

顾及地貌结构特征的黄土沟头提取及分析

江 岭¹, 汤国安¹, 赵明伟^{2,3}, 宋效东¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 沟头是黄土地貌中发育最活跃的地貌部位, 沟头的个体与群体对黄土沟间地的蚕食, 成为监测黄土高原地面侵蚀演化的重要标识。有效获取并分析沟头的空间分布特征, 对于系统、深入地研究黄土地貌的空间形态结构具有重要的意义。以陕北黄土高原典型地貌类型为实验样区, 设计并实现了基于5 m分辨率DEM的沟头提取算法, 获取了各实验样区的沟头空间信息; 运用点格局分析方法, 分析了沟头的空间分布特征。实验结果显示, 所提出顾及沟沿线的沟头自动提取方法, 具有较好的合理性与精确性; 同时, 从黄土塬区、黄土残塬区到黄土丘陵沟壑区, 随着沟壑发育程度的增强, 沟头逐步逼近分水线, 其空间分布呈现“远分水线聚集—随机—近分水线聚集”的变化格局。

关键词: DEM; 沟头; 点格局; 空间分布; 黄土地貌

DOI: 10.11821/dlyj201311016

1 引言

沟谷是反映流域地形特征的基本骨架, 沟谷的产生过程和水文特征是所在流域地质、地貌及气候等诸多因素作用的综合反映。对沟谷的获取手段、形态结构及其水文属性的研究, 一直是地貌学及水文学的重要研究内容。近年来, 随着DEM数据的日益丰富及分析方法的日趋完善^[1-4], 众多学者基于DEM数字地形分析方法, 分别从不同的视角探索沟谷特征, 在沟谷网络提取算法^[5-7]、沟谷密度特征^[8]、沟谷网络分维特征^[9]、沟谷网络节点^[10,11]以及沟谷信息熵^[12]等方面进行了相关研究, 取得了一系列的研究成果。沟谷侵蚀是黄土地貌侵蚀的基本类型。侵蚀沟纵向扩展通过溯源侵蚀发生, 整个流域的堆积和侵蚀关系极大地取决于沟头的前进速率与方式。在一定程度上, 沟头是一种对地貌起决定性作用的特征地貌, 分水线到沟头的距离决定了流域地貌的发育程度。因此, 沟头及其空间分布特征是认知黄土地貌发育演化的重要窗口。目前, 对沟头的研究主要体现在位置定位^[13,14]、形态学特征^[15]、溯源侵蚀特征^[16]及属性组合规律(汇水面积—坡度等)^[13,14,17,18]等方面, 但兼顾地貌结构特征的沟头提取方法及沟头空间分布特征分析鲜有研究。

本文拟开展顾及地貌结构的黄土沟头提取和分析研究, 设计高效可行的基于高精度

收稿日期: 2012-07-12; 修订日期: 2013-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40930531, 41171320); “资源与环境信息系统国家重点实验室”开放基金项目(2010KF0002SA); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ12_0391); 南京师范大学研究生优秀学位论文培育计划(2011BS0007)

作者简介: 江岭(1987-), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 主要研究方向为DEM数字地形分析及GIS地学分析。

E-mail: jiangling_xs@163.com

通讯作者: 汤国安(1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地理信息系统、数字地形分析及GIS空间分析。E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

2153-2162 页

DEM沟头提取算法,分析其在空间分布上呈现的规律。该研究可望丰富数字地形分析的方法,深化对黄土地貌形态空间格局的认识。

2 沟头的概念模型及提取方法

2.1 沟头的概念

对于某一条沟谷来说,沟头不是一个点,而是一小片区域^[6]。该区域为切入地表的谷地,即使没有稳定的径流,其形态特征仍在地貌发育的一定阶段内保持相对的稳定性。沟

头是指某条完整沟谷中,沟沿线以下沟谷与沟底线交点的汇水区(图1)。沟谷与沟沿线交点开始,沿沟谷往下第一次出现坡度变化率最大的点为沟谷与沟底线交点,简称最大变坡点。沟头的范围即为:沟沿线及沟沿线以下沟谷最大变坡点的汇水区。

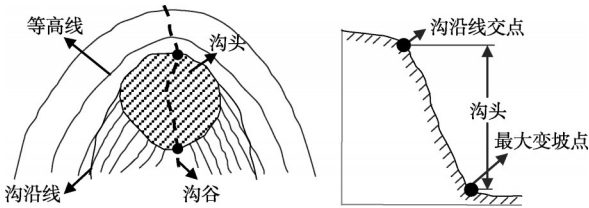
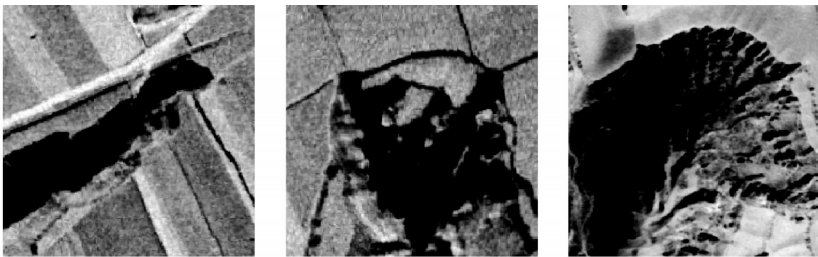


图1 沟头位置分布示意图
Fig. 1 Illustration of gully head location

2.2 沟头的基本属性

沟头的基本属性包括:① 动态变化性。在黄土地貌发育进程中,溯源侵蚀是沟谷侵蚀的基本方式。沟头伴随着溯源侵蚀而不断发生位置、形态等方面的变化。② 类型多样性。按照沟头的形态特征,



a. 锥形沟头: 呈带状, 形态较简单
b. 掌状沟头: 上部沟沿线呈锯齿状排列, 沟头整体呈手掌状
c. 弧形沟头: 无明显枝状伸进, 沟头坡面呈现较大弧形面

图2 不同类型沟头
Fig. 2 Types of gully head

沟头有锥形沟头、掌状沟头、弧形沟头等不同类型(图2)。③ 发育关联性。在沟谷发育的不同阶段,沟谷网络系统中沟头的数量、类型、空间位置及分布特征都随之发生变化,为基于沟头研究黄土地貌的发育提供了条件。④ 结构复杂性。无论是沟头的个体还是群体形态,都呈现出一定的复杂性。在流域范围内,沟头呈现“点群”的复杂空间结构。⑤ 区域差异性。不同地貌类型区(特别是不同地貌发育模式的区域)的沟谷具有发育进程及形态结构的差异性,沟头的空间组合关系与变化特点也随之不同。

2.3 沟头的提取

基于沟头的定义,沟头的提取需基于沟沿线、沟谷与沟沿线交点、最大变坡点、汇水区等方面的计算。

(1) 基于DEM数据的沟沿线提取方法已有相应的研究成果^[19,20],其中利用snake模型的提取结果不仅精度性高而且连续性得到保证^[20]。snake模型的基本思想是:首先在图像上设定一条闭合的初始轮廓线,通过最小化能量函数,使该曲线主动地向感兴趣的目标区域附近的轮廓边界靠近;当曲线能量达到最小时,该曲线的位置就是目标的边缘。DEM

作为地表的连续数字表达, 可以视为是一幅图像。同时, 沟沿线两侧坡度转折的突变性质可作为灰度图像上显著的图像特征。因此, 本文选用snake模型进行沟沿线提取。

(2) 沟谷与沟沿线交点是在沟谷网络的基础上进行求交计算获得。沟谷网络为基于DEM生成的汇流累积矩阵大于一定汇流阈值K快速获取^[12], K利用沟谷网络套合高分辨率数字正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM) 的方法进行最优化选取。在此基础上, 将沟谷“逆流而上”追溯到沟沿线处获取沟谷与沟沿线交点。即从沟谷末端开始, 以3×3的栅格分析窗口, 追溯上游栅格单元为流入当前单元且汇流累积最大的单元, 直到追溯上游栅格为沟沿线单元为止。

(3) 最大变坡点计算过程是在一定坡长范围内, 以沟谷与沟沿线交点为起点, 沿沟谷“顺流而下”, 基于坡度变率因子^[1], 逐点检测坡形变化并记录最大坡度变化点。

(4) 基于由DEM生成的水流方向矩阵数据, 利用变坡点汇水区划分算法, 最大变坡点的汇水区可快速获取^[4]。当然, 此汇水区应以沟沿线为阻隔条件。

基于以上分析, 基于DEM的提取沟头算法具体可设计为以下流程 (图3)。

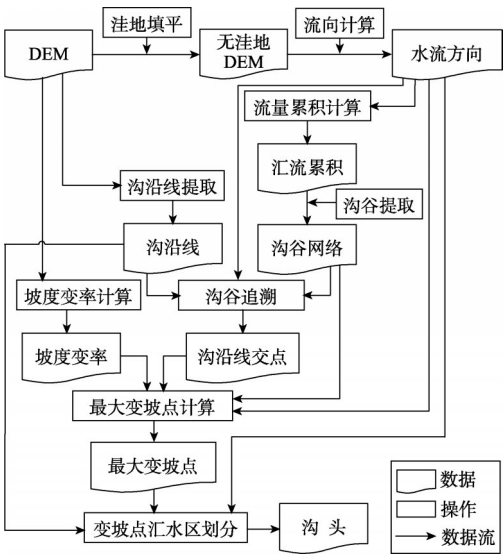


图3 沟头提取流程

Fig. 3 Extraction schema of gully head

3 结果分析

3.1 实验样区与数据

本文选取位于陕北黄土高原南北向分布的淳化、宜君、延川3个样区, 代表了黄土高原最为典型的地貌类型: 黄土塬区、黄土残塬区和黄土丘陵沟壑区。实验使用的数据为国家测绘局生产的1:1万比例尺5 m分辨率DEM以及与DEM严格配准的1m分辨率DOM数据, 每个样区由4幅邻接的1:1万图幅拼接而成, 面积约100km²。用DOM数据作为参考, 采用目视解译方法手动勾绘沟头作为实际沟头, 用于分析本文方法提取沟头的精度。实验样区分布及DEM、DOM数据如图4所示。

3.2 沟头提取结果及精度分析

运用2.3节提出的提取方法, 分别提取3个实验样区的沟头 (图5)。以各样区人工勾绘数据为基准, 从中随机选取100个样本, 将提取结果与其对比分析, 进行数量及形态两

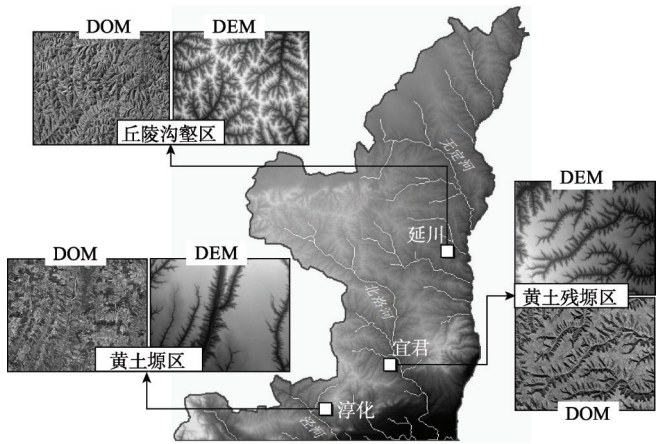


图4 实验样区及数据

Fig. 4 Test areas and data

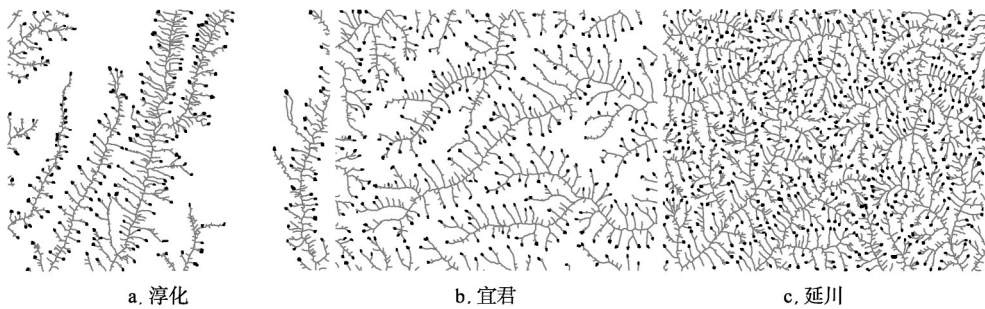


图5 各实验样区沟头分布图

Fig. 5 Distribution of gully heads in Chunhua, Yijun and Yanchuan

方面的精度评价。在数量上，统计样本对应空间位置中基于本文方法所提取出来的沟头数量，并将其与实际沟头数目（即100）的比值作为数量精度指标。表1为各样区样本数量统计分析结果。从表中可以发现，本文提取结果在数量上总精度为78.7%，其中淳化样区提取精度为79.0%，宜君为75.0%，延川为82.0%。图6给出了使用本文方法可提取沟头的沟谷纵剖面线与无法提取沟头的沟谷纵剖面对比图。不可提取沟头的沟谷纵剖面线无明显的最大变坡点，故无法提取出沟头。分析原因可能为，若沟谷在源头位置沿垂向切割、

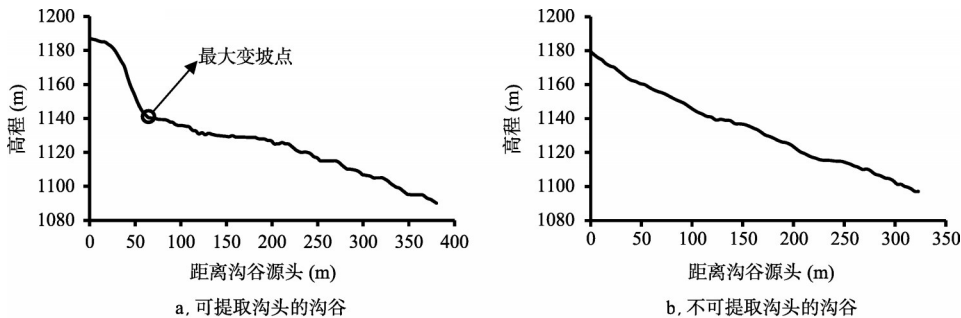


图6 沟谷纵剖面线

Fig. 6 Profiles of gully

横向侧蚀未能达到一定程度^[21]，经5 m分辨率DEM地形综合表达后，本文定义沟头的形态结构无法得以表达。

在二维平面里，提取沟头与实际沟头进行叠加，所重合的比例定义为重叠度。重叠度在形态上反映了提取沟头与实际沟头的一致程度，其数值上等于重合面积与实际沟头面积的比值。文本以重叠度为形态定量评价因子，对表1中存在沟头与相对应样本进行统计分析（表2）。从表2可发现，提取结果总精度为83.4%，与实际沟头形态基本一致。

表3给出了各样区沟头相关的数量统计参数。可以看出，从陕北南部黄土塬区、黄土残塬区到北部的黄土丘陵沟壑区，沟头的数量依

表1 沟头样本数量统计表

Tab. 1 Statistics of sample size

	淳化	宜君	延川
存在沟头数量	79	75	82
不存在沟头数量	21	25	18
总计	100	100	100
精度	0.787		

表2 沟头重叠度统计表

Tab. 2 Overlap degree statistics of gully heads

	平均值	最大值	最小值	标准差
淳化	0.795	0.925	0.612	0.258
宜君	0.872	0.941	0.575	0.168
延川	0.836	0.937	0.593	0.315
精度	0.834			

次递增, 沟头的平均最近邻距离依次递减, 沟头呈现出一定的规律性变化。

3.3 沟头空间分布特征

3.3.1 空间模式分析方法

Ripley's K函数是点过程空间格局分析最常用的

方法, 其以计算最小临近距离的统计方式来分析在一定连续尺度内样本总体的分布格局^[22,23]。本文利用经过校正边缘效应的 Ripley's K 函数, 它的估计值 $\hat{K}(h)$ 可按下式计算^[23]:

$$\hat{K}(h) = \frac{A}{N^2} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{I_h(d_{ij})}{w_{ij}} \tag{1}$$

式中: A 是指研究区域面积; N 为研究区域内点的数量; h 是距离尺度; d_{ij} 是指在 A 范围内点 i 到 j 的距离; $I_h(d_{ij})$ 是一个指示函数, 如果 $d_{ij} \leq h$, 则 $I_h(d_{ij}) = 1$, 当 $d_{ij} > h$, $I_h(d_{ij}) = 0$; w_{ij} 是边缘校正权重因子, 等于以点 i 为中心, 通过点 j 的圆在研究区域内部的面积占该圆的比例。需要强调的是, 为确保 Ripley's K 函数分析的有效性, 距离 h 的值一般要求至少小于研究区域空间尺度的一半。

为了更直观地解释样本的实际空间分布特征, 通常用 Ripley's L 函数代替 Ripley's K 函数以保持方差稳定^[24], 估计值 $\hat{L}(h)$ 计算公式为^[23]:

$$\hat{L}(h) = \sqrt{\hat{K}(h)/\pi} - h \tag{2}$$

$\hat{L}(h)$ 与 h 的关系曲线可用于检验在不同尺度下分布模式的类型。若 $\hat{L}(h) = 0$, 则表征点群在尺度 h 下为随机分布; 若 $\hat{L}(h) > 0$, 表征在尺度 h 下为聚集分布, 且偏离数值越大说明聚集强度越高。若 $\hat{L}(h) < 0$, 则表征在尺度 h 下为均匀分布。同时, 通过随机数 Monte-Carlo 模拟检验, 可以得到 $\hat{L}(h)$ 的置信区间, 本文采用 95% 的置信区间, 代表 0.05 水平的显著性。

Ripley's L 函数是分析空间点分布特征的有效方法, 而沟头实质是一个面对象 (即斑块), 因此, 需将沟头转换为点。由于沟头的面积大小存在差异 (面积变幅均大于 6000 m^2), 如果简单地将一个斑块转换为一个点, 必然造成分析结果与实际情况存在偏差。如图 7 所示, 图 7a 是 A、B 两种面斑块在空间上的分布格局图, 图 7b 是将斑块多边形抽象为点后的分布图。显然, 如果仅凭点格局分布推断出 A 在空间上与 B 相比更为聚集的结果, 是与实际情况不符合的。经过分析可以发现, 产生错误的根本原因是分析尺度的不一致。在空间分布格局分析

中, 当斑块面积差别太大时, 如果统一把其转为点, 则带来了分析尺度上的不一致。针对此情况, 本文以保真空间位置, 顾及面积属性为原则, 采用“面积分解法”进行斑块到点的

表 3 各样区沟头数量统计

Tab. 3 Quantity statistics of gully heads

	个数	平均面积(m^2)	面积标准差(m^2)	平均最近邻距离(m)
淳化	221	2841.57	1344.15	335.93
宜君	310	2654.15	1162.82	321.56
延川	496	2774.21	1197.85	234.75

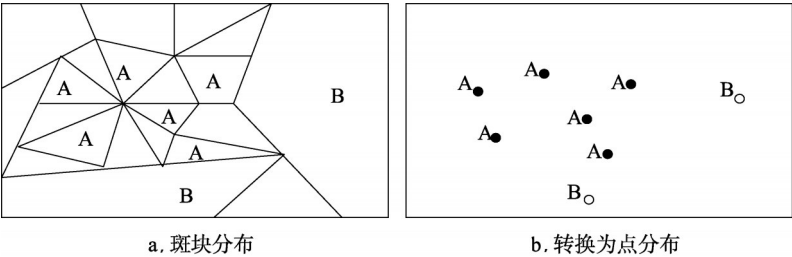


图 7 斑块及其转为点的分布示意图

Fig. 7 Sketch maps of the distribution of patches and points converted from patches

转换：首先统计分析出格局中斑块的平均面积，然后以该面积为基准，将面积大于此面积的斑块分解成若干与基准面积一致的小斑块，再将得到的新斑块分布图转为点进行分析。该方法的具体实现过程为：

以研究区域沟头面积的平均值 a 为基准，创建覆盖研究区域以 \sqrt{a} 为边长的正方形格网，如果沟头在一个方格内面积超过方格面积的一半，则将该方格作为一个新的斑块加入需要转换为点的斑块集中（图 8a）。若沟头无法满足上述规则，则将该沟头加入斑块集中（图 8b、8c）。最后，取斑块集中斑块的几何中心，得到用于沟头空间分布特征分析的点格局数据。

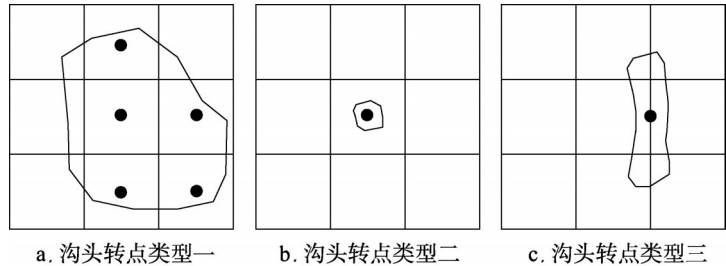


图 8 沟头转点示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of converting gully heads into points

3.3.2 空间分布特征 根据“面积分解法”，分别以 54m、52m、53m 为正方形格网大小，获取了 3 个典型黄土地貌样区沟头的点格局数据，并依据公式（1）、（2）计算了 $\hat{L}(h)$ ，结果如图 9 所示。

（1）在淳化样区—黄土塬区中（图 9a）， $\hat{L}(h)$ 在 0 ~ 50m 位于置信区域下限之下，表明沟头在此区间内为均匀分布；在 50 ~ 5000m 处置信区间上限之上，是为聚集分布。 $\hat{L}(h)$ 对 h 曲线在 0 ~ 50m 负向偏离 0 参考值，波动较大；50 ~ 5000m 尺度上正向偏离 0 参考值，曲线在 50 ~ 1750m、4200 ~ 4600m 呈现上升态势，1750 ~ 4200m、4600 ~ 5000m 呈现下降态势。

（2）在宜君样区—黄土残塬区中（图 9b），0 ~ 50m 为均匀分布；50 ~ 700m 为聚集分布；在 700 ~ 5000m 处于置信区间内，为随机分布。 $\hat{L}(h)$ 曲线在 0 ~ 50m、950 ~ 5000m 尺度内负向偏离 0 参考值，曲线在 950 ~ 4050m 呈现下降态势，在 4050 ~ 5000m 尺度内呈现上升趋势；50 ~ 950m 尺度内正向偏离 0 参考值，呈现下降态势，波动较大。

（3）在延川样区—黄土丘陵沟壑区中（图 9c），0 ~ 50m 为均匀分布；1100 ~ 1750m 为随机分布；50 ~ 1100m、1750 ~ 5000m 为聚集分布。 $\hat{L}(h)$ 曲线在 0 ~ 50m 尺度内负向偏离 0 参考值，波动较大；50 ~ 5000m 正向偏离 0 参考值，在 50 ~ 1400m 曲线呈现下降态势，在 1400 ~ 5000m 曲线呈现上升趋势。

各实验样区在低于平均最近邻距离小尺度范围内，均出现了均匀和聚集程度强的波动分布，其原因为：由于采用“面积分解法”时分解格网大小均在 50m 左右，故 $\hat{L}(h)$ 在 0 ~ 50m 位于置信区域下限之下，沟头均呈现出均匀分布；因顾及沟头的面积属性，大部分沟头被分解为多个点，故 $\hat{L}(h)$ 在分解格网大小到平均最近邻距离尺度范围内，出现较大的聚集峰值。在 350 ~ 5000m 尺度内， $\hat{L}(h)$ 值在淳化样区介于 65 ~ 175 之间、宜君样区介于 -48 ~ 34 之间、延川样区介于 0.5 ~ 77 之间，说明淳化样区的聚集程度强，延川样区次之，宜君最弱。

图 10 为实验样区的面积—高程积分曲线，从中可以得出淳化、宜君、延川的地貌发育程度依次增强^[25]。汤国安等^[1]研究表明，在黄土高原区域，坡谱是描述区域地貌形态特征的有效方法，不同发育阶段的黄土地貌，对应着不同的坡谱且存在着一定稳定地域尺度

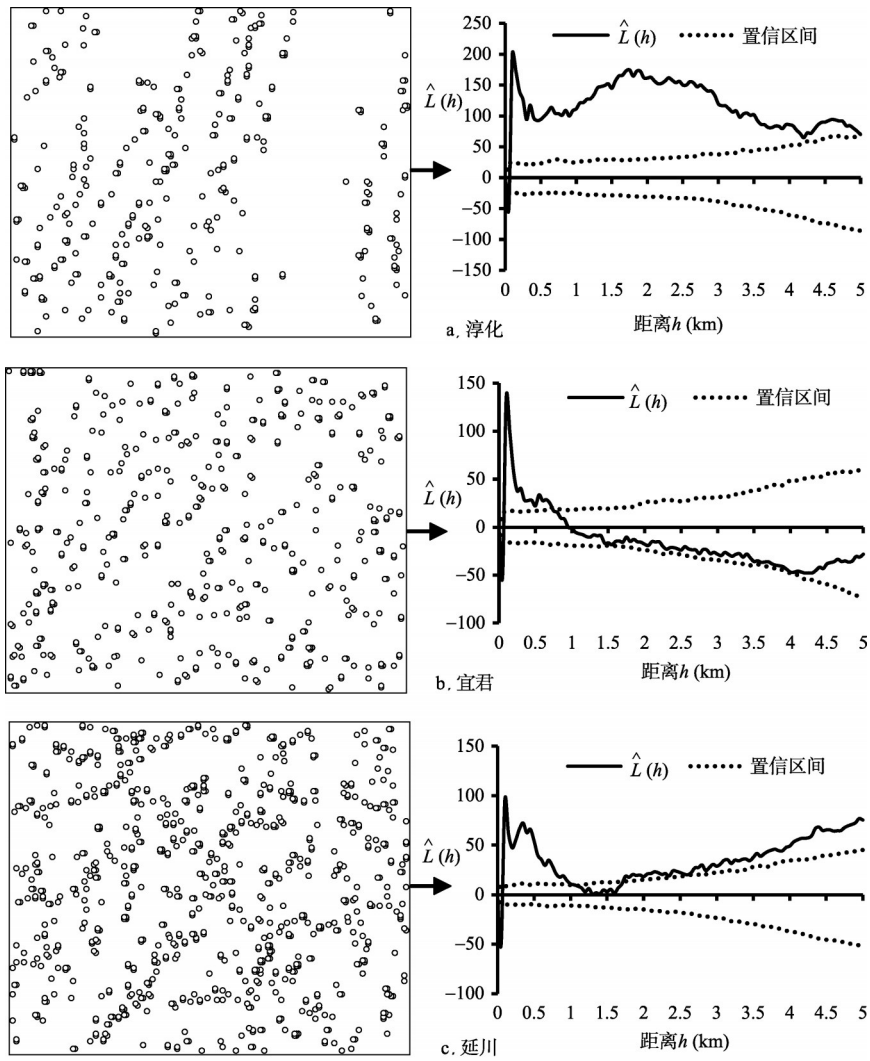


图9 沟头空间分布 (左图为点格局数据, 右图为沟头空间分布特征)

Fig. 9 Spatial distribution of gully heads

(The left shown is the data of spatial pattern, and the right is the spatial distribution)

(坡谱的稳定阈值)。坡谱的稳定阈值反映着地貌的稳定单元, 即地貌的有效分析尺度。淳化、宜君、延川的坡谱稳定地域尺度依次是1600m、1400m、1200m^[1]。结合地貌发育程度及坡谱稳定地域尺度, 从黄土塬区、黄土残塬区到黄土丘陵沟壑区, 随着地貌的发育, 沟壑密度不断增大, 沟头的空间分布呈现聚集—随机—聚集的特征 (延川样区在1100~1750m内 $\hat{L}(h)$ 值大于0, 呈不显著聚集分布)。

黄土地貌的发育集中体现在沟谷系统的发育, 黄土沟谷系统发育明显的进程特征为沟头的

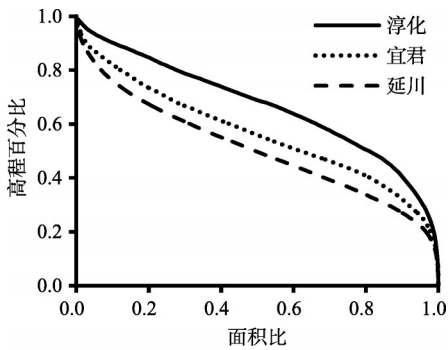


图10 面积—高程积分曲线

Fig. 10 Integral curves of area-altitude

持续前进，逐渐逼近分水线。因此，沟头的空间分布特征可由沟头与分水线的关系——逼近度分布特征进行表达。逼近度为沟头到分水线的距离，其从距离的角度

反映了在某种地貌类型下的侵蚀潜能^[26]。逼近度在数值上等于沟头的上游汇流坡长，本文以沟头中最大变坡点的上游汇流坡长作为沟头的逼近度。表4为各实验样区逼近度统计数据，结果综合反映了样区沟头的发育程度：黄土塬区（淳化）逼近度平均值最大，标准差最大，样区沟头发育不充分，沟谷系统存在较强地发育潜能；黄土丘陵沟壑区（延川）平均值和标准差最小，沟头发育程度较强；黄土残塬区（宜君）介于前两者之间。图11为各样区逼近度正交方向分布特征（红色点代表以最大变坡点的平面坐标为X轴及Y轴值、逼近度为Z轴值的沟头，蓝色点为红色点在Y轴与Z轴相交平面的投影点，绿色点为红色点在X轴与Z轴相交平面的投影点）：淳化、延川样区逼近度在两个正交方向上均呈现集中分布态势，反映出沟头聚集分布于分水线一定距离线周围；宜君样区逼近度在两个正交方向上表现为较为离散的分布态势，沟头距离分水线无规律性，随机分布于分水线两侧。将各样区逼近度归一化后，可形成逼近度频率曲线（图12）。通过逼近度频率曲线可知：① 淳化、延川样区分别存在一个686.07 m和208.23 m的峰值，且延川峰宽度大于淳化。淳化样区沟头距离分水线较远，沟头的聚集特征为远分水线聚集，而延川样区沟头距离分水线较近，为近分水线聚集。在聚集程度上，淳化高于延川样区。② 宜君样区曲线谷峰交错，逼近度分布呈现离散性，进一步验证了该样区沟头的随机空间分布特征。

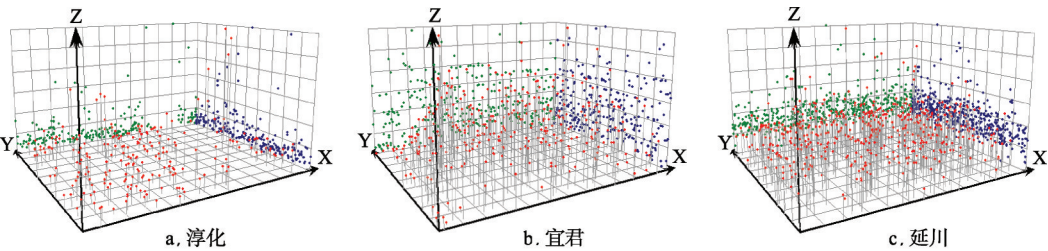


图11 逼近度正交方向分布特征（X方向为南北方向、Y方向为东西方向）

Fig. 11 Distribution characteristics of orthogonal directions, X is east-west direction and Y is north-south direction

4 结论与讨论

（1）对于某一条沟谷来说，沟头不是一个点，而是一小片区域，具体是指沟沿线以下的沟谷与沟底线交点的汇水区。沟头具有动态变化性、类型多样性、发育关联性、结构复杂性及区域差异性等基本属性。

（2）基于DEM自动提取沟头方法简便可行。在顾及地貌结构特征的基础上，本文提取方法在数量上的精度为78.7%，在形态

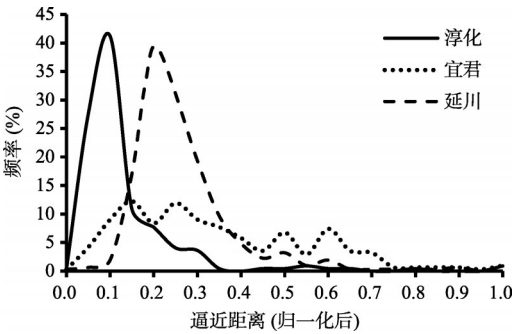


图12 逼近度频率曲线

Fig. 12 Frequency curves of proximity distance

一致程度上的精度为83.4%，表明基于5m分辨率DEM提取沟头是可行的。

(3) 沟头的空间分异特征显著。在进行点格局空间分布特征分析时，运用“面积分解法”对沟头进行点转换，沟头空间分布特征更符合实际情况。在不考虑小尺度情况下，淳化（黄土塬区）在335~5000m尺度范围内呈现聚集分布；宜君（黄土残塬区）在321~700m为聚集分布，700~5000m为随机分布；延川（黄土丘陵沟壑区）在235~1100m、1750~5000m为集聚分布，1100~1750m为随机分布。结合地貌发育程度及坡谱稳定地域尺度，从沟头与分水线之间距离角度分析，从黄土塬区、黄土残塬区到黄土丘陵沟壑区，随着地貌的发育，沟壑密度不断增大，沟头的空间分布呈现远分水线聚集—随机—近分水线聚集的特征。

沟头的空间分异体现了黄土沟壑发育的差异性，映射了黄土地貌的空间分异特征。但本研究只是运用空间点格局研究手段对沟头空间分布特征进行了初步研究，今后的研究应着眼于基于多样区、多源数据，特别是多时相数据的沟头发育动态变化及其影响因素分析，深化对黄土地貌形态特征及空间格局的认识。

参考文献(References)

- [1] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Hengl T, Reuter H. *Geomorphometry Concepts, Software, Applications*. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2009. 171-194.
- [3] Yang Xin, Tang Guoan, Xiao Chenchao, et al. The scaling method of specific catchment area from DEMs. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(4): 689-704.
- [4] Wilson J P. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 2012, 137(1): 107-121.
- [5] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 1997, 32: 309-319.
- [6] Desmet P J J, Govers G. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, 10: 311-331.
- [7] 闫国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究. *地理学报*, 1998, 53(6): 52-61.
- [8] 张丽萍, 马志正. 流域地貌演化的不同阶段沟壑密度与切割深度关系研究. *地理研究*, 1998, 17(3): 273-278.
- [9] 熊波, 陈学华, 刘艳峰. 基于DEM的沟谷分形分维研究. *人民黄河*, 2009, 31(11): 44-45.
- [10] 易红伟, 汤国安, 刘咏梅, 等. 河网径流节点及其基于DEM的自动提取. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 108-111.
- [11] 李军锋, 李天文, 陈正江, 等. 基于DEM的黄土高原丘陵沟壑区沟谷网络节点研究. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 386-391.
- [12] 易红伟. 基于DEM的黄土高原沟壑信息挖掘研究[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- [13] Hancock G R, Evans K G. Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31: 809-824.
- [14] McNamara J P, Ziegler A D, Wood S H, et al. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*, 2006, 224: 147-156.
- [15] 王小丹, 钟祥浩, 范建容, 等. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究. *地理科学*, 2005, 25(1): 63-67.
- [16] 马玉凤, 严平, 李双权, 等. 龙羊峡库区威连滩冲沟沟头侵蚀的动态监测. *干旱区地理*, 2012, 29(2): 238-244.
- [17] Montgomery D R, Dietrich W E. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*, 1989, 25(8): 1907-1918.
- [18] Montgomery D R, Dietrich W E. Where do channels begin. *Nature*, 1988, 336: 232-234.
- [19] 闫国年, 钱亚东, 陈忠明. 基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟谷沿线技术研究. *地理科学*, 1998, 18(6): 567-573.
- [20] Song Xiaodong, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. Extraction of loess shoulder-line based on the parallel GVF snake model in the loess hilly area of China. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 11-20.
- [21] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究. *地理科学*, 1986, 6(4): 340-347.
- [22] Ripley B D. Modelling spatial patterns. *Journal of Royal Statistic Society: Series B*, 1977, 39: 172-192.
- [23] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. Ripley's K(d)函数分析种群空间分布格局的边缘校正. *生态学报*, 2003, 23(8): 1533-1538.

- [24] Moeur M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. *Forest Science*, 1993, 39(4): 756-775.
- [25] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, 63: 1117-1142.
- [26] Zhou Yi, Tang Guo-an, Yang Xin, et al. Positive and negative terrains on northern Shaanxi Loess Plateau. *Journal of Geographical Science*, 2010, 20(1): 64-76.

Extraction and analysis of loess gully heads considering geomorphological structures

JIANG Ling¹, TANG Guoan¹, ZHAO Mingwei^{2,3}, SONG Xiaodong¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The gully head is the most active development position in loess landform. The individual and group of gully heads to nibble the loess area between gullies has a marked influence on monitoring the surface erosion and evolution in Loess Plateau. The effective extraction and investigation of gully heads is of critical significance to have a deeper study on the spatial form structure of loess landform systematically. In this paper, three typical landform areas of Loess Plateau are chosen as study areas which are Chunhua, Yijun and Yanchuan. They are located in loess tableland area, loess broken plateau area and loess hilly area respectively, and distributed in the north-south direction of the northern part of Shaanxi province. A gully head extraction model is designed based on 5-m resolution DEMs considering geomorphological structures. In each test area, the spatial information of gully heads is obtained by the extraction model, and the spatial distribution of gully heads is analyzed via the point pattern method. The result of precision evaluation shows that the automatic extraction method considering the shoulder line has 78.7% accuracy on the precision of quantity and 83.4% accuracy on the precision of shape consistent degree. The experiment of the spatial distribution characteristic is completed by the improved point pattern method. The experimental result shows that gully heads gradually approach to the divide line along with the increasing development degree of ravines. And in loess tableland area, loess broken plateau area and loess hilly area, the spatial distributions of gully heads respectively present three statues: clustered far from divide line, random and clustered near divide line. The application example also proves that the spatial distribution characteristic of gully heads is more in line with the actual situation when using the improved method called Area Decomposition Method to convert polygons to points. In conclusion, the research could be valuable not only in deepening the understanding of the spatial pattern of loess landform from the view of gully head, but also in offering a methodological support for digital terrain analysis on Loess Plateau.

Key words: DEM; gully head; point pattern; spatial distribution; loess landform