



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

2013  
09  
VOL.18

ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB



城市交通规划 P1197



第18卷第9期（总第209期）

2013年9月16日

中国精品科技期刊  
中国国际影响力优秀学术期刊  
中国科技核心期刊

## 版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

## Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

**Journal of Image and Graphics**

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS  
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of  
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation  
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

## 综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

1055

简缩极化SAR数据信息提取与应用

张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

1065

## 图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅, 江少波, 刘丕玉, 张松

1074

面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法

高凯, 陈贺新, 赵岩, 耿英楠, 王钢

1085

## 图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类

王科平, 杨艺, 王新良

1093

表情和姿态的双模态情感识别

闫静杰, 郑文明, 辛明海, 邱伟

1101

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪

程旭, 李拟珺, 张索非, 吴镇扬

1107

改进后的TLD视频目标跟踪方法

周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 王从庆

1115

多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割

甘超, 王莹, 王向阳

1124

融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割

崔兆华, 高立群, 欧阳海滨, 李文娜

1133

从运动中恢复目标结构的改进因子分解法

邱少华, 文贡坚, 回丙伟, 张鹏

1142

## 计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理

殷诚信, 韩俊刚, 黄虎才

1149

## 医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补

包佳蕊, 梁荣华, 吴福理, 黄鲜萍, 蒋莉, 陈矛

1156

归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪

李乔亮, 李振宇, 张会生, 张小飞, 陈昕, 陈思平, 汪天富

1164

## 遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合

吴川, 杨冬

1170

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测

南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波

1176

## 地理信息技术

3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算

何国辉, 周聪

1184

地图符号服务与地图服务的耦合

焦东来, 张海涛, 闫国年, 姜杰

1190

不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响

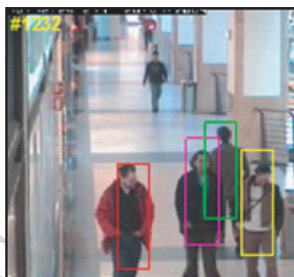
段滢滢, 陆锋

1197

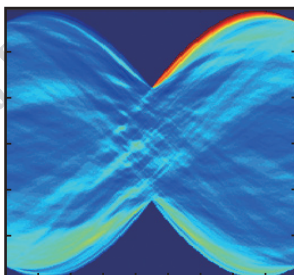
DEM保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

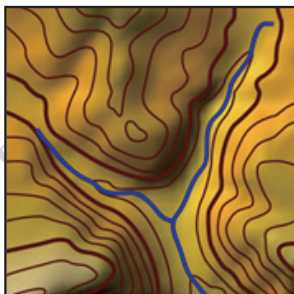
1206



等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



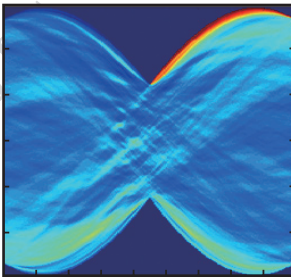
DEM保真精度量化描述模型(第1206页)

# CONTENTS

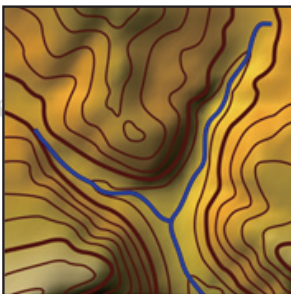
## JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

### Review

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli ..... 1055

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian ..... 1065

### Image Processing and Coding

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song ..... 1074

Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering

Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang ..... 1085

### Image Analysis and Recognition

Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space

Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang ..... 1093

Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression

Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei ..... 1101

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization

Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang ..... 1107

Improved TLD visual target tracking algorithm

Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing ..... 1115

Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation

Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang ..... 1124

Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation

Cui Zhaohua, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna ..... 1133

Improved factorization method for structure from motion

Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng ..... 1142

### Computer Graphics

Efficient state management for parallel rasterization

Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai ..... 1149

### Medical Image Processing

Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull

Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao ..... 1156

Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure

Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu ..... 1164

### Remote Sensing Image Processing

Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm

Wu Chuan, Yang Dong ..... 1170

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo ..... 1176

### Geoinformatics

Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization

He Guohui, Zhou Cong ..... 1184

Coupling of map symbol web service and web map service

Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian, Jiang Jie ..... 1190

The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network

Duan Yingying, Lu Feng ..... 1197

Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong ..... 1206

中图法分类号: TP208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)09-1206-09

论文引用格式: 张锦明, 游雄. DEM 保真精度量化描述模型[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1206-1214. [DOI:10.11834/jig.20130920]

## DEM 保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450052

**摘要:** 等高线回放法是数字高程模型(DEM)精度评估的重要方法之一,可以用于检测地形的保真程度,但是现有定量评估指标属于相对保真精度的范畴,因此基于水系和地形的固有套合特性,提出了水系和地形套合隶属度函数,从两者的套合程度实现 DEM 保真精度的量化描述。首先,根据线状要素位移准则、尺度准则、平均坡度准则、最大套合偏移量准则和目视效果准则,运用模糊数学方法建立水系和地形套合隶属度函数;然后,使用 4 个不同地貌类型实验区域的 1:5 万地形图作为基础源数据,实验分析了 DEM 保真精度的评估。实验结果表明水系和地形套合隶属度函数不仅可以用于 DEM 保真精度的定量评估,而且可以用于 DEM 最佳分辨率的确定以及 DEM 尺度转换适宜范围的确定。

**关键词:** 数字高程模型;等高线回放法;保真精度;隶属度函数;尺度转换

## Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong

Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

**Abstract:** Reconstructing contours through a DEM is one of the methods of the DEM accuracy assessment. It can be used to detect terrain levels of fidelity. However, these methods show all a relative fidelity accuracy. Therefore, we present a membership function of the matching between drainage and terrain in this paper, we use the matching difference between drainage and terrain to quantitatively assess the DEM precision and to detect terrain levels of fidelity. First, we establish the matching offset membership function in accordance with the linear element displacement criterion, the scale criterion, the average slope criterion, the maximum matching offset criterion, and the visual effect criterion. Second, we use a 1:50 000 topographic map data of the four regions as the source data. Then the experiment of quantitative descriptive model of the matching precision explained how to use it in scaling transform of DEM. Finally, the experimental results show that the quantitative descriptive model of the matching precision not only can be used for the quantitative assessment of the extent of DEM terrain fidelity, but also can be used to determine the conversion of DEM scale appropriate range.

**Key words:** digital elevation model; reconstructing contours; fidelity accuracy; membership function; scaling transform

## 0 引言

当前数字高程模型(DEM)精度的研究主要集中在数值精度评估方面,常用方法包括中误差法、传

递函数法、协方差函数法、影像分析法<sup>[1-4]</sup>,以及基于地形描述误差的综合判定方法<sup>[5-6]</sup>。而保真度作为 3 维特征和高程逻辑一致性的标准,经常用于判断 DEM 和实际 3 维空间或原始 3 维数据的吻合程度<sup>[7]</sup>,这恰恰是中误差法、传递函数法、协方差函数

收稿日期:2012-12-17;修回日期:2013-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40971239)

第一作者简介:张锦明(1976—),男,副教授,2012 年于信息工程大学获地图制图学与地理信息工程专业博士学位。现从事综合战场环境仿真与虚拟现实、虚拟地理环境等理论和应用研究。E-mail: mapviewer@163.com

法和影像分析法等难以解决的问题,即无法确定 DEM 对原始地形的保真程度,因此基于“视觉精度”评估的等高线回放法成为 DEM 保真精度评估的主要方法。等高线回放法可以有效剔除局部粗差,较好地保证 DEM 数据的整体质量。但是等高线回放法工作量较大,且多为定性描述,缺乏定量描述指标,导致受人为因素影响较大。

许多学者提出了不同的定量评估指标,以实现等高线回放的定量描述。汤国安等人依据“1:1 万 DEM 数据等高线回放检查时,同名等高线偏移不大于 1/2 等高距”的规定,运用等高线套合差指标定量评估 DEM 精度<sup>[4]</sup>。江帆<sup>[8]</sup>、朱长青等人<sup>[9]</sup>提出用原始等高线和重构等高线的面积差与原始等高线长度之比(定义为“重构误差”),作为 DEM 精度评估指标。王志伟<sup>[10]</sup>在重构误差的基础上提出了等高线的最大重构偏移误差和平均最大重构偏移误差两个指标,利用这两个指标反映局部区域内 DEM 与实际地形的吻合程度。王光霞等人<sup>[11]</sup>同样在重构误差的基础上,增加重要地性线回放偏移误差指标反映原始等高线和重构等高线在地形表达上的差异。上述研究均对等高线回放法的定量评估做出了有益探索。

但是,这些量化指标都没有形成系统的 DEM 保真精度评估标准。如等高线套合差指标规定使用等高线套合积差和超限区个数等更细指标,定量描述 DEM 重构等高线和原始等高线之间的套合程度。但是没有规定超限区个数达到多少,或者等高线套合积差超过多少时,某一区域某一尺度 DEM 的保真精度是合格的或是不合格的;而仅可以比较同一区域、不同尺度 DEM 之间的保真差异,本质上属于相对保真精度的概念。同样,重构误差、回放偏移误差都存在相同的缺陷,即可以评估同一区域、不同尺度 DEM 之间的相对保真精度,但无法确定某一区域某一尺度 DEM 的绝对保真精度是否达到生产和应用的要求,进而无法确定 DEM 尺度转换的适宜范围等关键性问题。

本文根据水系和地形的固有套合特性,以及制图综合规范中的线状要素位移规定,计算两者之间偏移量的中误差值和最大偏移量值,运用模糊数学方法建立水系和地形套合隶属度函数,确定某一尺度 DEM 数据的套合隶属度值,从而用于定量评估 DEM 的保真精度,甚至用于确定 DEM 尺度转换的适宜范围。

## 1 水系和地形套合隶属度函数

### 1.1 水系特征

水系是海洋、湖泊、河流、井等物体的总称,它同自然界和人类社会有着密切的联系。制图综合中,水系是最重要的地性线之一,常被看做地形“骨架”,对其他要素具有一定的制约作用。当水系和其他要素发生重叠必须位移某一要素时,通常将水系作为基准,移动其他要素。

因此水系和地形套合隶属度函数中将水系要素看做基准要素。

### 1.2 地形特征

地形表面高低起伏、凹凸不平,虽然形态各异、千姿百态,但是都可以分解为一系列面、线和点的基本单元,它们决定了地形形态的几何特征和基本走势。其中地形特征线构成了地形特征的基本骨架线<sup>[12]</sup>。DEM 是地形表面特征的离散化表达,利用多流向路径算法可以提取地形特征线等基本信息,包括山脊线和山谷线等。其中山谷线是水流侵蚀对地形塑造的直接结果,是形成水系的先决条件<sup>[13]</sup>,两者存在固有的套合关系。

因此水系和地形套合隶属度函数中将基于 DEM 提取的重构山谷线作为比较要素。

### 1.3 套合隶属度函数建立准则

水系和地形套合隶属度函数用于定量判断水系和地形之间的套合程度,其中水系为基准要素,重构山谷线为比较要素,两者的偏移计算属于线线偏移计算。如果计算重构山谷线和重构等高线的交叉点到相应水系的距离,那么线线偏移计算转化为点线偏移计算。如图 1 所示,其中 A、B、C、D 为重构等高线和重构山谷线的交叉点, A'、B'、C'、D' 分别为 A、B、C、D 到相应水系的垂直距离,显然 AA'、BB'、CC'、DD' 反映了水系和地形套合的偏移程度,运用中误差等统计量便可实现 DEM 保真精度的定量量测。

但是,如果单纯计算水系和重构山谷线的偏移程度,则存在和等高线套合差指标相同的问题,因此依据制图综合规范中的线状要素位移规定,运用模糊数学建立的水系和地形套合隶属度函数作为 DEM 保真精度评估标准,用以评估任意区域、任意尺度 DEM 的保真精度。

水系和地形套合隶属度函数必须遵循以下 5 个基本准则。

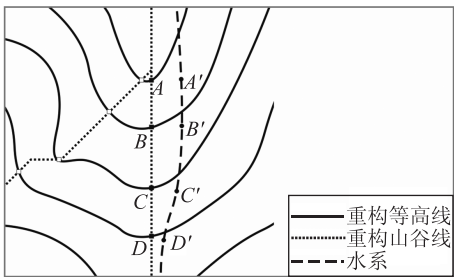


图1 水系和地形特征线偏移图

Fig. 1 Deflection graph between terrain and drainage

1) 线状要素位移准则

制图综合规范明确规定“线状要素的平面位置除按制图综合原则进行的位移外,中误差必须控制在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内”<sup>[14]</sup>。因此,计算水系和重构山谷线的套合偏移量中误差值,当中误差值处于 $0.3\text{ mm}$ 以内时,可以认为套合程度较好(即隶属度值大于 $0.8$ );当中误差值处于 $0.4\text{ mm}$ (人类的最小恰可察觉差为 $0.1\text{ mm}$ )左右时,可以认为套合程度一般(即隶属度值在 $0.5$ 左右);当中误差值大于 $0.4\text{ mm}$ 时,可以认为套合程度较差(即隶属度值小于 $0.5$ )。

2) 尺度准则

建立套合隶属度函数时必须考虑 DEM 尺度因素的影响。国家测绘地理信息局于 1998 年规定了相应比例尺地形图建立的最适宜 DEM 尺度对应关系(表 1)。因此,同样是基于准则 1) 建立的判断标准, $0.4\text{ mm}$  的中误差阈值在不同的 DEM 尺度中代表不同的实地偏移量(表 1)。

表 1 地形图比例尺、DEM 尺度和实地偏移量关系

Table 1 Relationship of map scale, DEM scale and offset

| 地形图比例尺      | DEM 尺度/m | 实地偏移量/m |
|-------------|----------|---------|
| 1:10 000    | 12.5     | 4       |
| 1:50 000    | 25       | 20      |
| 1:100 000   | 50       | 40      |
| 1:250 000   | 100      | 100     |
| 1:1 000 000 | 200      | 400     |

在实际运用过程中,如果简单运用准则 1) 判断水系和地形的套合程度,那么不同尺度 DEM 的实验结果将导致严重的偏差,即随着 DEM 尺度的增大,得到大尺度 DEM 的隶属度值好于小尺度的情况。

从图 2、表 2 可以看出,DEM 尺度为  $12.5\text{ m}$  时,套合偏移量中误差值为  $7.7649\text{ m}$ ,按照表 1 制定的准则, $7.7649\text{ m}$  的偏移量是非常巨大;而当 DEM 尺

度为  $200\text{ m}$  时,套合偏移量中误差值为  $36.9228\text{ m}$ ,此时用于判断它的标准是  $400\text{ m}$ ,无疑是非常精确的套合。但是从目视效果看, $12.5\text{ m}$  DEM 的套合效果(图 2(a))明显优于  $200\text{ m}$  DEM(图 2(e))的情况。这种悖离现象几乎在所有实验区域中普遍存在,因此准则 2) 必须修改。

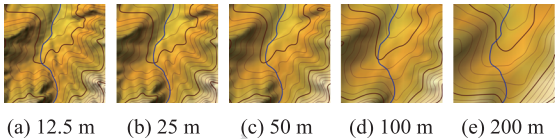


图2 水系和等高线套合图

Fig. 2 Registration graphs between terrain and drainage

表 2 同一实验地区不同尺度 DEM 的套合结果

Table 2 Registration results on same experiment region

|        | /m       |          |          |          |          |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        | 图 2(a)   | 图 2(b)   | 图 2(c)   | 图 2(d)   | 图 2(e)   |
| DEM 尺度 | 12.5     | 25       | 50       | 100      | 200      |
| 最小偏移量  | 0.033 4  | 0.126 4  | 0.496 2  | 0.325 6  | 6.799 2  |
| 最大偏移量  | 18.921 9 | 27.483 0 | 27.332 0 | 38.432 1 | 67.263 5 |
| 偏移中误差  | 7.764 9  | 11.291 5 | 16.254 5 | 20.403 9 | 36.922 8 |

开方根规律法是德国 Topfer 提出的一种地图概括的数量处置方法,用于解决资料地图和新编地图由于比例尺的变换而产生的数量简化问题<sup>[15-16]</sup>。他认为:资料地图与新编地图两种比例尺分母之比的开方根,便可以确定新编地图应选取的地图要素的数量,即

$$\frac{N_{\text{origin}}}{N_{\text{new}}} = \sqrt{\frac{M_{\text{origin}}}{M_{\text{new}}}} \quad (1)$$

式中, $N_{\text{origin}}$  为资料图的地图要素数量, $N_{\text{new}}$  为新编图的地图要素数量, $M_{\text{origin}}$  为资料图比例尺分母, $M_{\text{new}}$  为新编图比例尺分母。

开方根规律法适用于解决地图要素数量的选取问题,研究对象主要是不同比例尺地图中的地图要素个数。假设地图要素均匀分布,则不同比例尺地图要素之间的平均距离同样符合开方根规律法,即

$$\frac{\bar{D}_{\text{origin}}}{\bar{D}_{\text{new}}} = \sqrt{\frac{M_{\text{origin}}}{M_{\text{new}}}} \quad (2)$$

式中, $\bar{D}_{\text{origin}}$  为资料图地图要素之间的平均距离, $\bar{D}_{\text{new}}$  为新编图地图要素之间的平均距离。考虑到新编图和资料图之间的范围差异,还应该在式(2)中增加改正因子  $C$ ,即

$$\frac{\overline{D}_{\text{origin}}}{\overline{D}_{\text{new}}} = \sqrt{C \times \frac{M_{\text{origin}}}{M_{\text{new}}}} \quad (3)$$

如新编图为 1:10 万且资料图为 1:5 万时,则  $C$  取 4。基于开方根规律法,按照式(3)修改表 1,如表 3 所示。

表 3 地形图比例尺、DEM 尺度和实地偏移量关系(按照开方根规律法修改)

Table 3 Relationship of map scale, DEM scale and offset(mvmodified by square root rule)

| 地形图比例尺      | DEM 尺度/m | 实地偏移量/m |
|-------------|----------|---------|
| 1:10 000    | 12.5     | 5.6     |
| 1:50 000    | 25       | 20      |
| 1:100 000   | 50       | 28.3    |
| 1:250 000   | 100      | 35.8    |
| 1:1 000 000 | 200      | 71.6    |

3) 平均坡度准则

建立套合隶属度函数时需要考虑实验区域平均坡度的影响。实验区域平均坡度较小意味着该区域的等高线特征不明显,在等高线特征不明显的区域研究水系和地形的套合程度没有太大的意义,多数情况下可以默认水系和地形套合程度较好。制图综合规范中规定“平原地貌”中可以将“线状要素的位移中误差放宽到  $\pm 0.6 \text{ mm}$  以内”。因此平原地貌的地形图比例尺、DEM 尺度和  $0.4 \text{ mm}$  实地偏移量之间关系如表 4 所示。

表 4 地形图比例尺、DEM 尺度和实地偏移量关系(平原)

Table 4 Relationship of map scale, DEM Scale and offset(plain landform)

| 地形图比例尺      | DEM 尺度/m | 实地偏移量/m |
|-------------|----------|---------|
| 1:10 000    | 12.5     | 11.2    |
| 1:50 000    | 25       | 40      |
| 1:100 000   | 50       | 56.8    |
| 1:250 000   | 100      | 71.6    |
| 1:1 000 000 | 200      | 143.2   |

4) 最大套合偏移量准则

建立套合隶属度函数时需要考虑最大套合偏移量的影响。偏移量中误差是从整体意义上反映水系和地形套合偏移量的离散程度,并没有考虑单个交叉点的影响。假设存在  $N$  个可供计算的交叉点,其中大

多数偏移量较小,而某一交叉点的偏移量较大,则最终计算得到的中误差可能较小。此时将无法反映最大偏移量值对套合精度的影响。因此,应考虑最大偏移量的影响,即其在套合隶属度函数中占据一定的比率(按最大偏移量一般占 20% 的比例确定)。

5) 目视效果准则

建立套合隶属度函数时需要考虑目视观察的效果:(1)同一实验区域不同尺度 DEM 之间,如果目视观察效果类似,则隶属度值不应存在较大差别(图 3);(2)不同实验区域同一尺度 DEM 之间,如果目视观察效果类似,则隶属度值也不应存在较大差别(图 4)。

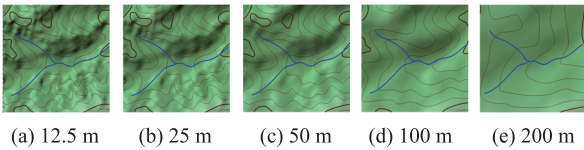


图 3 同一区域水系和等高线套合图

Fig. 3 Registration graphs of same region

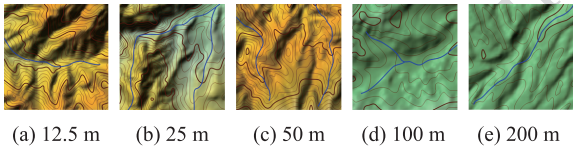


图 4 不同区域水系和等高线套合图

Fig. 4 Registration graphs of different region

1.4 套合隶属度函数

5 条基本准则构成了套合隶属度函数建立的主要依据,其中准则 1)2)必须严格遵守,准则 3)4)5)属于细微调节作用。因此建立的水系和地形套合隶属度函数,由偏移量中误差隶属度函数  $f_{\text{RMSE}}(\Delta D)$  和最大偏移量隶属度函数  $f_{\text{max}}(\Delta D)$  组成。

1) 偏移量中误差隶属度函数

当  $S > 2$  且  $\Delta h > 80$  时(图 5)

$$f_{\text{RMSE}}(\Delta D) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(0.9902 \times (\Delta D - 5.6))} & \text{Size} = 12.5 \text{ m} \\ \frac{1}{1 + \exp(0.2273 \times (\Delta D - 20.0))} & \text{Size} = 25 \text{ m} \\ \frac{1}{1 + \exp(0.1899 \times (\Delta D - 28.3))} & \text{Size} = 50 \text{ m} \\ \frac{1}{1 + \exp(0.1575 \times (\Delta D - 35.8))} & \text{Size} = 100 \text{ m} \\ \frac{1}{1 + \exp(0.0788 \times (\Delta D - 71.6))} & \text{Size} = 200 \text{ m} \end{cases}$$

当  $S \leq 2$  且  $\Delta h \leq 80$  时

$f_{RMSE}(\Delta D) =$

$\frac{1}{1 + \exp(0.9902 \times (\Delta D - 11.2))}$   
 $\frac{1}{1 + \exp(0.2273 \times (\Delta D - 40.0))}$   
 $\frac{1}{1 + \exp(0.1899 \times (\Delta D - 56.6))}$   
 $\frac{1}{1 + \exp(0.1575 \times (\Delta D - 71.6))}$   
 $\frac{1}{1 + \exp(0.0788 \times (\Delta D - 143.2))}$

$Size = 12.5\text{ m}$   
 $Size = 25\text{ m}$   
 $Size = 50\text{ m}$   
 $Size = 100\text{ m}$   
 $Size = 200\text{ m}$

式中,  $S$  为每一实验区域的平均坡度,  $\Delta h$  为每一实验区域的高差,  $\Delta D$  为每一实验区域的偏移量中误差值,  $Size$  为 DEM 网格尺寸。

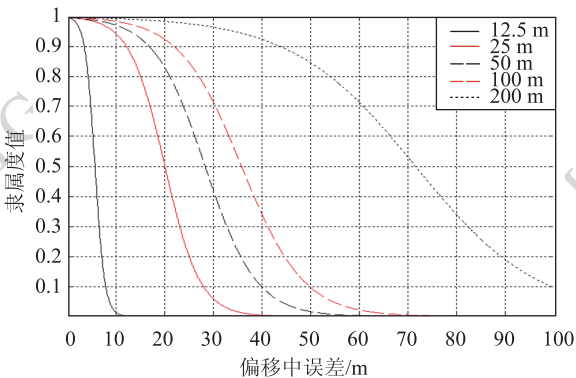


图5 偏移量中误差隶属度函数(非平原地貌)

Fig. 5 Offset error membership function(non-plain landform)

2) 最大偏移量中误差隶属度函数

当  $S > 2$  且  $\Delta h > 80$  时(图6)

$f_{\max}(\Delta D) =$

$zmf(\Delta D, [5.6\ 11.2])$   
 $zmf(\Delta D, [20\ 40])$   
 $zmf(\Delta D, [28.3\ 56.6])$   
 $zmf(\Delta D, [35.8\ 71.6])$   
 $zmf(\Delta D, [71.6\ 143.2])$

$Size = 12.5\text{ m}$   
 $Size = 25\text{ m}$   
 $Size = 50\text{ m}$   
 $Size = 100\text{ m}$   
 $Size = 200\text{ m}$

当  $S \leq 2$  且  $\Delta h \leq 80$  时

$f_{\max}(\Delta D) =$

$zmf(\Delta D, [11.2\ 22.4])$   
 $zmf(\Delta D, [40\ 80])$   
 $zmf(\Delta D, [56.6\ 113.2])$   
 $zmf(\Delta D, [71.6\ 143.2])$   
 $zmf(\Delta D, [143.2\ 286.4])$

$Size = 12.5\text{ m}$   
 $Size = 25\text{ m}$   
 $Size = 50\text{ m}$   
 $Size = 100\text{ m}$   
 $Size = 200\text{ m}$

式中,  $zmf$  为 z 型隶属度函数, 它是一种基于样条插值的函数<sup>[17]</sup>。

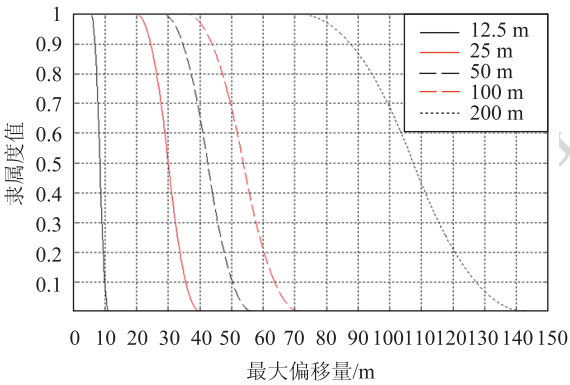


图6 最大偏移量隶属度函数(非平原地貌)

Fig. 6 Maximum offset membership function(non-plain landform)

确定偏移量中误差隶属度函数和最大偏移量中误差隶属度函数之后, 可以根据两个隶属度函数的比例关系确定水系和地形套合隶属度函数, 即

$f(\Delta D) = 0.8 \times f_{RMSE}(\Delta D) + 0.2 \times f_{\max}(\Delta D) \quad (4)$

2 DEM 保真精度评估实验

为了验证利用水系和地形套合隶属度函数定量评估 DEM 保真精度的合理性, 设计了 DEM 保证精度评估实验。

2.1 实验数据来源与特征

选择有代表性的 4 个不同地貌类型(由于平原地貌中等高线特征不明显, 因此实验中没有选择相应的区域)的地区作为试验区域, 实验区域面积均为  $25.6\text{ km} \times 25.6\text{ km}$ , 实验数据来源于 1:5 万地形图数据, 其地形因子如表 5 所示。

表5 实验地区地形描述参数

Table 5 Terrain description parameters of experiment region

|          | 丘陵      | 低山       | 中山       | 高山       |
|----------|---------|----------|----------|----------|
| 所属区域     | 吉林永安    | 福建马甲     | 河南登封     | 甘肃张掖     |
| 最低高程/m   | 259     | 3        | 180      | 2 310    |
| 最高高程/m   | 707     | 797      | 1 512    | 5 024    |
| 平均坡度/(°) | 4.588 6 | 14.837 2 | 13.294 5 | 27.908 3 |

2.2 实验流程

1) 实验数据获取。选取 4 个不同地貌类型区域的  $25.6\text{ km} \times 25.6\text{ km}$  范围内的 1:5 万地形图数据作为基础数据源, 并分别提取相应的高程数据和水系数据, 其中高程数据用于建立各尺度 DEM, 水

系数数据用于保真精度评估的基准要素。

2) 利用三角剖分线性插值算法建立 12.5 m、25 m、50 m、100 m 和 200 m 的系列尺度 DEM 数据。

3) 重构山谷线数据准备。利用 System for Automated Geoscientific Analyses 软件提供的多流向路径算法, 实现 4 个实验区域的汇水面积计算, 并提取相应的重构山谷线数据, 用于保真精度评估的比较要素。

4) 选取实验样区, 计算水系和重构山谷线套合的最小偏移量、最大偏移量和偏移量中误差值。考虑到水系数据并非完整地、均匀地分布于实验区域中, 以及水系数据和重构山谷线数据匹配的难度, 在含有水系数据的部分均匀地、随机地选择不同数目的小实验样区, 用于水系和重构山谷线套合的最小偏移量、最大偏移量和偏移量中误差值的计算, 其中吉林永安选择了 20 个实验样区、河南登封选择了 25 个实验样区、福建马甲选择了 30 个实验样区、甘肃张掖选择了 35 个实验样区。

5) 根据套合隶属度函数计算各实验样区的隶属度值, 并评估相应的保真精度。

6) 分析实验结果, 确定 DEM 尺度转换的适宜范围。

## 2.3 实验分析

### 2.3.1 坡度和套合精度的关系

一般而言, DEM 尺度和地形特征因子的变化关系表现为: 随着 DEM 尺度的增加, 最小高程变大、最大高程变小、平均坡度变小, 整个区域逐渐趋于平坦化, 这种变化规律在地形复杂区域变化较为剧烈, 而在地形平坦区域则相对较为平缓, 因此实验区域平均坡度(选取实验区域 25 m DEM 的平均坡度)的大小将影响套合精度的表现。

当实验样区的平均坡度较小( $<5^\circ$ )时, 难以提取相应的重构山谷线信息, 导致水系和相应重构山谷线正确配对的几率减小, 同时由于实验样区平均坡度较小时, 不同尺度 DEM 描述的地形特征变化平缓, 重构等高线并不产生明显的差异, 因此导致实验得到的套合隶属度值呈现两极变化的趋势, 即某一尺度 DEM 的套合精度较高时, 其他尺度 DEM 的套合精度也将较高(图 7、表 6), 反之亦然(图 8、表 7)。表 6 中, 由于实验样区平均坡度较小( $1.0690^\circ$ ), 基于不同尺度 DEM 重构得到的等高线分布较为类似, 表现在 25 m、50 m、100 m 和 200 m DEM 的套合均达到较高精度; 而 12.5 m DEM 的隶属度值也达到 0.2160, 虽然相比较小, 但在缺少更多高程信息的情况下, 已是不错的

套合结果。表 7 中, 实验样区的平均坡度略有增大( $3.9148^\circ$ ), 但是基于不同 DEM 重构得到的等高线分布, 除了 100 m 和 200 m DEM 之外仍然比较类似, 水系和重构等高线的套合整体上存在较大偏移, 导致不同尺度 DEM 中的套合精度均较差。

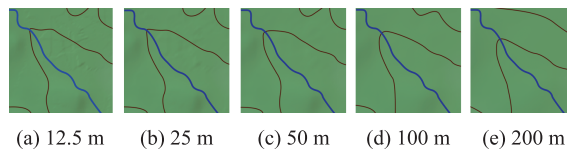


图 7 水系和等高线套合图(实验样区 A)

Fig. 7 Registration graphs(region A)

表 6 同一地区不同尺度 DEM 的套合结果  
(实验样区 A, 平均坡度为  $1.0690^\circ$ )

Table 6 Registration results on same region(region A)

|          | 图 7(a)  | 图 7(b)   | 图 7(c)   | 图 7(d)   | 图 7(e)   |
|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| DEM 尺度/m | 12.5    | 25       | 50       | 100      | 200      |
| 最小偏移量/m  | 5.663 5 | 9.705 5  | 0.080 1  | 0.719 4  | 13.315 6 |
| 最大偏移量/m  | 8.580 9 | 15.418 3 | 26.440 9 | 26.536 3 | 37.700 0 |
| 偏移中误差/m  | 7.270 0 | 12.882 6 | 18.696 6 | 18.770 9 | 28.271 8 |
| 隶属度值     | 0.216 0 | 0.902 4  | 0.888 8  | 0.942 8  | 0.973 4  |

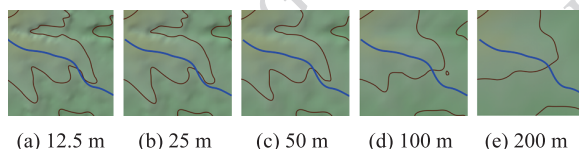


图 8 水系和等高线套合图(实验样区 B)

Fig. 8 Registration graphs(region B, 平均坡度为  $3.9148^\circ$ )

表 7 同一地区不同尺度 DEM 的套合结果(实验样区 B)

Table 7 Registration result on same region(region B)

|          | 图 8(a)   | 图 8(b)   | 图 8(c)   | 图 8(d)   | 图 8(e)    |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| DEM 尺度/m | 12.5     | 25       | 50       | 100      | 200       |
| 最小偏移量/m  | 17.680 8 | 16.967 1 | 12.992 2 | 29.469 6 | 7.735 5   |
| 最大偏移量/m  | 43.029 9 | 49.272 3 | 56.066 4 | 69.192 6 | 263.519 6 |
| 偏移中误差/m  | 35.560 7 | 38.387 7 | 45.870 4 | 47.950 3 | 164.867 9 |
| 隶属度值     | 0.000 0  | 0.004 9  | 0.027 6  | 0.104 7  | 0.000 5   |

当实验样区的平均坡度较大( $>5^{\circ}$ )时,地形特征逐渐复杂,随着尺度的不断增加,基于不同尺度DEM 重构得到的等高线分布特征逐渐发生较大变化。当尺度大于50 m 时,地形特征已经和实际地形存在较大的差别,水系和重构等高线的套合状况也发生了较大变化,甚至可能出现地形表达的逻辑错误,即水系跨越山脊线(图9、表8)、水系跨越山顶和水系跨越鞍部(图10、表9)等现象。对于存在地形表达逻辑错误的实验样区,实验过程中将最大偏移量值定义为9 999.0。当尺度为25 m 和50 m 时,由于地形特征保持相对完整,则具有较高的套合精度(图11、表10)。

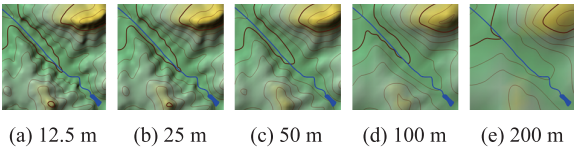


图9 水系和等高线套合图(实验样区 C)

Fig. 9 Registration graphs(region C,平均坡度为 $14.1645^{\circ}$ )

表8 同一地区不同尺度 DEM 套合结果(实验样区 C)

|          | 图9(a)    | 图9(b)    | 图9(c)    | 图9(d)   | 图9(e)   |
|----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| DEM 尺度/m | 12.5     | 25       | 50       | 100     | 200     |
| 最小偏移量/m  | 5.490 8  | 0.701 1  | 2.282 4  | —       | —       |
| 最大偏移量/m  | 24.045 8 | 15.697 9 | 11.274 1 | 9 999   | 9 999   |
| 偏移中误差/m  | 14.236 9 | 7.338 2  | 6.349 3  | 9 999   | 9 999   |
| 隶属度值     | 0.000 2  | 0.976 8  | 0.987 8  | 0.000 0 | 0.000 0 |

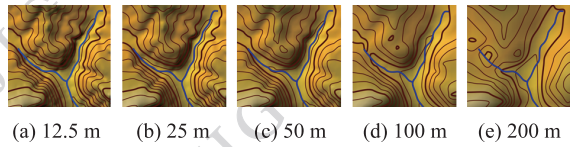


图10 水系和等高线套合图(实验样区 D)

Fig. 10 Registration graphs(region D)

2.3.2 DEM 最佳分辨率的确定

确定 DEM 最佳分辨率是 DEM 尺度研究的关键,存在基于地形参数、基于具体应用和基于等高线特征3种确定 DEM 最佳分辨率的方法<sup>[18-19]</sup>。国家地理空间信息局于1998 年制定了相应比例尺地形图建立最适宜 DEM 分辨率的对应关系(表1)。

DEM 保真精度实验的结果再次验证了这一选择。

表9 同一地区不同尺度 DEM 的套合结果

(实验样区 D,平均坡度为 $18.0914^{\circ}$ )

Table 9 Registration results on same region(region D)

|          | 图10(a)   | 图10(b)   | 图10(c)   | 图10(d)  | 图10(e)  |
|----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| DEM 尺度/m | 12.5     | 25       | 50       | 100     | 200     |
| 最小偏移量/m  | 1.150 1  | 0.316 7  | 0.294 8  | —       | —       |
| 最大偏移量/m  | 25.003 1 | 28.775 3 | 24.830 8 | 9 999   | 9 999   |
| 偏移中误差/m  | 14.609 6 | 16.587 9 | 13.116 9 | 9 999   | 9 999   |
| 隶属度值     | 0.000 1  | 0.699 2  | 0.957 6  | 0.000 0 | 0.000 0 |

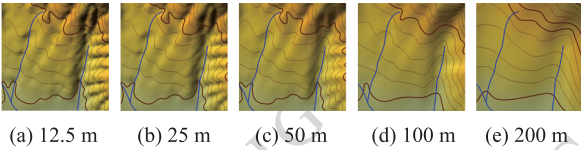


图11 水系和等高线套合图(实验样区 D)

Fig. 11 Registration graphs(region D,平均坡度为 $12.0691^{\circ}$ )

表10 同一地区不同尺度 DEM 的套合结果(实验样区 E)

|          | 图11(a)   | 图11(b)   | 图11(c)   | 图11(d)    | 图11(e)    |
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| DEM 尺度/m | 12.5     | 25       | 50       | 100       | 200       |
| 最小偏移量/m  | 0.414 3  | 0.071 3  | 0.604 1  | 3.178 4   | 19.430 9  |
| 最大偏移量/m  | 20.407 7 | 20.268 6 | 46.924 8 | 147.906 0 | 388.761 7 |
| 偏移中误差/m  | 11.851 8 | 10.068 0 | 21.439 1 | 52.205 8  | 195.217 1 |
| 隶属度值     | 0.001 6  | 0.952 0  | 0.675 8  | 0.056 2   | 0.000 1   |

实验中对110 个实验样区分别计算最小偏移量、最大偏移量和偏移量中误差值,并利用套合隶属度函数计算相应的套合隶属度值,各个实验样区的平均值如表11 所示。实验结果显示25 m 和50 m DEM 计算得到的水系和地形套合精度最高,12.5 m DEM 的套合精度最差,表明基于1:5 万等高线数据建立的多尺度 DEM 数据中,25 m 和50 m DEM 对原始等高线数据中隐含高程信息的再现最精确。另一方面,由于1:5 万等高线数据隐含的高程信息是有限的,如果希望建立更高尺度的 DEM 数据(如

12.5 m), 从套合精度表现来看, 并不能满足要求, 即 1:5 万等高线数据中隐含的高程信息并不能通过不同 DEM 插值算法得到补充, 唯一的方法是增加新的高程信息, 否则任何希望利用插值算法提高 DEM 精度的操作都是徒劳的。

表 11 各实验区域水系和地形套合隶属度值的平均值  
Table 11 Membership value of registration error between terrain and drainage in multiscale DEM

| DEM 尺度/m | 吉林永安    | 河南登封    | 福建马甲    | 甘肃张掖    |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| 12.5     | 0.460 4 | 0.039 3 | 0.255 7 | 0.031 3 |
| 25       | 0.871 8 | 0.730 1 | 0.937 0 | 0.699 0 |
| 50       | 0.760 2 | 0.736 5 | 0.903 1 | 0.742 9 |
| 100      | 0.613 0 | 0.409 3 | 0.457 8 | 0.544 8 |
| 200      | 0.712 2 | 0.386 1 | 0.408 1 | 0.516 4 |

### 2.3.3 DEM 尺度转换适宜范围的确定

通过对每一实验样区进行水系和重构山谷线的套合精度及其隶属度值的计算, 可以了解水系和重构山谷线的套合精度在不同尺度 DEM 数据的表现。如果比较系列尺度 DEM 的套合精度, 便可以大致确定 DEM 尺度转换的适宜范围。

2.3.2 节描述了基于 1:5 万地形图数据可以建立的 DEM 最佳尺度为 25 m, 因此以 25 m DEM 为基准判断尺度转换的适宜范围。

表 11 的实验结果表明, 基于 25 m DEM 进行尺度上推变换时, 上推 1 个等级是完全合理的, 上推 2 个等级则需要斟酌, 因为 100 m 和 200 m DEM 计算得到套合精度中存在地形表达的逻辑错误; 但是基于 25 m DEM 进行尺度下推变换时, 实验结果表明没有任何意义, 即套合精度计算结果极差, 说明 1:5 万等高线数据中隐含的高程信息并不能通过不同 DEM 插值算法得到补充, 唯一的方法是增加新的高程信息。

此外, 吉林永安的各尺度 DEM 数据计算得到的隶属度值整体上优于其他实验区域, 表明地形平均坡度越平坦的区域, 在进行尺度变换时差异越小, 越能够实现 DEM 尺度的“平缓”变换, 甚至可以下推 2~3 个等级。

## 3 结 论

DEM 保真精度评估是 DEM 精度评估的重要内

容之一, 等高线回放法作为常用方法, 在评估标准方面存在一定缺陷。根据水系和地形固有的套合特性, 以制图综合规范中线状要素位移准则为基础, 并考虑其他因素, 建立了水系和地形套合隶属度函数, 使得 DEM 保真精度的评估不再局限于相对精度概念范畴, 实验结果表明建立的水系和地形套合隶属度函数是可行的。

但是, DEM 保真精度研究如果仅仅考虑水系和地形的套合是不够的。第一、水系和地形套合只是控制了垂直方向的 DEM 保真精度, 并不能控制水平方向的 DEM 保真精度 (即原始等高线和重构等高线的偏移); 第二、并不是所有的山谷线存在相对应的水系, 导致局部的水系和地形套合精度并不能控制整个区域的 DEM 保真精度; 第三、由于本文并没有对 DEM 进行填注处理, DEM 中的洼地、平区可能会对水系提取结果产生较大影响。因此, 下一步的主要工作是将“套合隶属度函数”用于原始等高线和重构等高线、重构地性线等线状要素之间的研究, 并实现实验区域整体控制, 以及对 DEM 的优化处理, 如填注等。

### 参考文献 (References)

- [1] Ke Z Y, He J B, Chi T H. Digital Terrain Model[M]. Beijing: Science Press, 1993. [柯正谊, 何建邦, 池天河. 数字地面模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.]
- [2] Hu P, Wu Y L, Hu H. Research on fundamental theory of assessing the accuracy of DEMs[J]. Journal of Geo-Information Science, 2003, 5(3): 64-70. [胡鹏, 吴艳兰, 胡海. 数字高程模型精度评定的基本理论[J]. 地球信息科学, 2003, 5(3): 64-70.]
- [3] Tang X M, Lin Z J, Wu L. DEM Accuracy Evaluation Methods based on Contour and Elevation[J]. Remote Sensing Information, 1999, (3): 7-10. [唐新明, 林宗坚, 吴岚. 基于等高线和高程点建立 DEM 的精度评价方法探讨[J]. 遥感信息, 1999, (3): 7-10.]
- [4] Tang G A, Tao Y, Wang C. Contour matching difference and its application in DEM quality assessment[J]. 2007, (7): 65-67. [汤国安, 陶咏, 王春. 等高线套合差及在 DEM 质量评价中的应用研究[J]. 测绘通报, 2007, (7): 65-67.]
- [5] Tang G A, Gong J Y, Chen Z J, et al. A simulation on the accuracy of DEM terrain representation[J]. Acta Deodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 361-365. [汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365.]
- [6] Wang G X, Zhu C Q, Shi W Z, et al. The further study on the accuracy of DEM terrain representation[J]. Acta Deodaetica et

- Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 168-173. [王光霞, 朱长青, 史文中, 等. 数字高程模型地形描述精度的研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 168-173.]
- [7] Shen H, Jing X X. Analysis on high fidelity of the DEM [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(1): 30-32. [申浩, 荆鑫鑫. DEM 高保真问题探析[J]. 测绘工程, 2011, 20(1): 30-32.]
- [8] Jiang F. Research on DEM surface modeling and DEM accuracy assessment [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006. [江帆. DEM 表面建模与精度评估方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学测绘学院, 2006.]
- [9] Zhu C Q, Wang Z W, Liu H-Y. Accuracy evaluation model of DEM based on reconstructed contours [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(2): 153-156. [朱长青, 王志伟, 刘海斌. 基于重构等高线的 DEM 精度评估模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(2): 153-156.]
- [10] Wang Z W. Research and application of DEM error model based on reconstructed contours [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007, 6. [王志伟. 基于重构等高线的 DEM 误差模型研究及应用[D]. 郑州: 信息工程大学测绘学院, 2007, 6.]
- [11] Wang G X, Bian S L, Zhang Y B. Evaluating DEM accuracy based on reconstructed contours [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2010, 27(1): 9-13. [王光霞, 边淑莉, 张寅宝. 用回放等高线评估 DEM 精度的研究[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(1): 9-13.]
- [12] Li Z L, Zhu Q. Digital Elevation Model [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.]
- [13] Cao Y, Long Y, Lv G N. A digital terrain simulation method considering the structural characteristic of the valleys [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(5): 990-996. [曹阳, 龙毅, 闫国年. 顾及沟谷结构特征的数字地形模拟生成方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(5): 990-996.]
- [14] 1: 250 000 Collaborative Specification and Schema GJB × × × -2003. [S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2003. [1: 25 万协同图规范和图式 GJB × × × -2003. [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2003.]
- [15] Wang J Y. Principle and Method of Cartography [M]. Beijing: Science Press, 2006. [王家耀. 地图学原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [16] Mao C J, Zhu L, Zhou Z A, et al. A New Cartography Course [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007. [毛赞猷, 朱良, 周占鳌, 等. 新编地图学教程[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.]
- [17] Zhang D F. Matlab Fuzzy Inference System Design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. [张德丰. Matlab 模糊系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.]
- [18] Florinsky I V, Kuryakova G A. Determination of grid size for digital terrain modeling in landscape investigations-exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(8): 815-832.
- [19] Sun X L, Zhao Y G, Qin C Z, et al. Effects of DEM resolution on multi-factor linear soil-landscape models and their application in predictive soil mapping [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 972-977. [孙孝林, 赵玉国, 秦承志, 等. DEM 栅格分辨率对多元线性土壤-景观模型及其制图应用的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 972-977.]