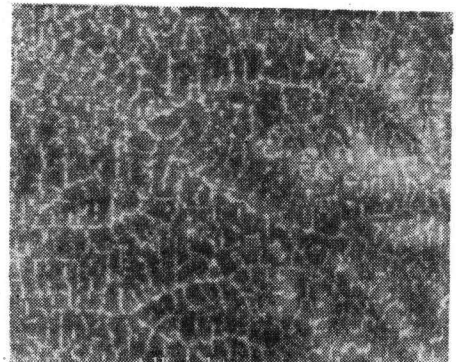


图6 区域-数据内插加密后的结果