

文章编号: 1108 - 2786 - ( 2017 ) 1 - 95 - 07

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000200

# 基于 DEM 脊点跟踪的山脊线编码与分级

彭 瑾 ,董有福\*

( 南京工业大学 测绘科学与技术学院 江苏 南京 211800 )

**摘 要:** 山脊线是构成地形骨架的主要地形特征线之一 ,它与沟谷线共同控制着地形整体走势。山脊表现为与沟谷类似的层次分支结构 ,但却不具备沟谷线水流方向明确的特性。本文在借鉴沟谷线分级思想基础上 ,提出一种基于 DEM 脊点跟踪的山脊线编码分级方法 ,通过修正流域边界线提取山脊线 ,找到各等级脊线起始点 ,搜索并编码出相应等级的完整山脊线。通过宜君和韭园沟两个小流域进行验证 ,并与流域边界最高级分级法对比。结果表明 ,本文编码方法可以有效反映出山脊线层次 ,山脊线等级划分相对细致 ,与同一阈值下沟谷线等级匹配性较好。该研究可为地形结构特征分析提供方法参考 ,为多尺度地形综合提供技术支撑。

**关键词:** DEM; 山脊线; 特征线; 分级

**中图分类号:** P931

**文献标志码:** A

山脊线是地形起伏变化的骨架线 ,它与沟谷线共同控制着地形的整体走势 ,对地形地貌的研究具有重要的意义<sup>[1]</sup>。山脊线也有着不同的层次等级结构 ,反映着地貌生成的层次性机理过程 ,是 DEM 地貌综合中必须顾及的重要信息<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者对山脊线的研究可分为定性与定量两方面。山脊线定性研究主要集中在山脊线形态及其组成<sup>[3]</sup>以及山脊与沟谷耦合特征方面<sup>[4]</sup>; 针对沙丘山脊的研究表明山脊的等级体系类似于沟谷网络 ,但未说明如何确定初始等级<sup>[5]</sup>。此外 ,一些学者基于局部地形几何特征和整体地表水流模拟等方法对山脊线的提取进行了研究<sup>[6-9]</sup>。山脊线定量研究相对较少 ,其中最高流域边界法用多级流域分水线叠置分析后的最高级别作为山脊线相应等级<sup>[2]</sup>; K - means 聚类法用流域树形结构模型 ,选取山脊线的分级参数后对山脊线进行了聚类划分<sup>[10]</sup>。而与山脊线具有类似分支结构的沟谷线定量研究较

为成熟 ,目前有关沟谷网络的级别划分 ,主要有 Horton<sup>[11]</sup>、Strahler<sup>[12]</sup>、Shreve<sup>[13]</sup>、Scheidegger<sup>[14]</sup>、Woldenberg<sup>[15]</sup>六种划分方法。

由此可见 ,针对目前山脊线的研究主要集中在形态、组成、与沟谷耦合特征及提取等定性描述方面 ,而在脊线分级量化方面的研究尚显不足 ,因此 ,本文根据山脊线与沟谷线结构的相似性与差异性 ,借鉴沟谷分级思想 ,提出一种基于脊点跟踪的山脊线编码分级方法 ,为山脊线的等级划分提供借鉴与参考。

## 1 原理与算法

### 1.1 实验样区与数据

本文选取陕西宜君与韭园沟两个小流域作为实验样区 ,宜君小流域位于陕西省洛河中下游( 35°20'00" ~ 35°30'00"N ,109°18'45" ~ 109°26'15"E) ,海拔

收稿日期( Received) : 2016 - 07 - 20; 改回日期( Accepted) : 2016 - 09 - 10。

基金项目( Foundation item) : 国家自然科学基金项目( 41101360 ) [National Natural Science Foundation of China( 41101360 ) ]

作者简介( Biography) : 彭瑾( 1992 - ) ,女( 汉族) ,硕士生 ,江苏南通 ,研究方向为数字地形分析与空间数据挖掘 [PENG Jin( 1992 - ) , female , M. Sc. candidate , born in Nantong , Jiangsu Province , research on digital terrain analysis and spatial data mining] E - mail: pjin92@163. com

\* 通信作者( Corresponding author) : 董有福( 1976 - ) ,男( 汉族) ,博士 ,副教授 ,河南信阳 ,研究方向为数字地形分析与空间数据挖掘 [DONG Youfu ( 1976 - ) , male , Ph. D. , associate professor , born in Xinyang , Henan Province , research on digital terrain analysis and spatial data mining] E - mail: dongyoufu@163. com

761~1158 m,地势西南高而东北低,自西向东呈阶梯状,属于黄土黄梁残垣沟壑地貌类型;韭园沟小流域位于陕西省无定河中游(37°32′00″~37°37′30″N,110°15′00″~110°22′45″E),海拔830~1200 m,地表形态复杂,坡面起伏很大,以发育充分的峁梁地貌为主,属于典型黄土丘陵沟壑地貌类型。实验数据采用国家测绘部门生产的5 m分辨率DEM。

## 1.2 山脊线分级思想

从地图或实地观察中都可以发现,山脊线与沟谷线相互缠绕,两者有着紧密的相互作用关系。山脊线是沟谷线对应的正地形,山脊线勾勒出了沟谷线对应流域的边界,两条相邻山脊线间存在着一条沟谷线,两条相邻沟谷线间也存在着一条山脊线,二者交错存在,拓扑关系严谨。谷脊线有着相似的树状分支结构,一样有主干与支干的等级层次,在二维平面上,山脊线与相邻的沟谷线呈现出一种类似平行的形态,如图1。

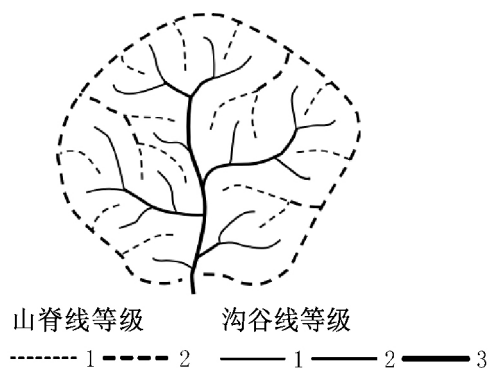


图1 山脊线与沟谷线空间关系示意图

Fig. 1 Spatial relation of ridge lines and valley lines

沟谷分级 Strahler 法是由一定阈值的汇流累积量确定第一等级的起始点,并通过水流方向确定第

一等级河流,由两条或两条以上第一等级河流汇聚成第二等级河流,即两条或两条以上相同等级河流汇聚成更高等级河流;而一条第二等级河流与一条第一等级河流依旧汇聚成第二等级,如图1。

本文在借鉴沟谷 Strahler 分级部分思想的基础上,通过修正流域边界线提取山脊线,找到各等级脊线起始点,搜索出不同等级的完整山脊线,然后进行编码实现山脊线量化分级。但在用 Strahler 法生成沟谷线等级时,谷线连续、水流由高处流向低处,只有一个出水口,而山脊线整体不连续且没有汇流累积量,山脊线第一等级的起始点无法仿照沟谷等级的生成方法直接生成。因此先确定各等级脊线的起始点,再从起始点3\*3范围内跟踪搜索出符合条件的脊线点,并赋予其等级,按最先确定等级的点为起始点,最后确定的点为终结点,脊线交汇处称为径流节点。

山脊线分级流程如图2,将沟谷栅格值赋为1,由流域边界线生成的栅格值赋为0,其余栅格值设为空值。本文将河网数据与脊线数据以ASCII格式从ArcGIS导出后,通过C语言编程进行脊点跟踪与编码,再将处理后的数据导入ArcGIS得到分级后的山脊线。由于第一等级脊线与第二等级脊线编码过程不尽相同,而第二等级以上编码过程相同。本文仅详细描述第一、第二等级脊线编码,编码算法图框如图3。

## 1.3 编码方法

第一等级脊线起始点确定步骤:将流域边界栅格与沟谷栅格叠加,通过行、列逐次搜索,将沟谷3\*3范围内的脊线起始点选定,即值为1的栅格3\*3范围内搜索是否有栅格值为0的点,若有,则将该值为0的栅格属性值重新赋为1,改栅格点即为与沟谷相邻的山脊线的起始点。

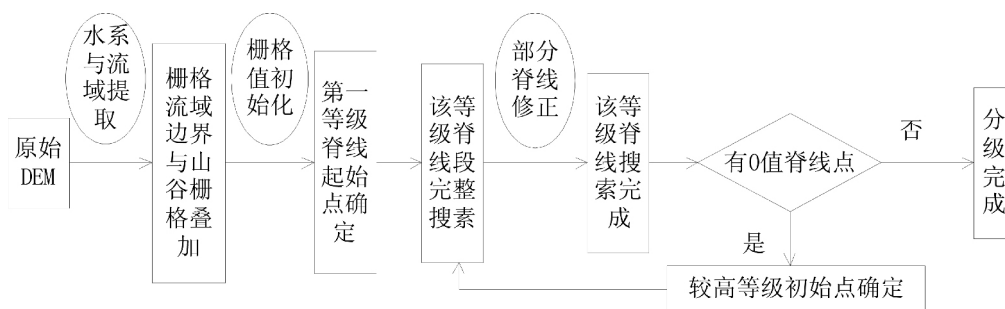


图2 基于脊点跟踪的山脊线分级编码流程图

Fig. 2 Process of ordering ridge lines based on ridge point tracking method

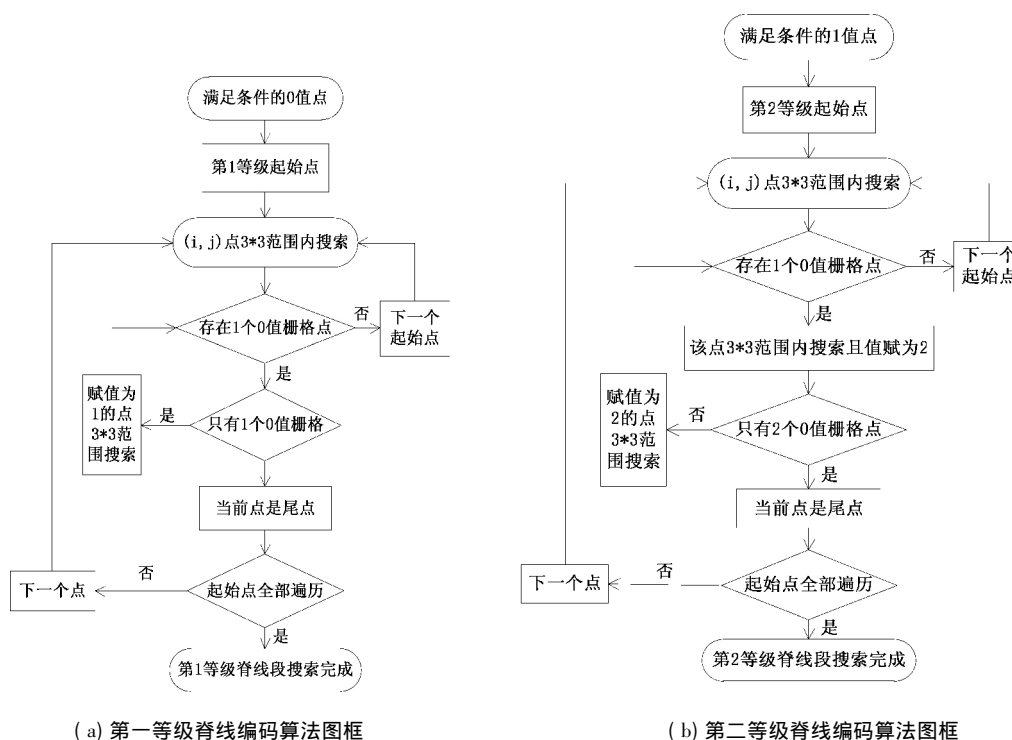


图3 脊线编码算法图框

Fig. 3 Encoding algorithm frames of ridge lines

(a) Process of encoding first order ridge lines (b) Process of encoding second order ridge lines

确定第一等级脊线起始点后,为避免新赋值的第一等级脊线被认为是沟谷,而将理应赋为第二等级的脊线重新被赋为第一等级脊线,释放沟谷栅格。

由于栅格点的排列方式影响着算法,本文将对三种影响算法的排列方式依次说明。追踪第一等级山脊线栅格具体步骤:

(1) 由第一等级某一起始点置为当前点,并在其 $3 \times 3$ 范围内搜索;

(2)  $3 \times 3$ 范围内,若出现1个0值栅格点,要分两种情况:

①若只出现一个0值栅格,将其属性值改为1并置为当前点,跳到步骤(3);

②若除了一个0值点以外,还有两个1值点出现,表明该点为尾点,该段脊线搜索结束,跳到步骤(5),如图4(a);

(3) 继续在当前点 $3 \times 3$ 范围内搜索,若出现1个0值栅格点,返回(2);

(4) 继续在当前点 $3 \times 3$ 范围内搜索,若出现两个以上0值栅格点,表明当前点为该段脊线的尾点,该段脊线搜索结束,如图4(b);

(5) 返回(1),直至所有的起始点脊线段搜索结束;

(6) 为避免第一等级汇入第二等级时,径流节点栅格被赋成第一等级,拦断了第二等级,判断每段第一等级栅格点 $3 \times 3$ 周围所出现的0值栅格点行或列坐标差值是否为2,若是,则将该第一等级栅格点赋为0,第一等级脊线搜索完成,如图4(c);

第二等级起始点的确定步骤:由0值栅格点开始搜索,在当前0值栅格点 $3 \times 3$ 范围内一共有8个环绕点,但本文只列出2种影响算法的排列方式,算法图框如图4(a):

(1) 若当前点范围内出现两个或两个以上1值栅格点,且这两个1值栅格点非相邻同行或同列,如图,则表示该点为第二等级起始点,如图4(a)。

(2) 若0值栅格范围内只有一个1值栅格,将该1值栅格置为当前点,并确定当前点 $3 \times 3$ 范围内是否有两个1值点,如有,当前点值改为2,如图4(b)。

第二等级脊线起始点搜索完毕后沿用搜索第一等级脊线的方法,搜索出全部的第二等级脊线。与第一等级所不同的是,两条或两条以上第一等级脊线汇聚成一条第二等级脊线,现实中是第二等级脊线分散成两条或两条以上脊线,两条或两条以上不同等级脊线汇聚成脊线中级别较高的脊线。

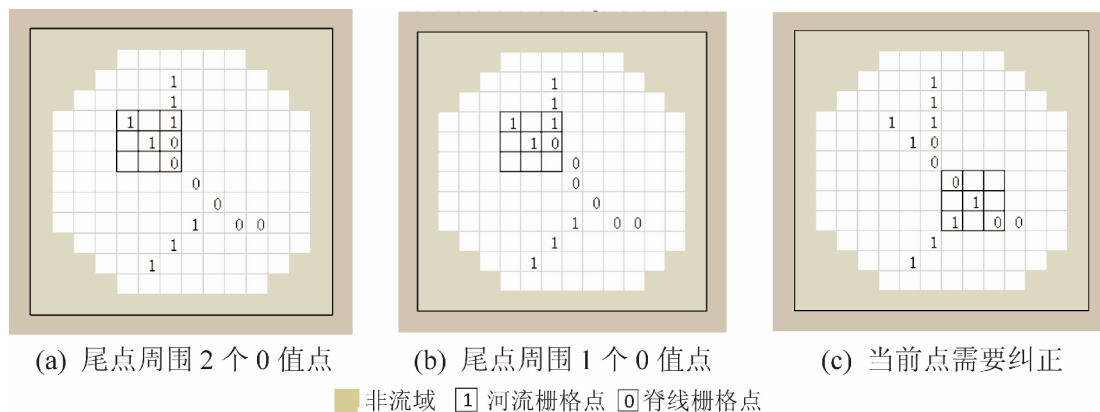


图 4 影响第一等级脊线搜索算法的三种栅格排列方式

Fig. 4 Three algorithms of searching first order ridge lines

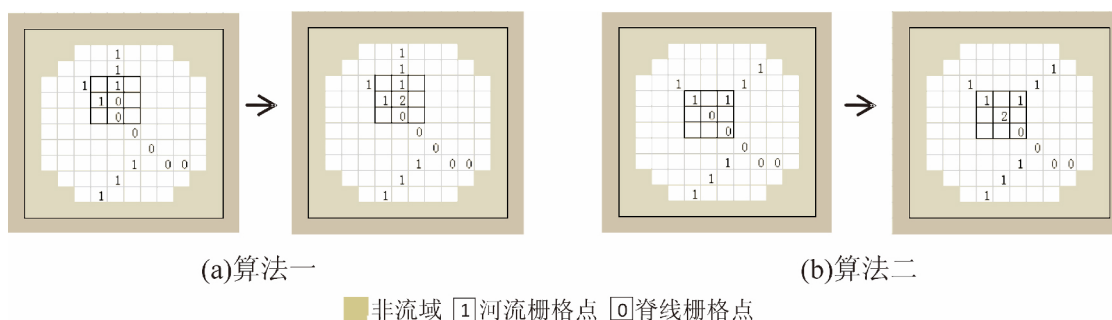


图 5 影响第二等级脊线起始点搜索算法的两种栅格排列方式

Fig. 5 Two algorithms of searching start point of second order ridge lines

追踪所有第二等级山脊线栅格具体步骤:

(1) 由第二等级某一起始点置为当前点,并在其  $3 \times 3$  范围内搜索;

(2) 若出现 1 个 0 值栅格点,将其属性值改为 2 并置为当前点;

(3) 继续在当前点  $3 \times 3$  范围内搜索,若出现一个 0 值栅格点两种情况:

①若该当前点  $3 \times 3$  范围内还有 1 值栅格点,表明有第一等级脊线汇入第二等级脊线中,则与 1 值、2 值栅格点同时相邻的 0 值栅格点属性值改为 2 并置为当前点且在  $3 \times 3$  范围内搜索,返回步骤 (2);

②若该当前点  $3 \times 3$  范围内只有两个 0 值栅格,表明当前点为该段脊线的尾点,该段脊线搜索结束。

(4) 返回 (1) 直至所有的起始点脊线段搜索结束,第二等级脊线搜索完成。

第三及第三等级以上分级过程与第二等级同样,直至边界栅格中无 0 值,表明所有边界栅格值赋值完成,分级编码结束。

## 2 结果与分析

### 2.1 实验结果

汇流阈值不同导致生成的沟谷数量和等级存在明显差异,进而影响到子流域以及脊线的提取结果。本文选择了 500、1000、1500、2000、3000、3500 六个汇流阈值进行沟谷和子流域提取与对比分析,通过影像资料与现有地形图进行辅助判别,同时结合验证本文算法可行性的实验目的,对宜君与韭园沟小流域分别采用 2000、3000 的汇流阈值提取沟谷线与山脊线。宜君河流等级为 3 级,山脊线分级结果为 4 级,如图 6(a);韭园沟小流域河流等级为 3 级,山脊线分级结果为 4 级,如图 6(c)。在 Strahler 沟谷分级方案中,存在沟谷等级的跳跃,部分一级沟谷直接汇入三级沟谷。山脊线分级结果也存在等级的跳跃,一级山脊线和三级、四级山脊线直接相连,如图 6(a)、6(c)。然而在相同的汇流阈值和分级方案条件下,山脊线分级是稳定的。各个级别山脊线反映了其分割流域规模的大小和发育等级,体现出一定

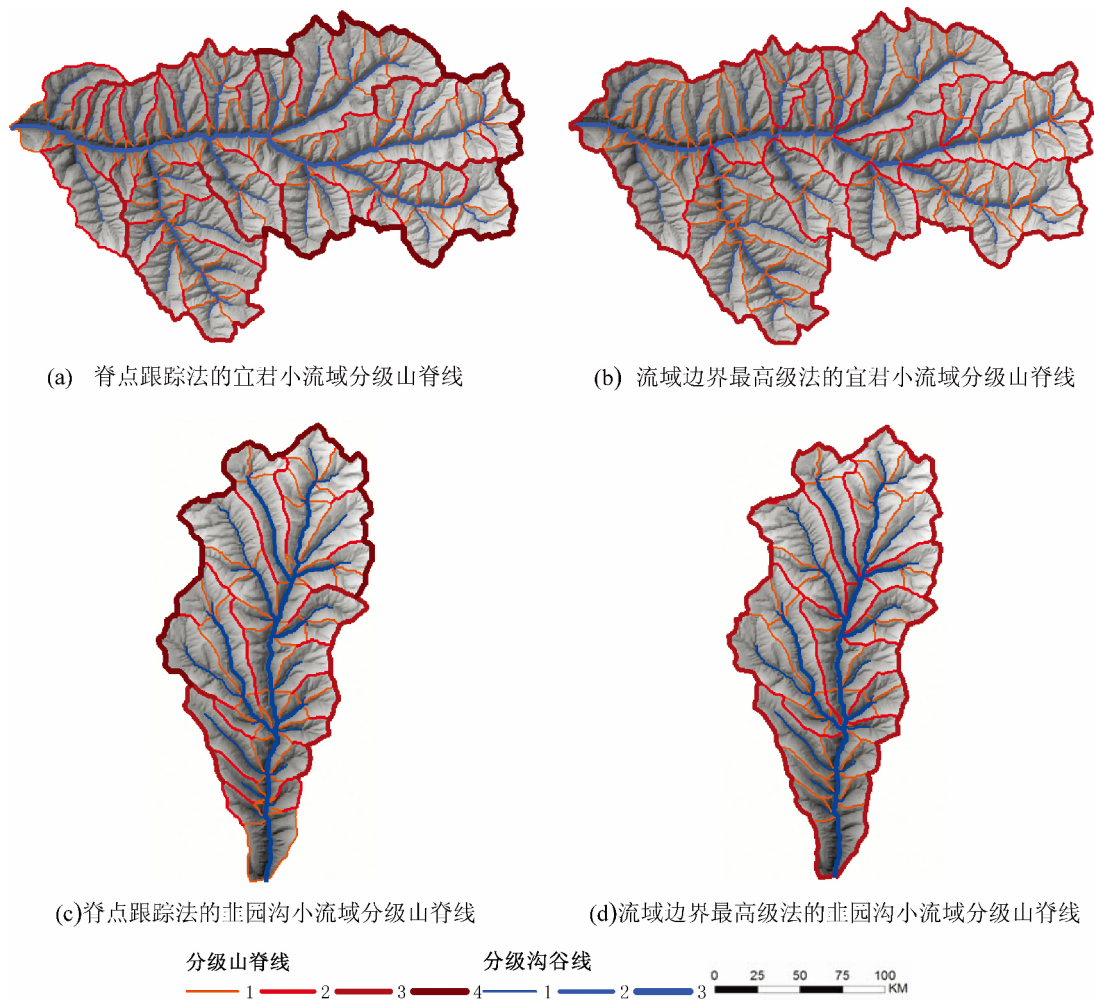


图 6 宜君与韭园沟小流域两种山脊线分级方法对比图

Fig. 6 Graded ridge lines of ridge point tracking and highest-level watershed boundary methods in two samples  
( a ) Ordered ridge lines of ridge point tracking method in Yijun watershed , ( b ) Ordered ridge lines of highest-level watershed boundary method in Yijun watershed , ( c ) Ordered ridge lines of ridge point tracking method in Jiuyuangou watershed , ( d ) Ordered ridge lines of highest-level watershed boundary method in Jiuyuangou watershed

的合理性。

2.2 实验分析

选用流域边界比较明显的陕西宜君与韭园沟两个小流域作为实验样区 ,通过 Strahler 沟谷分级法得到宜君与韭园沟小流域河流等级都为 3 级 ,利用脊点跟踪法后两个样区的山脊线分级结果都有 4 级。

分级等级数上 ,虽然山脊线与沟谷线有相似的分支结构 ,但山脊线的等级发展并不受沟谷线等级限制 ,而是按山体自身的生长态势决定山脊线的分级数 ,一定程度上保持了山脊线分级的客观、独立性。山脊线各等级分支数的变化趋势同沟谷线相近 ,随着等级的增加而减少 ,但是山脊线的数目整体多于沟谷线 ,这是因为山脊线内部不完全连续 ,如表 1。

表 1 两个小流域基于脊点跟踪的山脊线与沟谷线分级对比

Tab. 1 Ordered ridge and valley lines by ridge point tracking method of two experimental samples

等级	第一等级		第二等级		第三等级		第四等级	
小流域	宜君	韭园沟	宜君	韭园沟	宜君	韭园沟	宜君	韭园沟
沟谷线	38	31	8	17	1	1	0	0
山脊线	135	55	39	19	6	4	2	1

空间分布上,同分级后沟谷线的主干与支干对应,分级后的山脊线有主线与支线。高等级山脊线为主线,较为连续且绵长、集中在较高地势,主要控制了地形的整体变化特征;低等级山脊线为支线,较为分散且细短、集中在低地势,主要分布于山体两侧,体现出地形的细节变化。某一等级的沟谷线与相应流域对应的山脊线呈现出类似平行的结构,显示出了二者的耦合关系,低等级的沟谷线对应着低等级的山脊线,但沟谷线等级越高,相应流域所对应的山脊线等级越细致、由低等级山脊线与高等级山脊线共同组成。

本文与文献[2]提出的流域边界最高级法进行对比,对宜君、韭园沟两个小流域选取与本文分级方法同样的汇流累积量阈值,以文献[2]方法生成分级山脊线。山脊线等级与沟谷线等级相同,各等级山脊线布局简单,每一等级沟谷线的流域边界为相应等级的山脊线,如图6(b)、6(d)。山脊线各等级分支数的变化趋势同沟谷线相近,随着等级的增加而减少,但脊线分支数总体少于沟谷线分支数,如表2。可以看出基于DEM脊点跟踪的分级编码法在分级层次上相对于文献[2]的方法更细致,在空间分布上高等级脊线对应着相对较高的地势、低等级脊线对应着相对较低的地势,渐进性明显、层次等级清晰,更能体现出山体的走势变化。

表2 两个小流域流域边界最高级法的山脊线  
与沟谷线分级对比

Tab. 2 Ordered ridge and valley lines by highest-level of watershed boundary method of two experimental samples

等级	第一等级		第二等级		第三等级	
小流域	宜君	韭园沟	宜君	韭园沟	宜君	韭园沟
沟谷线	38	31	8	17	1	1
山脊线	135	74	27	22	1	1

### 3 结论与讨论

本文以山脊线与沟谷线的相似性与差异性为依据,在借鉴沟谷线分级思想的基础上,提出了基于DEM应用脊点跟踪的山脊线编码分级算法。通过在宜君和韭园沟两个小流域实验结果表明,该算法易于实现,可以有效反映出山脊线层次结构,山脊线等级变化具有渐进性,同时与相同阈值下沟谷线等级匹配性较好。该研究可为地形要素提取分析提供方法参考,为多尺度地形综合提供技术支撑。

实验中通过流域边界线提取山脊线,因此,汇流阈值大小将对山脊线的数量与等级具有一定影响,因此汇流阈值需要通过多次实验对照确定;此外,不同地形条件、不同空间尺度下基于脊点跟踪的山脊线编码分级的合理性及其影响因素还需进一步实验研究。

### 参考文献(References)

- [1] 汤国安,李发源. 数字高程模型教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 170 [TANG Guoan, LI Fayuan. Digital elevation model course [M]. Beijing: Science Press, 2010: 170]
- [2] 贺文慧,汤国安,杨昕,等. 面向DEM地貌综合的山脊线等级划分研究: 以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 30-33 [HE Wenhui, TANG Guoan, YANG Xin, et al. Study on gradation of ridges based on DEM terrain simplification: A case study of the Loess Hilly Region [J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(2): 30-33]
- [3] GILBERT G K. Geology of the Henry Mountains [R]. Report of Geology of the Henry Mountains, 1877: 124-144
- [4] WERNER C. Formal analysis of ridge and channel patterns in maturely eroded terrain [J]. Annals of the Association of American Geographers, 1988, 78: 253-270
- [5] GOUDIE A. Statistical laws and dune ridges in southern Africa [J]. The Geographical Journal, 1969, 135(3): 404-406
- [6] 熊汉江,李秀娟. 一种提取山脊线和山谷线的新方法 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2015, 40(4): 498-515 [XIONG Han-jiang, LI Xiujian. A method to extract terrain feature lines [J]. Geomatic and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(4): 498-515]
- [7] 黄培之. 提取山脊线和山谷线的一种新方法 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2001, 26(3): 247-252 [HUANG Peizhi. A method for extracting terrain feature lines from digitized terrain data [J]. Geomatic and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(3): 247-252]
- [8] 黄培之,刘泽慧. 基于地形梯度方向的山脊线和山谷线的提取 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2005, 30(5): 396-399 [HUANG Peizhi, LIU Zehui. Extraction of ridge and valley from DEM based on gradient [J]. Geomatic and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(5): 396-399]
- [9] 靳海亮,康建荣,高井祥. 利用等高线数据提取山脊(谷)线算法研究 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2005, 30(9): 809-812 [JIN Hailiang, KANG Jianrong, GAO Jingxiang. Research on the algorithm of extracting ridge and valley lines using contour data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(9): 809-812]
- [10] 陈永刚,杨春菊,陈孝银. 基于树形结构的地形骨架线分级方法研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 1119-1125 [CHEN Yonggang, YANG Chunju, CHEN Xiaoying. Skeleton line gradation method based on tree structure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(6): 1119-1125]

- [11] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of American Bulletin, 1945, 56: 275 – 370
- [12] Strahler A N. Hypsometric ( area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Bulletin of the Geological Society of American, 1952, 63( 11) : 1117 – 1141
- [13] Shreve R L. Statistical law of stream numbers. The Journal of Geology, 1966, 74: 17 – 37
- [14] Scheidegger A E. The algebra of stream-order numbers [J]. United states Geological Survey, 1965, 525 – B: 187 – 189
- [15] Woldenberg M J. Geography and properties of surfaces [J]. Harvard Papers in Theoretical Geography, 1967, 1: 95 – 189

## A DEMs – Based Method for Ordering and Coding Ridge Lines by Tracing Ridge Grids

PENG Jin<sup>1</sup>, DONG Youfu<sup>1</sup>

( College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

**Abstract:** Being one of key features constructing the terrain skeleton, ridge lines interworking with valley lines control the terrain movements on the whole. Despite being with many branches of different orders similar to valley lines, the ridge lines don't extend like the direction of valley lines which flow from high locations to low ones and converge to the outlet. Referring to the thought for classifying valley lines, a DEMs – based method for ordering and coding ridge lines was proposed to search and order them by extracting them from modified watershed boundary, finding the starting point of each ridge line being of different order, then searching and encoding each ridge segment with the starting point's order. Taking two watersheds named Yijun and Jiuyuangou as test areas and one existed algorithm ordering ridge lines named highest-level watershed boundary as comparison, the method presented in this paper was verified and evaluated. The results show that the method can describe the relationship of ridge lines with different orders clearly with more details and the ridge lines ordered by this method match the corresponding order valley lines extracted with same accumulation threshold value and ordered by Strahler approach very well. The research is helpful to analyze the terrain structure based on terrain features and construct multi-scale DEMs.

**Key words:** DEM; ridge lines; feature lines; order