

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150140

基于 DEM 和坡面特征的坡位生成方法

刘鹏举 夏智武 唐小明

(中国林业科学研究院资源信息研究所)

摘要:坡位是描述地貌的重要因子,基于 DEM 自动生成坡位对于自然生境分析与地理生态过程模拟具有重要意义。本文以 DEM 数字地形分析技术为基础,提出一种以坡面汇水小区为单元综合考虑坡面特征的坡位划分方法,并设计算法实现了该方法。结合林业调查对坡位的划分要求,以北京 1:25 万 DEM 数据为基础对西部山区进行坡位划分,取得合理一致的结果。结果表明,本文提出的方法可以实现相对位置计算与坡面剖面分割的本地化,使坡位划分更加客观一致。

关键词:坡位划分; 水流路径; 坡面相对位置; 坡面形状; 数字地形分析

中图分类号:S716.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2016)02-0068-06

LIU Peng-ju; XIA Zhi-wu; TANG Xiao-ming. **Slope position extraction method based on DEM and slope features.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016) **38**(2) 68-73 [Ch, 15 ref.] Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

Slope position is an important factor describing relief in the hillslopes. The automatic extraction of slope position has great significance in the natural habitat analysis and geo-ecological process modelling. Based on digital terrain analysis, we propose a slope position classification method which considers both slope profile and relative position index. And then the algorithm of the method was designed and programmed. According to forest resources survey rule, the slope position extraction test was carried out in the western mountainous areas of Beijing based on DEM data at the 1:250 000 scale. The test has achieved the expected result. The result showed that the method can realize the localization of relative position index calculation and slope profile segmentation, and make the classification more objective and reasonable.

Key words slope positions extraction; flow path; relative position index; slope profile; digital terrain analysis

坡位是描述地形地貌的重要因子,表示地形坡面纵剖面的上下位置^[1]。一般把坡面划分为山脊、坡肩、背坡、坡脚、沟谷 5 种类型^[2],不同坡位上有不同的土壤、水文、地貌、气象等环境条件以及不同的生态系统。通过坡位分类信息和坡位渐变信息可以通过定性和定量两个方面来分析坡位上的地理环境、水文条件、气象因子的特征^[3],因此坡位信息对于自然生境分析和地理生态过程模拟具有重要意义。

目前地形地貌特征分析及自动提取主要是基于栅格 DEM 数字地形分析技术 (Digital terrain

analysis, DTA)。数字地形分析技术按照分析的手段分为两类研究方法^[4]:基于地形分析的地形特征分析方法和基于水系分析的地形特征分析方法。坡位信息属于地形地貌特征范畴,其提取方法也包括两大类:1) 基于地形分析的坡位信息生成方法^[5-8]。通过算法窗口计算局部地形几何属性,利用坡度、剖面曲率、水平曲率等几何形状因子进行聚类分析,得到坡位信息和划分坡位,此类研究中的代表有模糊聚类方法、基于模糊规则的模糊推理方法。2) 基于水文分析的坡位信息生成方法^[9-10]。坡位信息分析范围比地形算法窗口更大,一般是基于流域范围或

收稿日期: 2015-04-29 修回日期: 2015-11-02

基金项目: “863” 国家高技术研究发展计划项目 (2012AA102001)。

第一作者: 刘鹏举, 博士, 副研究员。主要研究方向: 林业 GIS 技术与应用。Email: liupeng@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

子流域范围的坡面来计算位置指数,通过位置指数大小来得到坡位信息。由于基于地形分析方法来划分坡位的参数太多、方法复杂、计算量大,并存在坡位误判、坡位破碎无序的缺点,而且当坡度越平缓出现误判的情形越多,因此基于水文分析方法提取坡位信息具有明显的优势。

基于水文分析的坡位信息提取方法中最典型的代表是基于相对位置指数(Relative Position Index, RPI)的坡位划分方法。Skidmore^[9]首先提出了基于相对位置指数划分坡位的方法。相对位置指数定义为某一点到沟谷的最短欧氏距离与该点到山脊及沟谷的最短欧氏距离之和的比值,通过将相对位置指数划分为若干区间实现对坡位的划分。张汉奎等^[11]研究了基于流域相对高程的相对位置指数的计算方法。该方法以河道网络作为重力零势面,减少山区地势的影响,更准确地定量描述了坡面上单元的位置。目前对于相对位置指数的计算,山谷位置均以流域河道单元作为基础,具有较好的一致性,但对于山脊位置的确定,仅基于山顶高程为标准,难以反映流域内山脊线的变化及坡面形状特征。

本文以基于栅格 DEM 的流域水文分析为基础,通过分析坡面水流路径与坡位的关系,提出考虑坡面特征的基于坡面汇流小区的山区坡位生成方法,实现坡位信息的自适应提取,为后续的山地气象、立地条件、土壤分布、地形地貌发育等相关研究奠定基础。

1 流域结构分析与坡位定量描述

基于 DEM 的山区地貌特征分析通常以流域划分为基础,按照水流特征将地形分为不同集水区,每个集水区由集水区边界与河道构成。对于坡位划分来说,相对位置指数是目前应用较多的坡位表征参数。相对位置指数可较好地反映区域地形中地形部位在空间分布上的相对性。

相对位置指数的计算需要以沟谷与山脊的位置为参考,已有研究通过计算坡面单元相对于最近河道单元与山脊的欧氏距离来获得这一参数,也有的研究应用山顶海拔与汇水区海拔简化这一参数的计算。由于河道与山脊海拔在一个汇水区是变化的,因此在大的汇水区与复杂地形中采用单一山顶高程参数划分坡位并不准确。在基于 DEM 生成的水流单元网络中,以河道单元作为出口形成汇水小区,并且沿最大上坡汇水面积形成的主水流路径与所在坡面的纵剖面特征保持一致,因此河道单元汇水小区可作为相对位置指数计算的基本单元。

在林业调查与区划工作中,对坡位划分有明确

的调查标准规范,规定坡位分为脊部、上坡位、中坡位、下坡位、山谷、平地 and 全坡 7 种坡位;从脊部以下至山谷范围内的山坡三等分后的部位可以依次划分:往上部分为上坡,中间部分为中坡,往下部分为下坡^[12-13]。因此,对于坡位划分,首先是确定脊部和山谷,然后依据坡面形态确定坡面的上下边界。

通过以上分析可知,坡位的划分要综合考虑相对位置指数计算所在的尺度与坡面纵剖面的几何形态特征。

2 山区坡位生成方法及其关键技术

本文以流域划分为基础,通过提取山脊山谷线,划分汇水小区,然后通过计算坡面单元位置指数并确定坡位划分指标,实现对流域单元坡位的一致划分。

2.1 坡位划分基本原理

综合考虑坡位提取的尺度、参考基准、坡面的几何形态与分类要求,本文提出一种新的坡位自动生成方法。首先,利用基于 DEM 的数字地形分析方法将山区划分为流域、汇水区、坡面、汇水小区 4 个层次,明确坡位划分的尺度;其次,确定每个坡面的山脊与沟谷部位,确定相对位置指数计算的基准;然后,考虑汇水小区内坡面的几何形态,依据分类要求制定汇水小区坡位划分标准;最后,对汇水小区内单元按照划分标准指定坡位类别,完成流域单元坡位的划分。

该方法中涉及 4 个范围由大到小的对象:流域、汇水区、坡面、汇水小区,是一个逐步细化的处理过程。在流域层次,需要依据水流网络进行流域结构分析,划分汇水区。在汇水区层次,需要应用阈值法与形态法相结合的方法,提取河道与山脊单元。在坡面层次,需要依据汇水网络确定每个河道单元的汇水小区,并依据是否到达山脊将汇水小区进行分类。在汇水小区层次上,需要判断坡面的几何形态,并依据划分要求制定坡位划分指标。最后依据汇水小区划分指标完成流域单元坡位的分类。本文中坡位自动生成方法流程如图 1 所示。

山区坡位自动生成方法中包含了流域和坡面的划分、河道与山脊提取、汇水小区坡位划分 3 个关键技术。

2.2 坡位生成关键技术

由以上分析可知,坡位是描述所处坡面上下位置的地形因子,其划分的主要依据是相对位置指数,而相对位置指数计算的基础是流域水文分析。因此,坡位信息生成的关键技术包括流域和坡面的划分、山脊与山谷线的确定、基于汇水小区的坡位分类。

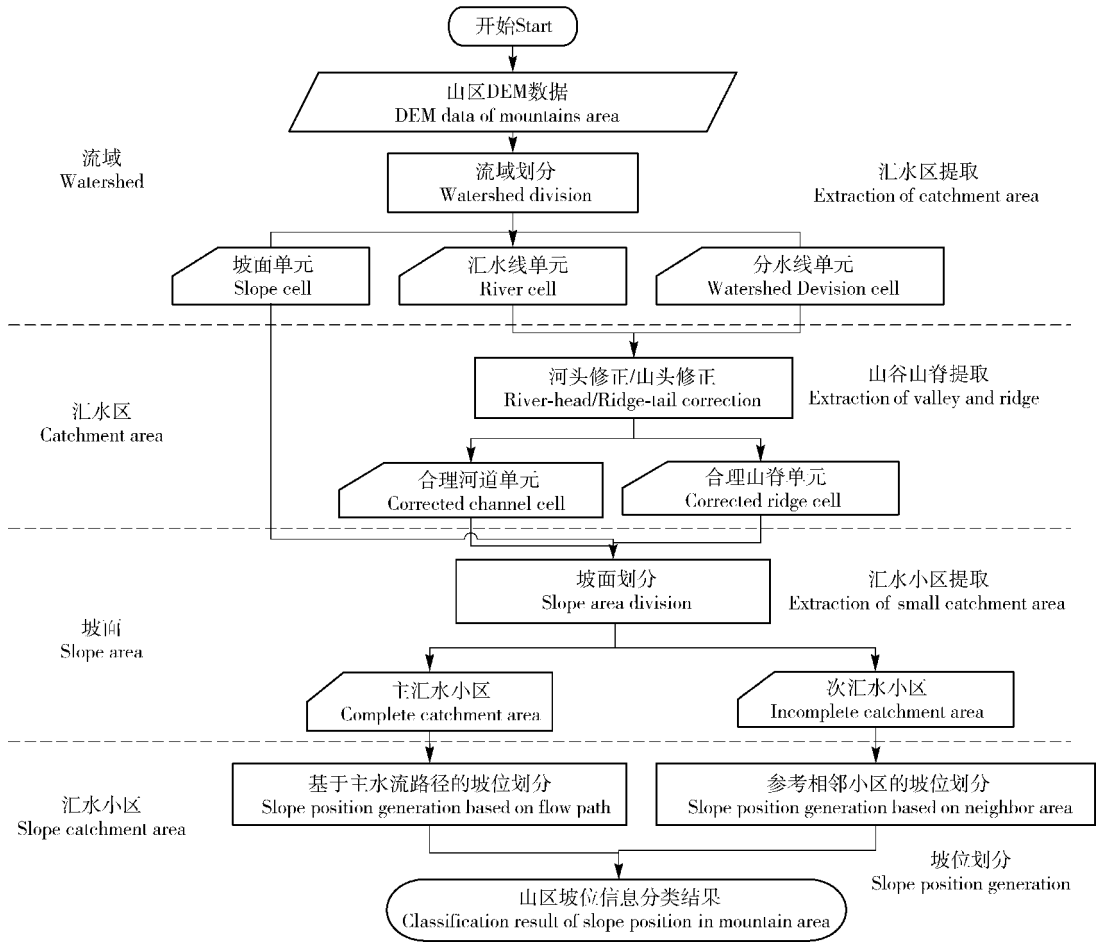


图 1 坡位自动生成方法流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic generation method of slope position

2. 2. 1 流域结构分析与坡面划分

尺度是影响坡位分析的重要因子,由于采用相对位置指数,从而将坡位的尺度问题转化为流域划分及山谷线与山脊线提取的尺度问题,可以根据研究与应用需求选择合适的 DEM 分辨率及河道起始阈值。流域水文分析的实质是流域结构分析,流域层次结构是流域的骨架,为流域—坡面—汇水小区—纵剖面曲线的 4 级空间结构。水文分析预处理把流域内单元归类为汇水线单元、分水线单元、坡面单元 3 种类型。汇水线单元、分水线单元、坡面单元可以组成一个完整的坡面,汇水线单元、分水线单元构成坡面结构的边界,边界中的河道、山脊为相对位置指数的上下位置计算提供了参考对象;水流路径网络构成坡面上的具体内容,其中主水流路径成为了计算相对位置指数的实际对象;小区划分步骤根据河道单元、山脊单元可以将坡面上水流路径网络单元划分成主汇水小区和次汇水小区,进一步依据河道单元和山脊单元搜索出主水流路径作为纵剖面特征曲线。

流域结构分析的详细步骤为:首先进行 DEM

数据的预处理,消除坑洼单元,然后利用 D8 算法等水文分析算法得到水流方向矩阵和水流累积矩阵;利用集水面积阈值确定河道初始单元,依据水流路径实现对流域的分割,形成互相关联的汇水区,并将流域单元分为汇水单元、分水单元和坡面单元。分水单元指不同汇水区之间的边界单元,形成汇水区边界线;汇水单元指汇水区内左右两个坡面交汇的单元,形成汇水区汇水线;坡面单元指分水单元以下汇水单元以上的单元,构成坡面主体。

坡面划分的步骤为:以在流域分割中形成的坡面边界、水流路径网络为基础,沿着河道单元从高到低,流入每个河道的所有坡面单元形成左右两边的水流路径网络,河道单元每一边的所有水流路径网络称为河道单元的汇水小区。汇水小区是坡面划分的基本单元,也是坡位划分的基础。依据汇水小区上游单元是否到达山脊单元,从而把汇水小区分为主汇水小区与次汇水小区。在主汇水小区内部,沿河道单元向上追踪,能到达山脊单元的水流路径称为主水流路径。这样一个坡面可以划分成众多坡面长度不一的汇水小区,依据主水流路径代表的坡面

形态建立坡位划分指标,采用该指标对所在主汇水小区的单元进行坡位划分,并为相邻次汇水小区坡位划分提供依据。

2.2.2 河道与山脊提取技术

河道、山脊提取一般采用地形表面流水物理模拟分析法,通常也称水文分析方法^[14]。应用水文分析方法提取河道,通常需要确定一个合适的上游汇流面积阈值来提取河道。汇流面积阈值的确定有多种方法,本文选用 Tarboton 提出的一种基于常量河道落差规律分析方法^[15],通过 t 分布检验一级河道与所有更高级河道的平均落差,以满足 t 分布 95% 的置信区间的检验值 2 作为判断合理汇流面积阈值的标准,从而决定最后提取河道网络的面积阈值。该方法的优点在于能够提取与地貌统计规律一致的最高分辨率的河道网络。

由于每条沟道形状不同,对于每条末级沟道总是存在沟道的起始点位置与实际地形不匹配的问题。流域平均宽度是指流域面积与流域长度的比值,因此可以作为判断沟谷起始位置的主要指标。通过汇水区两坡面分界线,从山脊到沟口逐单元计算形状指数(形状指数 = 单元汇流面积/汇流长度),当形状指数达到流域宽度时,即可作为汇水区沟谷的起始点位置。

在流域分割中,山脊是汇水区分水线的一部分,采用形态判断法进行分类。山脊线的提取方法以流域分割结果为基础,将分水线根据连接关系分为两类,一类为两端均不与河道连接的汇水区分水线,一般位于末级河道两侧,可以直接作为山脊单元。另一类为一端与河道相连的分水线,需要找出其中山脊部分与山坡部分。山脊部分判断的原则为汇水区分水线与沟谷单元相连,从沟谷单元向上寻找局部最高点作为山脊起始点。如果分水线两端都与沟谷单元相连,则从两端分别搜索判断山脊起始点,山脊起始点之间单元为山脊单元。

2.2.3 基于主水流路径的坡位划分

坡位的划分主要基于相对位置指数来判断,但是直接设定划分参数人为影响大,不够客观。本文在综合考虑相关影响因子,选择坡面纵剖面曲线作为坡位划分的主要依据。汇水小区主水流路径是指沿河道单元向上搜索到达山脊单元所形成的水流路径,该路径既反映坡面距离山谷的矢量长度,又包含坡面的形状特征,所以可以用主水流路径曲线来代表坡面纵剖面曲线,综合分析坡面形状变化制定坡位划分指标。对于具有山脊单元的主汇水小区,依据该汇水小区内主水流路径确定相对位置指数与坡位对应关系,划分小区内单元的坡位信息。对于次

汇水小区,依据邻近主汇水小区相对位置指数与坡位关系,确定小区内各单元的坡位信息。主汇流小区确定高程与坡位对应关系的具体步骤如下:

1) 首先对主水流路径,采用改进的矢量曲线抽样算法即道格拉斯-普克算法,设定距离阈值,得到包含 2 个以上 5 个以下关键点的稀疏线,依据稀疏线分别进行处理。该稀疏线反映坡面曲率变化,其中第一个点为河道点,最后一个点为山脊点。

2) 脊部和沟谷划分。脊部和沟谷的划分综合考虑坡形特征和高程划分,如果稀疏线包含 2 个点,表明坡面近似平面,则直接设定高程范围,例如林业调查中规定为 15 m。如果稀疏线包含 2 个以上的点,需要判断山脊、沟谷点与相邻点的距离与坡度,如果起点与相邻点坡度小于 5°,则两点间高程作为判定是否为山谷的标准;如果终点与相邻点坡度小于 5°,则确定山脊的高程范围;不满足以上条件的直接依据相对位置指数划分脊部与山谷。

3) 上坡、中坡、下坡的划分。判断稀疏线上脊部高程下限与山谷高程上限之间是否有转折点,如果没有,说明坡面近似于平坡,上坡、中坡、下坡的划分直接按照高程差三等分;如果有转折点,说明坡面为曲面,上坡、中坡、下坡的划分就按照坡面曲线长度三等分确定高程范围。坡面矢量曲线长度的算法是逐个跟踪水流路径上的栅格单元计算三维空间长度。

3 坡位自动生成算法实现与分析

选择北京西部山区为试验区,依据本文提出的方法编程实现相关功能,并对数据进行处理,生成山脊与沟谷图、坡位分布图,并对结果进行分析检验。

3.1 试验区概况

北京西部山区是华北典型山地地形地貌,其中山脉多为东北—西南走向。试验区大致范围位于西部山区的门头沟区,地理坐标为 115°25' ~ 116°10' E, 39°48' ~ 40°10' N, 海拔 73 ~ 2 230 m,属于半湿润地区,是典型的暖温带大陆性季风气候,干湿适中,四季分明。

3.2 实现过程与结果

以北京西部山区 1:25 万数字地形图为基础,试验区 DEM 栅格单元分辨率为 100 m(图 2)。采用自主开发的 ViewGIS 平台地形分析模块进行 DEM 分析:首先进行洼地填平处理,然后生成流向栅格和流量累积栅格数据。在 ViewGIS 软件中采用 Visual C++ 语言开发实现坡位划分算法。算法的基本功能包括流域坡面的划分、山脊沟谷线的提取、河道单元汇水小区的划分、基于汇水小区的坡位划分。

坡位的划分首先生成水文合理的 DEM,保证每

个单元具有流出单元,然后设定阈值提取河道网络。汇流面积阈值的确定有多种方法,本文选用 Tarboton 等^[15]提出的一种基于常量河道落差规律分析,通过 t 分布检验一级河道与所有更高级河道的平均落差,以满足 t 分布 95% 的置信区间的检验值 2 作为判断合理汇流面积阈值的标准,从而决定最后的提取河道网络的面积阈值。基于 1: 25 万数据得到北京西部山区合理阈值为 1 400 个单元,相当于 14 km²。依据阈值生成初步的河道网络与分水线,然后确定合理的河道初始位置,生成沟谷单元分布图与山脊单元分布图(图 3)。基于沟谷山脊分布图、水流网络图生成的坡位划分结果如图 4 所示。

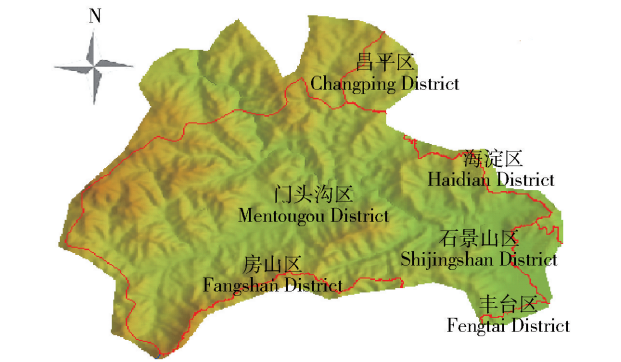


图2 试验区 DEM 晕渲图
Fig. 2 The DEM shading map of study area

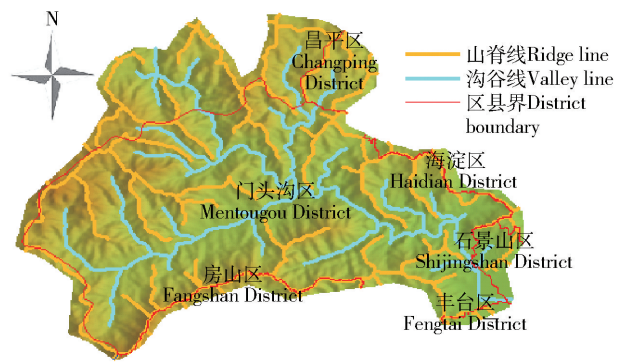


图3 河道与山脊分布图
Fig. 3 Valley and ridge map

由图 3 可知,采用本文提出的方法首先设定合理的阈值,保证沟谷网络符合地貌规律,避免拥挤的沟谷与表达不足的沟谷网络。其次,依据河道形状指数修订的河道初始位置能够更好地符合流域形状特征。最后通过分水线连接关系有效消除分水线的坡面部分,更好地确定山脊单元。

由图 4 可知本文方法生成的坡位分布图既实现了区域划分指标方法的一致性,又反映了地形地貌局部特征,实现了与地貌特征一致的坡位划分。在流域尺度上各个坡位呈连续条带状分布,并且相邻或相对坡面的坡位分带也互相连接。在坡面尺度上

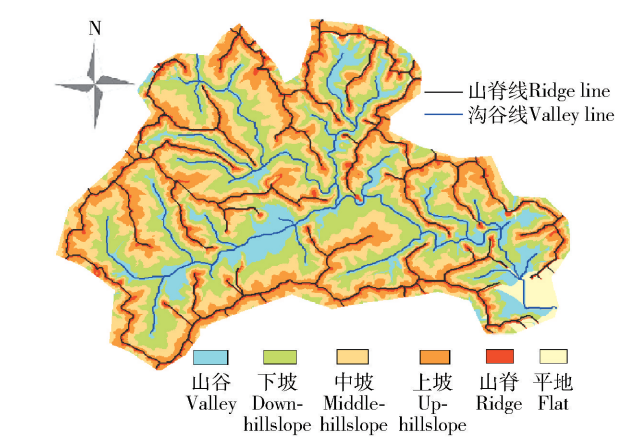


图4 实验区坡位划分结果图
Fig. 4 Slope position map of study area

坡位带随着地形的变化而变化,很好地与坡面地形特征保持一致,山脊区域的边缘与沟谷区域的边缘与坡度分布相符合,坡面分割线与等高线一定程度上符合,反映了地形的坡度、坡向等局部几何特性。

坡位提取结果验证采用研究区所在的门头沟区 398 个一类调查样地的坡位数据,样地公里网格间隔为 2 km,结合 DEM 与遥感数据对其进行了修正。验证结果(表 1)表明:总体正确率高达 87.9%;其中,下坡位判断正确率最高,符合率为 97.3%,山脊判断正确率最小,符合率为 84.6%。分析提取结果发现有如下特点:1)各个坡位错判情形多为相邻坡位误判,没有跨坡位错判的情况。2)山脊与上坡位容易相互错判,下坡位和沟谷之间容易错判。山脊、上坡错判的主要原因在于两坡位之间的过渡带狭小,栅格单元过大人为减缓地形变化导致错判。下坡、沟谷错判的主要原因是过渡地形平缓,地形界限模糊导致沟谷错判为下坡;山地地形峻峭,栅格单元过大导致将下坡错判为沟谷。

4 结论与讨论

本文提出一种基于栅格 DEM 的山区坡位生成方法。该方法是一种结合坡面相对位置指数与坡面形态特征的坡位定量描述方法。本文提出的坡位生成方法相对于传统的坡位划分方法具有以下 3 个方面的优势:1)依据应用需求确定合适的 DEM 分辨率与沟谷提取阈值,并提取与地貌一致的沟谷网络与山脊网络,从而避免尺度误配的问题。2)坡位指数的计算以汇水小区为基础,避免整个汇水区采用统一山脊高程而不能反映山脊位置随坡面动态变化的问题。3)汇水小区内坡位划分依据主水流路径确定,综合考虑汇水小区内坡形特征与位置指数,确定山脊与山谷的划分标准,避免了依据相对位置指数人为设定数值等分坡面的问题。

表 1 坡位提取结果检验

Tab.1 Examination of slope position extraction

分类结果 Classification results	验证 Validation						符合率 Accuracy/%
	总数 Total	山脊 Ridge	上坡 Up-hillslope	中坡 Middle-hillslope	下坡 Down-hillslope	沟谷 Valley	
判为山脊 Divided as ridge	26	22	4				84.6
判为上坡 Divided as up-hillslope	90	8	77	5			85.5
判为中坡 Divided as middle-hillslope	103			88	15		85.4
判为下坡 Divided as down-hillslope	113				110	3	97.3
判为沟谷 Divided as valley	56				8	48	85.7

依据北京西山地形特征对本文提出的方法进行验证,取得了满意的结果。对于不同山地形态,需要探讨本文方法参数调整与完善问题,以提高该方法满足不同坡位划分需求的能力。

参 考 文 献

[1] 韦金丽,王国波,凌子燕. 基于高分辨率 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘与空间地理信息,2012,35(1):33-36.
WEI J L, WANG G B, LING Z Y. The extraction and analysis of landform characters based on high resolution DEM[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2012,35(1):33-36.

[2] 秦承志,卢岩君,邱维理,等. 模糊坡位信息在精细土壤属性空间推测中的应用[J]. 地理研究,2010,29(9):1706-1714.
QIN C Z, LU Y J, QIU W L, et al. Application of fuzzy slope positions in predicting spatial distribution of soil property at finer scale[J]. Geographical Research, 2010, 29 (9): 1706-1714.

[3] 郭澎涛,李茂芬,刘洪斌,等. 丘陵地区田间尺度农地景观坡位划分[J]. 农业工程学报,2011,27(4):324-329.
GUO P T, LI M F, LIU H B, et al. Field scale slope position segmentation at agricultural landscape in hilly area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 324-329.

[4] 汤国安,杨玮莹,杨昕,等. 对 DEM 地形定量因子挖掘中若干问题的探讨[J]. 测绘科学,2003,28(1):28-32.
TANG G A, YANG W Y, YANG X, et al. Some key points in terrain variables deriving from DEM[J]. Science of Surveying and Mapping, 2003, 28(1):28-32.

[5] 王龙柱. 基于 DEM 小班地形因子的计算机自动计算[D]. 成都:西南大学,2007.
WANG L Z. Sub-compartment terrain factors computer automatic calculation based on DEM[D]. Chengdu: Southwest University, 2007.

[6] 秦承志,朱阿兴,李宝林,等. 坡位的分类及其空间分布信息的量化[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(3):374-377.
QIN C Z, ZHU A X, LI B L, et al. Taxonomy of slope positions and quantification of their spatial distribution information [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition), 2009,34(3):374-377.

[7] 秦承志,卢岩君,包黎莉,等. 简化数字地形分析软件 (SimDTA) 及其应用:以嫩江流域鹤山农场区的坡位模糊分类为例[J]. 地球信息科学,2009,11(6):737-743.
QIN C Z, LU Y J, BAO L L, et al. Simple digital terrain analysis software (SimDTA 1.0) and its application in fuzzy classification of slope positions[J]. Journal of Geo-Information Science,2009,11(6):737-743.

[8] 秦承志,朱阿兴,施迅,等. 坡位渐变信息的模糊推理[J]. 地理研究,2007,26(6):1165-1174.
QIN C Z, ZHU A X, SHI X, et al. Fuzzy inference of spatial gradation of slope positions [J]. Geographical Research, 2007, 26 (6): 1165-1174.

[9] SKIDMORE A K. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model [J]. International Journal of Geographical Information Systems,1990,4(1):33-49.

[10] 王姣,刘洪斌. 基于地形分析的土地利用类型分布研究:以达州市通川区为例[J]. 城市建设理论研究(电子版),2014(7):2095-2104.
WANG J, LIU H B. Based on the land use type distribution of terrain analysis research: a case study in Tong Chuan Town, Da Zhou City [J]. Urban Construction Theory Research (The Electronic), 2014(7):2095-2104.

[11] 张汉奎,俞乐. 一种新的坡位定量描述方法及其与滑坡发生的关系[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):609-615.
ZHANG H K, YU L. A new quantitative description method for slope position and its relationship with landslides [J]. Remote Sensing Technology and Application,2012,27(4):609-615.

[12] 国家林业局. 国家森林资源连续清查技术规定[G]. 北京:国家林业局,2004.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. China national forest inventory technical regulations[G]. Beijing: State Forestry Administration of the People's Republic of China, 2004.

[13] 中华人民共和国林业部. 森林资源规划设计调查主要技术规范[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Major technical regulations on planning, design and inventory of forest resources[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996.

[14] 王飞,赵忠,郝红科,等. 基于 GIS 的渭北黄土高原立地类型划分的研究:以永寿县永平乡为例[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):133-140.
WANG F, ZHAO Z, HAO H K, et al. GIS based landsite classification in Weibei loess plateau: a case study in Yongping Town, Yongshou County[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013,41(7):133-140.

[15] TARBOTON D G, AMES D P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data [C] // Proceedings of Environmental and Water Resources 2001. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2001:1-10.

(责任编辑 冯秀兰
责任编委 黄华国)