

引用格式:赵明伟,金永林,江岭,等.多模型协同下的城郊地区DEM构建方法研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):389-398. [Zhao M W, Jin Y L, Jiang L, et al. Research on DEM construction in suburban areas based on multi-model cooperation[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):389-398.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190573

多模型协同下的城郊地区DEM构建方法研究

赵明伟^{1,2},金永林¹,江岭¹,王春¹,杨灿灿¹,徐燕¹

1. 滁州学院地理信息与旅游学院,滁州 239000;

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

Research on DEM Construction in Suburban Areas based on Multi-model Cooperation

ZHAO Mingwei^{1,2*}, JIN Yonglin¹, JIANG Ling¹, WANG Chun¹, YANG Cancan¹, XU Yan¹

1. College of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Digital Elevation Model(DEM) is the digital expression of terrain surface morphology. As an important basic geographic information data, DEM has an important application in the field of natural and human sciences. Therefore, the construction of DEM data with high form accuracy and elevation accuracy has become a hot issue in related research fields. With the development of human society, the transformation and influence of human activities on the topography are becoming more and more significant, the surface modification taken by human activities makes it diversified and discontinuous. At this time, traditional DEM construction methods cannot meet the accuracy requirements of DEM in these areas. To solve this problem, this paper proposes a multi-model collaborative approach to construct DEM. Firstly, the features of the earth's surface are classified according to their morphological features and semantic information. Then, this research construct DEM according to the design of different features of the earth's surface and the selection of appropriate methods. Finally, the research fuse and stitch the results of DEM to form a regional and complete DEM result. This paper chooses a suburban area of Nanjing as the experimental area and takes a large-scale topographic map as the basic data source to carry out DEM construction experiment. The results show that compared with the traditional DEM construction method, the multi-model collaborative DEM construction method proposed in this paper can effectively guarantee the expression of various types of terrain elements in the experimental area. Especially for the terrain transformed by human activities, such as roads, slopes and other areas, the DEM constructed by this method has a significant advantage in morphological accuracy. At the same time, the height accuracy analysis results based on the verification point method show that the elevation accuracy of DEM constructed by this method is also better than that of traditional DEM constructed method. Especially for some

收稿日期:2019-09-30;修回日期:2019-12-26.

基金项目:国家自然科学基金项目(41701450、41571398);安徽省自然科学基金项目(1808085QD103);资源与环境信息系统国家重点实验室2018年度开放基金项目;安徽省大学生创新训练项目(2019CXXL102)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41701450, 41571398; Program of Provincial Natural Science Foundation of Anhui, No.1808085QD103; Grant from State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System in 2018; Program of Innovation Training for College Students in Anhui, No.2019CXXL102.]

作者简介:赵明伟(1986—),男,山东莱芜人,博士,副教授,主要研究方向为高精度曲面建模与环境生态信息学。

E-mail: zhaomw@reis.ac.cn

areas with regular shape and relatively scarce elevation information, the accuracy advantage of this method is particularly remarkable. This research results prove that the proposed multi-model collaborative DEM construction method is suitable for DEM construction in areas where human activities are transformed or significantly affected. The research of this paper has certain theoretical significance and application value for enriching the method system of DEM construction and analysis, as well as the production of high-precision DEM data in urban areas.

Key words: DEM; topographic map; artificial topography; morphological character; multi-model collaboration; semantic information; morphological accuracy; elevation accuracy

***Corresponding author:** ZHAO Mingwei, E-mail: zhaomw@lreis.ac.cn

摘要:人类活动对地表的改造使其呈现形态多样化、不连续等特征,此时传统的DEM构建方法难以满足这些区域DEM精度要求。为此,本文提出了一种多模型协同构建DEM的思路,首先按照形态特征和语义信息对地形进行分类,然后对不同类型的地形区域,选择、设计适宜的方法分别进行DEM构建,最后将不同区域构建DEM结果融合拼接形成区域完整的DEM结果。本文选择江苏省南京市城市郊区某区域为实验区,以1:500比例尺地形图为基本数据源进行DEM构建实验。实验结果表明,与传统经典DEM构建方法相比,本文提出的多模型协同的DEM构建方法能够有效表达实验区域不同的地形特征,特别是对于人工改造的地形(如道路、边坡等区域),本文方法构建的DEM其形态精度优势显著;同时,基于验证点法的高程精度分析结果表明,本文方法构建DEM的高程精度亦优于传统DEM构建方法,特别是对于一些形态规则而高程信息相对稀少的区域,以边坡区域为例,经典DEM构建法平均误差均超过5 m,而本文构建结果平均误差为0.26 m,精度优势非常明显。研究表明本文提出的多模型协同的DEM构建方法适用于人类活动改造或显著影响的区域的DEM构建。

关键词:DEM;地形图;人工地形,形态特征;多模型协同;语义信息;形态精度;高程精度

1 引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是最重要的国家地理信息基础数据之一,DEM描述了地表形态的时空分布,作为地学分析和过程模拟的基础数据,已广泛应用于全球变化、环境保护、自然灾害等科学领域^[1-3]。高精度DEM的快速获取和生产也成为测绘、地学及其相关研究领域的核心命题之一,而随着数据采集技术与平台的快速发展,对DEM的形态精度、信息承载等方面提出了更高的要求。

随着观测技术的快速发展,当前DEM生产、构建的数据来源呈多样化发展。①地基模式:如全球导航卫星系统静态或动态测量、全站仪测量等;利用地面三维激光扫描仪快速获取海量点云数据^[4];②船载模式:船载模式主要用来测量高分辨率的海底地形技术,例如近年来逐步发展的借助无人船、水下载人潜航器等水深测量系统,结合水下声学定位技术开展高精度水下地形测量^[5-6];③机载模式:如通过航空摄影测量^[7]、机载激光LIDAR^[8]、机载InSAR^[9]以及无人机^[10]等方法,获取立体像对、三维点云数据等高程信息进行DEM生产。④星载模式:主要包括卫星遥感立体影像^[11]、星载雷达测高^[12]。

而在DEM构建方法层面,基于不同的可用数据、面向不同的应用目标,众多学者也展开了丰富的研究。近年来代表性的成果如岳天祥等^[13-16],提出的以微分几何曲面论为基础的高精度曲面建模方法该方法特别适合连续变化的自然地形;陈传法等^[17-18]构建的多面函数法,适用于高程信息含有粗差的情况下的DEM建模;赵明伟等^[19]将高精度曲面建模方法与坡降算法结合,提出了一种适用于流水侵蚀地形的DEM建模算法,Hutchinson等^[20-21]以薄板样条法为基础,辅以矢量化河网数据提出了水文关系正确的DEM建模算法(ANUDEM);在特征线嵌入方面,王春等^[22]提出了特征嵌入式DEM、以及Grid和TIN混合结构DEM^[23]等,很好地保证了地表的局部形态特征。

自从人类诞生的那天起,人类活动就在不断的改造世界,对地形地貌也是如此。特别是随着城镇化的快速发展,人类活动对地表形态的改造愈来愈明显:一方面人类修筑了许多地形要素覆盖在原始地表上,例如运动场、居民地等;另一方面,人类对原始自然地表进行改造,使其满足生产需求,例如在山坡上修建梯田等。这些过程极大的改变了地表形态,传统的DEM构建方式已经难以适应这些区域的高精度DEM构建需求。

许多学者已经逐渐认知到人工地形的形态特殊性,并针对不同地形提出了适应的DEM构建方法。例如,有学者针对梯田^[24]、平原人工地形^[25]、平原河网^[26]等特殊地形的DEM构建开展研究。这表明相关领域的学者已经认识到了这些地形在构建DEM中的独立性,并实验区别于连续地形的DEM方法。遗憾的是上述研究多是将特殊地形从地形场中剥离出来进行DEM构建,目前还没有研究总结这些特殊地形的共性特征,并对整个研究区域进行一体化建模。

为进一步提高DEM精度,特别是保证形态与现实世界的吻合度。本文基于分析地形要素形态特征及语义特征的基础上,提出了一种多模型协同的DEM构建方法,该方法首先从不同地表地形的形态特征的角度将地表抽象成不同的地表类型,然后根据不同地表类型的形态特征及可获取数据情况选择构建合适的建模方法并进行分类建模,最后将不同地形类型的DEM构建结果镶嵌成为一个整体。

2 实验区概况、数据源与研究方法

2.1 实验区概况及数据源

本研究选取了位于江苏省南京市郊区面积为1 km²的区域开展建模实验,区域内部人工改造地表与自然地表交错分布,分布着道路、沟渠、河道、河堤以及微丘等多种类型的地形。区域平均海拔在3~26 m之间,其中南部分布着一些低丘地形,北部则以平原为主。本研究从当地测绘部门依据国家标准生产的1:500比例尺地形图中采集等高线、

高程点等高程信息,陡坎线,陡崖线等地形特征线信息,以及道路、水系、边坡等不同地形边界信息,研究区域和数据能够满足本研究的需要。

2.2 人工条状地形建模方法

人工条状地形是指人工改造或修筑、形态呈长条状的地形。该地形的特点是经过人工修筑或改造,其形态比较规则,例如道路、边坡、田埂等。该类地形存在两条延伸的边界线,有些地形的侧边线高程可以认为一致,例如大部分道路的两条侧边线一般是高程变化一致;也存在地形侧边线具有明显高程差的人工地形,例如边坡的上下边界线一般存在明显的高程差。

该类地形建模过程可用图1描述:① 数据准备,主要包括地形的边界信息(可称之为侧边线)和高程信息源(包括高程点和等高线)(图1(a));② 设定一个阈值,分别将侧边线两侧阈值范围之内的高程点映射到侧边线上(图1(b));③ 按照指定的步长对侧边线进行加密,并用侧边线上映射的高程值计算加密点的高程值(图1(c)),本研究采用分段样条函数插值计算;④ 从任一条侧边线开始,向另一侧的侧边线发射生成点序列,其中所生成的点的高程根据两条侧边线上点的高程值计算(图1(d));⑤ 基于生成的点集合,采用空间插值技术获得地形要素对应的格网DEM。需要指出的是,该步骤只是描述了该类地形DEM构建的主要过程,也基本适用于本研究处理的实验区域的条状地形的DEM构建。若要在地形复杂区域,还需要考虑更多特殊问题,比如转弯、上下侧边线不平行等等。作为

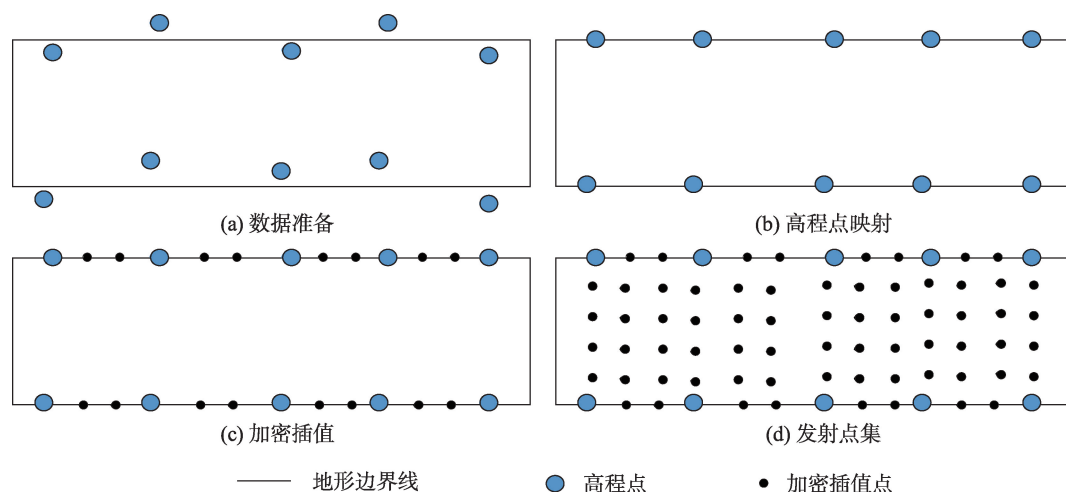


图1 人工条状地形DEM构建示意

Fig. 1 DEM construction process of artificial strip terrain

一种方法的尝试,本文选择的研究区域相对简单,可以按照上述步骤完成DEM构建,至于上述复杂情况下遇到的问题将在后续工作中开展研究。

2.3 高精度曲面建模方法

高精度曲面建模方法(HASM)是近年发展起来的一种基于微分几何理论的曲面建模方法,为解决曲面建模的误差问题和多尺度问题提出了新的解决思路^[27-28]。岳天祥等^[29]针对HASM方法在DEM构建中的应用开展了丰富的研究,结果表明相比于经典插值方法,HASM方法在DEM插值中具有明显的精度优势。

HASM方法以微分几何曲面论为数据基础,该理论认为一个空间曲面完全由其第一类基本量和第二类基本量决定^[30],其中曲面第一类基本量、第二类基本量需满足如下的高斯方程:

$$\begin{cases} f_{xx} = \Gamma_{11}^1 f_x + \Gamma_{12}^1 f_y + \frac{L}{\sqrt{E+G-1}} \\ f_{yy} = \Gamma_{22}^1 f_x + \Gamma_{22}^2 f_y + \frac{N}{\sqrt{E+G-1}} \\ f_{xy} = \Gamma_{12}^1 f_x + \Gamma_{12}^2 f_y + \frac{M}{\sqrt{E+G-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 、 G 为曲面第一类基本量; L 、 M 、 N 为曲面第二类基本量; Γ_{11}^1 , Γ_{11}^2 , Γ_{22}^1 , Γ_{22}^2 , Γ_{12}^1 , Γ_{12}^2 称为曲面的第二类克里斯托弗尔变量。曲面第一类基本量、第二类基本量以及第二类克里斯托弗尔变量的计算公式可参见参考文献[31]。

HASM以上述高斯方程为基础,首先将空间曲面离散格网化,根据空间格网上的初始值采用一定的差分格式计算高斯方程组中的一阶、二阶导数,以及第一类、第二类曲面基本量和克式符号等曲面参数;然后在模型中加入空间实测点信息作为精度控制条件,基于最小二乘理论构建一个大型线性方程组,通过逐步迭代求解,使得模拟曲面不断接近真实曲面,最终达到最优。

2.4 语义建模

在本研究中,语义建模体现在2个方面:

(1)根据地形要素的语义直接对其建模,例如,若地形要素名称属性为体育场,一般而言体育场内部是水平的,不应该有明显起伏,因此其内部高程点高程差应该是观测误差所致,可以计算其内部高程点的平均高程作为该对象的高程。

(2)根据地形要素的语义信息结合其相邻地形确定其高程值。例如,某地形要素的名称属性为田

间沟渠,一般而言,田间沟渠的高程要小于其两侧地块的较小高程值。因此,对于该要素,尽管该地形面积较小可能没有高程点,但是可以根据其语义信息进行高程建模,即首先通过空间关联确定其两侧地形,并读取其高程;然后,取高程较小值,最后,将获取的较小高程值减去某一常数(本研究统一取0.5 m)作为田间沟渠的高程值,因为沟渠一般是要低于其边上地块的高程值。

2.5 地表陡坎线的强化表达

人类活动对地形的改变产生了大量的突变地形,如河流水库的堤坝、道路陡坎、人工梯田,等等。这些突变地形一般是存在一条特征线,其两侧的地表高程或形态可能存在明显差异性。传统的DEM构建方法不能清晰的表达这类特征线,造成这类区域的DEM构建结果存在较严重的形态失真问题。王春等^[22]提出了F-DEM的概念,改善了DEM的数据结构,能够较好表达这种突变地形,但是技术相对复杂导致尚未广泛应用。本文设计了一种面向规则格网DEM构建的地形特征线融合方法,该方法主要思想是在已有高程数据信息的基础上,通过分析突变区域两侧高程的变化特点在突变区域的边界位置添加虚拟高程点,并根据特征线两侧的高程变化特点给虚拟高程点赋值,从而避免在插值构建DEM时特征线两侧的高程点相互影响,达到清晰表达地形特征线的目标,图2展示了一个应用实例。

3 建模结果与分析

3.1 研究区内地形分类

与自然地表不同的是,经人类活动影响、改造的地表不再呈现出较强的连续性,而是存在一些明显的分界线,如道路、河堤等,且部分地形的形状极为规则,内部高程变化也呈现出较明显的趋势,例如建筑面、农田等。由于研究区域内地形之间特征表现出的巨大差异,单一的DEM构建方法必然无法适应于要素特征的表达。

基于此,本文首先依据地形要素的边界,如道路的边界线、河道的岸线等,将各类地形从原始数据中提取出来。然后基于所提供的原始数据中各地形要素的属性代码,对具有明确定义的要素,如道路、建筑面等,进行归类处理;对于沟渠和微丘等未有明确代码的地形,根据等高线、陡坎线等特征线分布状况,并结合地形内部高程数据与邻域高程

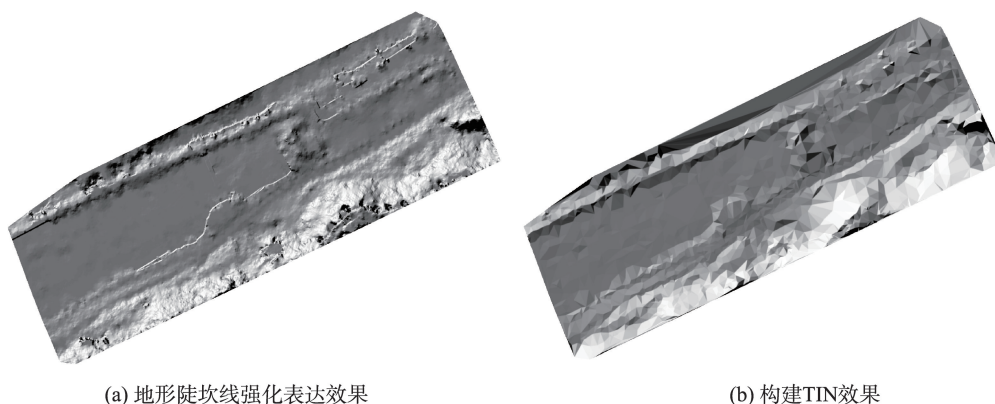


图2 地形陡坎线的强化表达效果对照

Fig. 2 Enhanced expression of terrain scarp line

信息的对比情况,确定其归属要素类型。最终,将要素归并为道路、建筑面、平直面、边坡、河道、微丘、沟渠以及其他8种地形类型,并得到区域内地形要素分类结果(图3)。

3.2 研究区域DEM构建

在研究区域地表分类的基础上,按照2.2—2.4节所述的方法,对不同地表类型分类DEM建模,其中道路与边坡区域采用上文叙述的条状地形建模方法,建筑物基底及平直面采用语义建模方法,微丘采用高精度曲面建模方法,其他区域采用普通构建TIN结

合陡坎线强化表达方法进行建模,各个区域构建DEM的分辨率设置为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 。最后将不同部分结果镶嵌成为一个整体,各种类型建模结果及镶嵌结果如图4所示。从图4中可以看出,每一类地表的DEM构建结果都有其自身的特点,如道路高程的均匀、连续变化符合现实世界中道路的起伏特征,河流边坡的高程变化也符合坡面的基本形态等。而将各种类型地表对应的DEM镶嵌成一个整体后,道路、河流沟渠、建筑区等地形的边界亦能清晰地体现出来,表明构建结果很好地反映了真实的地表形态特征。

3.3 建模效果分析

为比较分析本文研究方法构建DEM在地表形态表达方面的特点,选择几种对照方法构建DEM,分别是间接构建方法、反距离加权插值法以及样条插值法,其中间接构建法是先基于提供的地形数据构建TIN,然后将TIN转为规则格网DEM,反距离加权插值和样条插值则是基于区域的高程点数据(等高线也离散成高程点)进行插值得到DEM,对照方法均基于ArcGIS 10.2软件实现。

基于DEM生成的山体阴影图能够直观的表现DEM对应的地表形态特征,图5展示了本文方法构建的DEM以及各个对照方法构建DEM生成的山体阴影图。从图5中看出,对于间接法构建的DEM,由于在构建TIN时有道路边线、河流堤坝边线等地形特征线的约束,所构建的结果基本能够将道路、河流等与其他地形区分开,但是其形态效果较差;而对于2种空间插值法构建的DEM,由于缺乏相关地形边界线的约束,构建的结果基本反映不出道路、河堤等地形。总体来看,上述3种方法构建



图3 南京市郊实验区地形分类结果

Fig. 3 Terrain classification of the study area in Nanjing suburbs

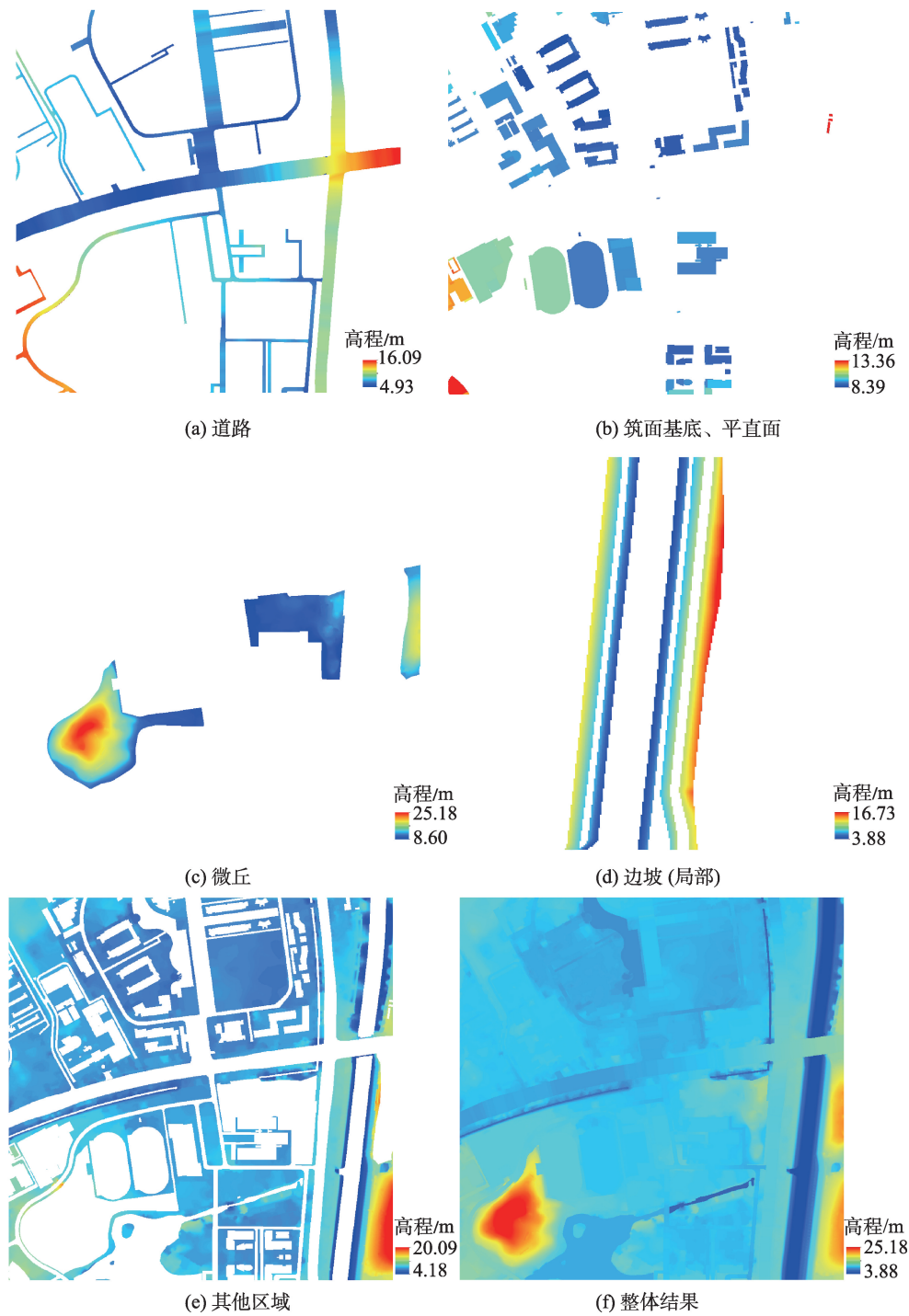


图4 南京市郊实验区不同地形DEM构建结果

Fig. 4 DEMs of different terrain areas in Nanjing suburbs

的DEM仅仅在微丘地区构建效果较好。而对于本研究方法构建的DEM,能够较好地反映各种地形要素的形态特征,尤其是人工改造地表,例如道路、边坡、建筑面以及平直面等类型地形,模型展现了道路在横向上坡度变化较小,纵向上随地形波动起伏以及水面的语义平稳性,陡坎和沟渠的突变性以及边坡和低山的渐变性,保留平直面以及建模面的

语义平直性等,与实际地表形态保持一致。

地表的形态特征也可以通过坡度反映,图6展示了本研究方法及对照方法所构建DEM对应的坡度图,能够看出与对照方法相比,本文研究方法构建DEM生成的坡度图的一个显著特点是不同地形之间存在明显的坡度较大值,地形内部坡度变化则较小,对于边坡等具有坡面结构的地形,坡度值的分布

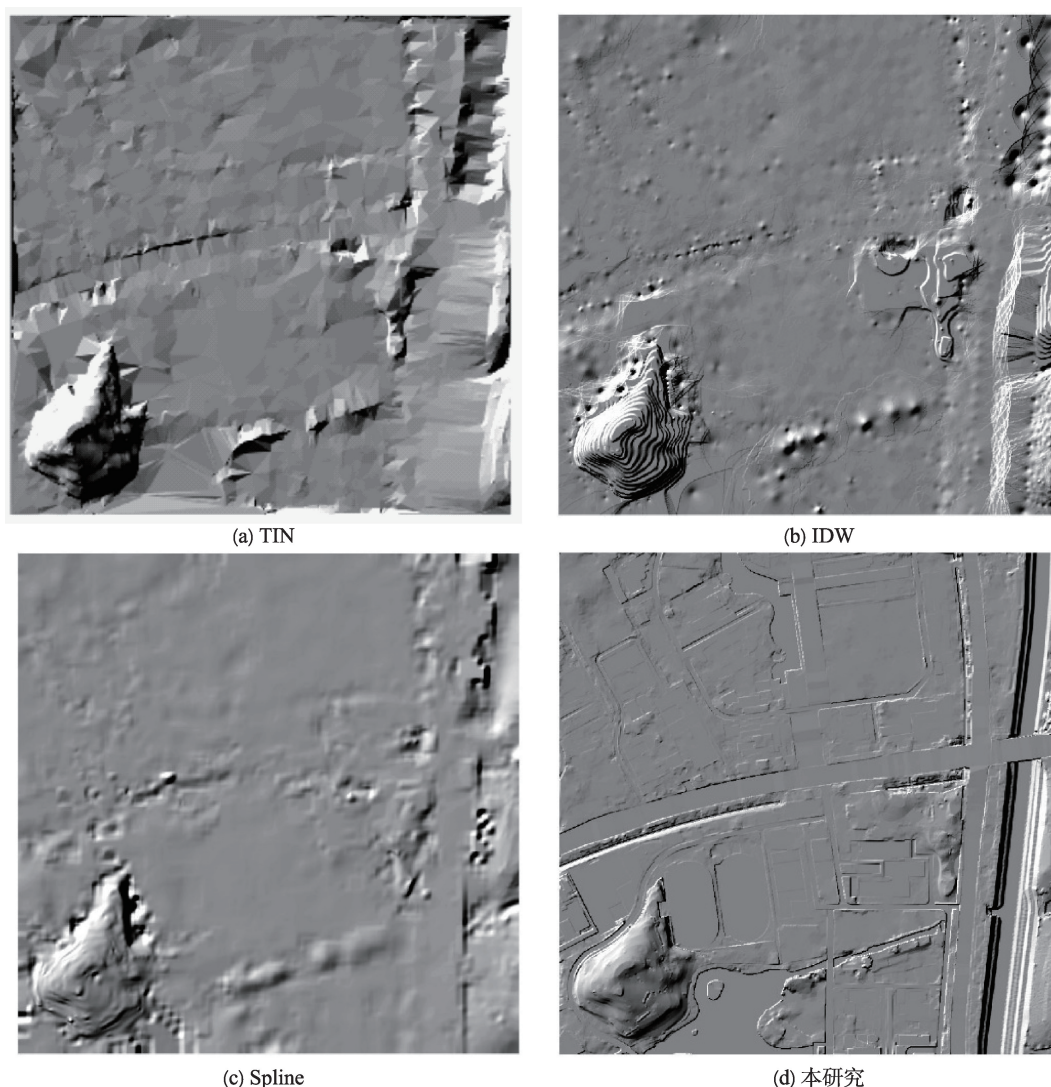


图5 不同方法构建DEM对应的山体阴影

Fig. 5 Hillshade maps of DEM from different methods

良好地体现出其高程的渐变特性,而沟渠以及河道等与邻接地形高差稍大的地形,坡度的变化可以完整显示出其轮廓,从而能有效区分不同地形类型。对于IDW方法和样条方法,从坡度中仅能够区别出研究区域的微丘,而其他部分由于高程差较小不能有效区分,间接法构建DEM引入了一些地形特征线,因此部分地形边界能够体现出来,但由于高程差较小的原因,绝大部分地形边界也不能有效区分。

以上分析主要从形态的角度分析了本文研究方法相比于传统构建方法的特点,除形态特征外,DEM构建结构的高程精度一直是DEM精度评价的重要方面,因此本部分对不同构建DEM结果的高程误差进行统计,选择的指标是误差均值与均方根误差。平均误差(Mean Error)反映了DEM数据高程值与验证点数据高程值误差(本研究的验证点来源于实

验区1:500比例尺地形图数据)的平均值,可反映误差分布情况。标准差(Standard Deviation)则反映一个数据集的离散程度。2个指标的计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |O(x,y) - S(x,y)|, (x,y) \in R^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O(x,y) - S(x,y))^2}{n-1}}, (x,y) \in R^2 \quad (3)$$

式中:MAE表示平均误差, RMSE表示标准差; $O(x,y)$ 代表验证点上的观测高程值; $S(x,y)$ 代表验证点处通过不同方法生成的DEM上的高程值, (x,y) 代表点的位置坐标; R^2 是实数域,这里指研究区域。

从表1中能够看出,对于实验区的所有地表类型,本文提出的DEM构建方法的高程精度都优于对照方法,其中最为显著的是边坡区域,由于在该类区域高程点相对稀少,因此常规建模方法造成较

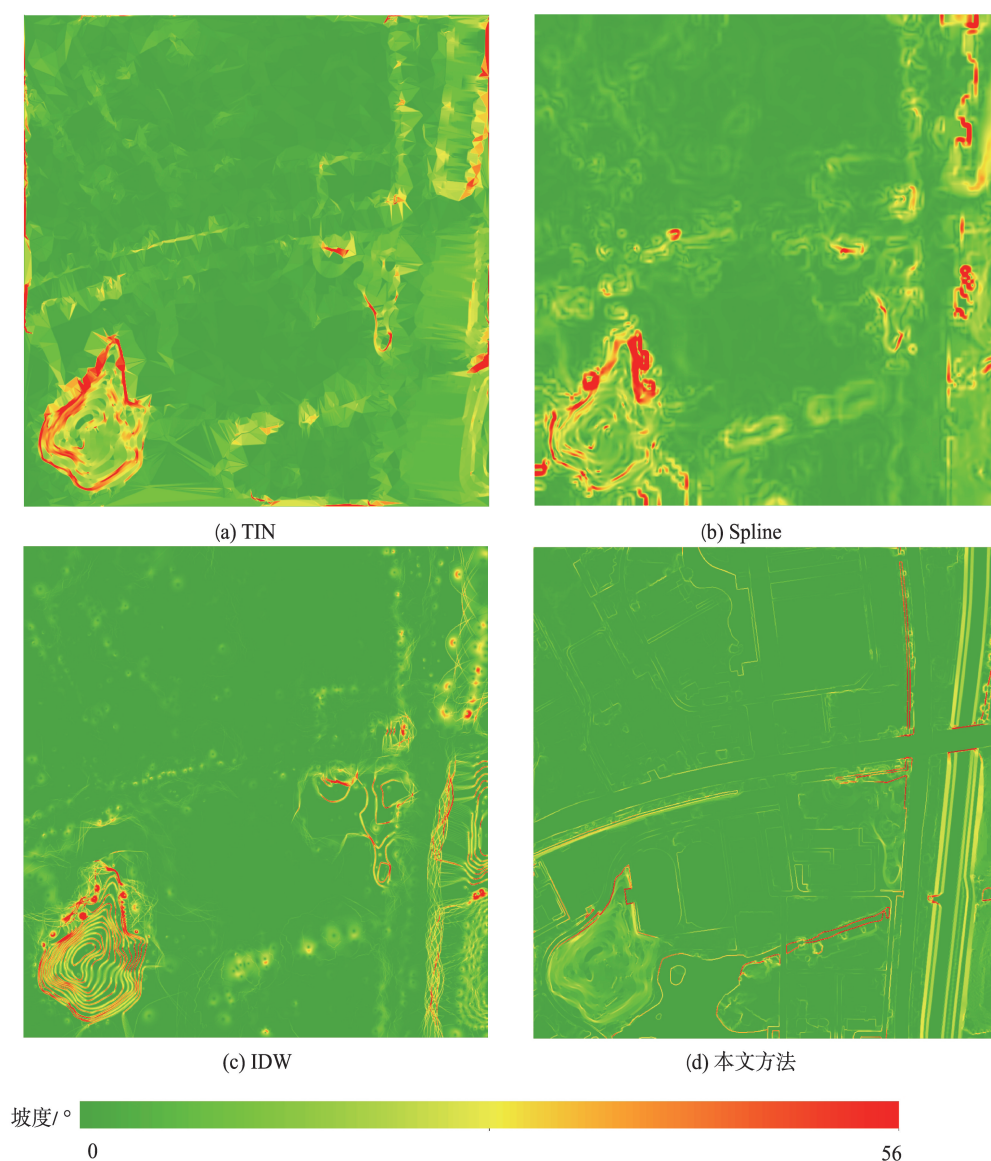


图6 不同方法构建DEM对应的坡度

Fig. 6 Slope maps of DEM from different methods

大误差,平均误差都超过了5 m,而本文所设计的边坡区域DEM构建方法由于充分考虑了边坡的形态特点,因此能够用较少的高程点得到较好的建模结果,平均误差仅为0.26 m。在其他类型区域,本文针对地形特征线设计的DEM构建方法也明显改善了DEM结果的精度。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文针对人类活动改造区域DEM构建方法展开研究,得到的主要结论如下:

(1)人类活动显著改变了地表形态,造就了许多人工地形,如道路、边坡、农田等,进而形成了突变地形与渐变地形交错共存的新型地貌景观,而传统的DEM构建方法侧重地表形态的连续表达,已经不适用于这些区域DEM构建;

(2)本文针对不同地形的形态特征,选择、设计相应的DEM构建方法,形成了地形分类—独立建模—镶嵌融合的DEM建模思路,保证了不同地形的形态特点和精度最优,也便于这一思路能够适应不同区域、地貌类型下的DEM构建;

(3)选择南京市城郊某区域为实验区,与传统DEM建模方法对比研究,从山体阴影图和坡度图

表1 实验区域高程误差统计

Tab. 1 Elevation error statistics of research area (m)

类别	IDW	Spline	TIN	本文方法
微丘	误差均值	0.29	0.29	0.22
	均方根误差	0.31	0.44	0.15
边坡	误差均值	6.19	5.42	5.81
	均方根误差	1.98	1.12	1.06
道路	误差均值	0.18	0.30	0.16
	均方根误差	0.43	0.53	0.28
平直面	误差均值	0.13	0.25	0.06
	均方根误差	0.10	0.10	0.07
建筑面	误差均值	0.22	0.36	0.13
	均方根误差	0.20	0.07	0.08
其他	误差均值	0.29	0.26	0.27
	均方根误差	0.40	0.26	0.55

中都较好体现了本方法在形态特征方面的优势,在
高程精度方面,其平均值误差均控制在0.30 m之
内,其中平直面、建筑面以及其他区域平均值误差
低于0.10 m,都低于传统构建方法;特别是在边坡
区域,传统方法平均误差均超过5 m,而本文方法平
均误差值为0.26 m,表明本文提出的DEM构建思
路是切实可行的。

4.2 讨论

需要说明的是,作为一种新的DEM构建理念的
初步尝试,本研究还存在若干需要继续深入研究
的地方,主要包括:

(1) 本研究采用的实验数据是大比例尺地形图
数据,可以方便地对地形类型进行划分归类,便于
分类建模,但是数据成本较大,不利于大范围DEM
构建;

(2) 本文选择的区域较为简单,事实上现实世
界有许多复杂的地表类型,例如在山区因道路、水
库等修建的堤坝,其形态特征相对自然地表有一定
规律性但又较城市及郊区的河堤等坡面更为复杂,
此时现有的技术方法难以实现高质量的构建效果;

(3) 由于格网DEM数据结构的限制,在不同地
形类型区域的构建结果拼接中边界线会出现一定
的偏差。

针对上述问题,后续的研究包括以下几点:①充
分利用地理大数据的优势,基于多源多尺度影像数
据实现地形划分,然后再以多源高程信息构建DEM,
从而推广本文研究的应用广度;②充分考虑地表的
复杂特征,并针对性设计出适宜的建模方法;③考

虑引入矢栅一体化或者高保真DEM等技术,进一
步提高地形边界处的形态精度。

参考文献(Refereces):

- [1] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006. [Zhou Q M, Liu X J. Digital terrain analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [2] 李志林,朱庆,谢潇.数字高程模型(第三版)[M].北京:科学出版社,2018. [Li Z L, Zhu Q, Xie X. Digital elevation model (3rd edition)[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
- [3] 汤国安,李发源,杨昕,等.黄土高原数字地形分析探索与实践[M].北京:科学出版社,2015. [Tang G A, Li F Y, Yang X, et al. Exploration and practice of digital terrain analysis on loess plateau[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [4] Chevalier M L, Pan J, Li H, et al. First tectonic-geomorphology study along the longmu-Gozha co fault system, Western Tibet[J]. Gondwana Research, 2015,41:411-424.
- [5] Gutierrez F J, Gutowski M, Ganther S, et al. Deep rippled bedforms in Loch Ness: Evidence from an AUV bathymetry survey[C]. 2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). IEEE, 2014,34:1-3.
- [6] Hiller T, Steingrimsson A, Melvin R. Expanding the small AUV mission envelope; longer, deeper & more accurate [C]. Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2012 IEEE/OES. IEEE, 2012,23:1-4.
- [7] 张剑清,潘励,王树根.摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2009. [Zhang J Q, Pan L, Wang S G. Digital photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.]
- [8] 宁津生,刘经南,李德仁,等.测绘学概论[M].武汉:武汉大学出版社,2016. [Ning J S, Liu J N, Li D R, et al. Introduction to geomatics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2016.]
- [9] 楼良盛,刘思伟,周瑜.机载InSAR系统精度分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(1):63-67. [Lou L S, Liu S W, Zhou Y. Accuracy analysis of airborne InSAR system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012,37(1):63-67.]
- [10] Diaz-Varela R A, Zarco-Tejada P J, Angileri V, et al. Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 134:117-126.
- [11] 李德仁,王密,沈欣,等.从对地观测卫星到对地观测脑[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(2):143-149. [Li D R, Wang M, Shen X, et al. From earth observation satellite to earth observation brain[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(2):143-149.]
- [12] 唐新明,李国元.激光测高卫星的发展与展望[J].国际太

- 空,2017(11):13-18. [Tang X M, Li G Y. Development and prospect of laser altimetry satellite[J]. Space International, 2017(11):13-18.]
- [13] Yue T X. Surface modelling: High accuracy and high speed methods[M]. New York: CRC Press, 2011.
- [14] Yue T X, Du Z P, Song D J, et al. A new method of surface modeling and its application to DEM construction [J]. Geomorphology, 2007,91(1-2):161-172.
- [15] Yue T X, Song D J, Du Z P, et al. High-accuracy surface modelling and its application to DEM generation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010,31(8):2205-2226.
- [16] Yue T X, Chen C F, Li B L. An adaptive method of high accuracy surface modeling and its application to simulating elevation surfaces[J]. Transactions in GIS, 2010,14(5): 615-630.
- [17] 陈传法,李伟,李明飞,等.DEM构建的多面函数加权抗差算法[J].地球信息科学学报,2013,15(6):840-845. [Chen C F, Li W, Li M F, et al. A robust multiquadratic method and its application to DEM construction[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013,15(6):840-845.]
- [18] 陈传法,刘凤英,闫长青,等.DEM建模的多面函数Huber抗差算法[J].武汉大学学报.信息科学版,2016,41(6):803-809. [Chen C F, Liu F Y, Yan C Q, et al. A huber-derived robust multi-quadric interpolation method for DEM construction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016,41(6):803-809.]
- [19] Jiang L Zhao M W, Yue T X, et al. A modified HASM algorithm and its application in DEM construction[J]. Earth Science Informatics, 2018,11(3):423-431.
- [20] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology, 1989,106(3):211-232.
- [21] 杨勤科,师维娟,Mcvicar T R,等.水文地貌关系正确DEM的建立方法[J].中国水土保持科学,2007,5(4):1-6,21. [Yang Q K, Shi W J, Mcvicar T R, et al. On constructing methods of hydrologically correct DEMs[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(4):1-6,21.]
- [22] 王春,汤国安,刘学军,等.特征嵌入式数字高程模型研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(10):1149-1154. [Wang C, Tang G A, Liu X J, et al. The model of terrain features preserved in grid DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(10):1149-1154.]
- [23] Yang B, Shi W, Li Q. An integrated TIN and grid method for constructing multi-resolution digital terrain models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2005,19(10):1019-1038.
- [24] 赵卫东,周弯,汤国安,等.基于GRID-TIN混合格网DEM的旱作梯田数值模拟模型研究[J].地理与地理信息科学,2015,31(3):38-43. [Zhao W D, Zhou W, Tang G A, et al. Study on GRID-TIN hybrid DEM-based numerical simulation model of terraced dryland[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015,31(3):38-43.]
- [25] 肖飞,杜耘,Parrot J F,等.基于DEM的平原区人工微地貌数字提取方法探讨[J].地理科学,2011,29(6):647-653. [Xiao F, Du Y, Parrot J F, et al. Investigation on artificial microrelief digital extraction method based on DEM[J]. Geographical Science, 2011,29(6):647-653.]
- [26] 寇程,柯长青.地形平坦地区DEM生成算法的比较研究[J].测绘与空间地理信息,2013,36(7):33-37. [Cheng K, Chang-Qing K. Comparative studies of the algorithm for establishing DEM in flat area[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013,36(7):33-37.]
- [27] 岳天祥,杜正平,刘纪远.高精度曲面建模与误差分析[J].自然科学进展,2004,14(2):83-89. [Yue T X, Du Z P, Liu J Y. High accuracy surface modeling and the error analysis[J]. Progress in Natural Science, 2004,14(2):83-89.]
- [28] 岳天祥,杜正平.高精度曲面建模:新一代GIS与CAD的核心模块[J].自然科学进展,2005,15(3):73-82. [Yue T X, Du Z P. High accuracy surface modeling: The core module of the new GIS and CAD[J]. Progress in Natural Science, 2005,15(3):73-82.]
- [29] 宋敦江,岳天祥,杜正平.一种由等高线构建DEM的新方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(4):472-476. [Song D J, Yue T X, Du Z P. A new method of DEM generation from contour line[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012,37(4):472-476.]
- [30] Henderson D W. Differential geometry[M]. London: Prentice-Hall, 1998.
- [31] Zhao N, Yue T X, Zhao M W, et al. Sensitivity studies of a high accuracy surface modeling method[J]. Science China Earth Sciences, 2014,57(10):2386-2396.