

引用格式: 杨灿灿, 江岭, 陈昕, 等. 面向城市DEM构建的地形要素分类及表达[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 317-325. [Yang C C, Jiang L, Chen X, et al. 2017. Classification and expression of urban topographic features for DEM construction. Journal of Geo-information Science, 19(3): 317-325.] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00317

面向城市DEM构建的地形要素分类及表达

杨灿灿¹, 江岭^{1*}, 陈昕², 王春¹, 赵明伟¹

1. 滁州学院安徽地理信息集成应用协同创新中心, 滁州 239000; 2. 南京市测绘勘察研究院有限公司, 南京 210019

Classification and Expression of Urban Topographic Features for DEM Construction

YANG Cancan¹, JIANG Ling^{1*}, CHEN Xin², WANG Chun¹ and ZHAO Mingwei¹

1. Anhui Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Integration and Application, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;
2. Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Co. Ltd, Nanjing 210019, China

Abstract: Topographic features are defined as point, polyline and polygon elements which control surface topography of the earth. Its reasonable classification can provide the data foundation for the simulation of urban topography. There are already many industrial standards for topographic map classification. However, the existed feature classification and coding methods are mainly focused on surveying, mapping, editing, updating, and data storage of topographic map. These methods cannot be used for urban DEM construction directly. After parsing the characteristics of urban terrain and analyzing the deficiencies of classification method in urban terrain modeling based on large scale topographic map, a classification and expression method of urban topographic features is put forward in this paper. According to the principle of urban space is divided by road and land parcel, the topographic features of urban terrain are classified and expressed with mathematical equations based on object-oriented thought by taking the 1:500 topographic maps as fundamental data. To test and verify the effectiveness and feasibility of the classification and expression method, this paper made a registration between classification results and remote sensing images, constructed the DEM and extracted the slope. Meanwhile, this paper performed a comprehensive evaluation for classification results from geometric and semantic perspectives. Also, it analyzed modeling effects at global and local scale, respectively. The experiment results showed that the classification results can be well matched with remote sensing images, the proposed classification and expression method of topographic features can express the geometric and semantic information of complex urban terrain effectively at both global and local scale. The classification and expression method of topographic features for urban DEM construction can not only provide basis for analysis and application of terrain factors, but also provide technical support for the application of topographic features, such as urban terrain modeling, construction planning and decision-making.

Key words: topographic features; urban terrain; semantic information; classification and expression; DEM

*Corresponding author: JIANG Ling, E-mail: jiangling_xs@163.com

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501445); 安徽省自然科学基金项目(1608085QD77); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2015B13、KJ2015A261); 滁州学院科研基金项目(2014KJ02)。

作者简介: 杨灿灿(1988-), 安徽宿州, 硕士, 助教, 主要从事DEM数字地形分析及其不确定性研究。E-mail: jancy2012@126.com

*通讯作者: 江岭(1987-), 安徽六安人, 博士, 讲师, 研究方向为数字地形建模及高性能地学计算。

E-mail: jiangling_xs@163.com

摘要:地形要素是对地形在地表的空间分布特征具有控制作用的点、线或面状要素,其合理划分可为城市地形建模提供数据基础。本文在解析城市地形特征和分析现有地形图分类在城市DEM建模中不足的基础上,基于面向对象思想,以城市地形被城市道路网分割为基本原则,构建了城市地形要素分类及表达方法,并以南京市某区1:500地形图为实验数据,进行了相关验证实验与分析。实验结果表明,本文提出的地形要素分类和表达方法能够整体控制并有效表达集几何和语义信息为一体的复杂城市地形,在全局和局部地形上均有较好的建模效果。本文提出的城市地形要素分类及表达方法不但可为地形要素的分析和应用提供基础,也可城市地形构建模拟、建设规划和分析决策等提供技术支撑。

关键词:地形要素;城市地形;语义信息;分类与表达;DEM

1 引言

地形要素是表征地表形态特征的点、线或面状要素,构成了地貌形态及其空间格局的基本框架,对地貌类型识别、划分及分析具有重要意义,是地形建模的数据基础^[1-2]。城市作为人类生活的载体,其地形具有人工与自然结合、突变与渐变交错的特征,这些特征集中体现在地形几何与语义信息共生,甚至某些地形区域语义信息占主体,如篮球场、建筑基底面不仅表达了其几何形状还蕴含其地形具有“平”的语义特征以及与周围地物的关系特征,城市道路隐藏其延伸方向在合理坡度下随地势起伏等语义含义。这些城市地形语义信息既包含本体语义信息,又具有与其他对象的关系语义信息。城市地表形态的复杂程度对其地形建模研究提出了更高的要求。众多研究表明,任何复杂地形都由简单面片组合而成,而区域异质地形亦可分割为多种局地同质地形,这些单一面片或局地同质地形均是由点、线或面状要素构成,具有“对象特征”^[3-4]。对于城市地形而言,这种对象特征尤为显著,如道路、边坡、运动场等。因此,如果采用面向对象的思想进行复杂城市DEM建模,其构建成功与否的关键和本质在于地形要素的获取,而地形要素获取的关键在于地形要素分类及表达。

地形要素的来源主要通过地形图数据、摄影测量与遥感影像数据以及地面测量等,采集内容一般为高程与平面位置数据^[2]。传统DEM建模主要利用这些高程数据内插完成,具有一定的局限性^[1,4-8],特别是针对城市地形,不能有效表达以几何与语义共生为主体的城市地形特征。既有学者通过地形图数据进行城市DEM构建^[9-12],也有学者对顾及特征地形要素的DEM数据模型进行了研究^[4,13-15]。上述研究取得了重要的研究成果,对地形要素的分类及表达具有一定借鉴的意义。然而,这些研究主要集中在自然渐变地形、梯田地形、河网地形以及城市个别人工构筑物对象上,且重点研究特征地形作

为建模时的约束条件,未能针对城市地形提出直接适合其DEM构建的地形要素分类方法。针对城市地形的几何信息与语义信息共生的特征,如何对城市地形要素进行提取和应用,如何构建合适的城市DEM建模方法并确保其精细和保真度,如何利用城市DEM进行城市灾害及水文模拟等将是研究的重点,而面向DEM建模的城市地形要素分类和表达则是实现上述研究的基础。目前,城市地形测图已基本形成业内规范,但其地形要素分类与编码主要是针对地形图的测绘、识读、更新及入库等方面,无法直接适用于城市地形建模的需求^[16-18]。鉴于此,本文基于大比例尺地形图,以地形图及基础地理信息分类标准为参考,以城市地形建模为目标,提出适合于城市DEM构建的地形要素分类和表达方法,为复杂城区地形建模提供基础。

2 地形要素分类及表达方法

2.1 分类思想

城市DEM是实现城市三维可视化表达、分析、规划的基础。城市DEM通过有限的采样数据数字化表达地表形态,其构建核心是城市地表几何信息及语义信息的获取和表达。城市地形要素的分类及表达则是有效提取与利用上述双重信息的基础。综合考虑城市地形具有平直地形与起伏地形共存、自然地形与人工地形交融、突变地形与渐变地形交错的特点,结合面向对象理论,本文从几何与语义双重视角出发,提出城市地形被道路骨架网分割,并由城市道路和城市地块2大模块组成的分类思想。其中,城市道路被定义为次干路及以上等级的城市道路(依据《城市道路工程设计规范》^[19]),城市地块是由城市道路围合而成的斑块区域,其他地形要素对象均包含在这2大模块内,分类概念如图1所示。

2.2 大比例尺地形图分类标准

地形图作为城市地形的基础数据,蕴涵丰富的

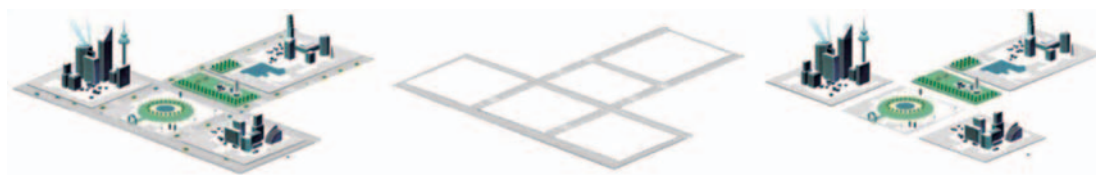


图1 城市地形分割示意图

Fig. 1 Sketch map of urban terrain partitioning

地形属性与地形特征信息,《GB 14804-1993 1:500, 1:1000, 1:2000地形图要素分类与代码》国家标准中规定了大比例尺地形图要素共分为测量控制点、居民地和垣栅、工矿建筑物及其他设施、交通及附属设施、管线及附属设施、水系及附属设施、境界、地貌和土质、植被9类,并依次细分为小类,一级和二级,用以标识该比例尺范围地形图要素数字信息,为各种空间地形图要素信息的采集、存储、检索、分析、输出及交换等提供基础^[16]。由于各地区特点不同,可根据自身实际在本标准规定的分类体系上进行增补和扩延,为地形图的测绘、识读和应用奠定基础。

上述分类标准的分类结果虽然全面且细致,然而却不适合直接用于城市DEM构建,具体表现在:

(1)类别信息冗余。地形图数据要素分类涵盖了所有城市地形要素,各类别的细分信息齐全;而城市地形模型主要关心地形要素的形态特征,具体是哪一个地理实体并不重要(如水系是细分为自然河流还是人工河流,是湖泊还是池塘等)同时也不表达植被覆盖以及管线等非地形信息。

(2)地形要素纷杂。对具有相同形态特征的地形要素,DEM对其所表达的结果是相同的,即DEM对其所反映出的形态特征具有一致性。然而,在地形图要素分类标准中,属于同一种形态的地形要素被划分到了不同的类别中。例如,加固的斜坡属于土质地貌类别,斜坡式防波堤属于水系及附属设施类别,而在地形建模中只被表达为斜坡。面向地形建模时,这些具有相同形态特征的地形要素要归属到同一类别中。

(3)高程点隶属不明。地形图中的高程点隶属于测量控制点,从其属性信息中可知其是否为高程点,但是其是否为地面点,为哪种地形要素的高程点却不可从属性信息中读取,只能人工解译,不利于局部DEM的建立。

(4)语义信息缺乏。地形图数据依据实际地形测量获取,着重考虑地形数据的几何信息,没有考

虑先验人为认知及其蕴含的特征,缺乏语义信息。从语义认知角度来看,广场、球场等蕴含着“平”的信息,边坡表达着“斜”的特征,并且都具有与邻近地物的关系语义,地形图数据缺乏这些区域地形上的空间特征描述和概括。

因此,本文根据城市地形特点,遵循城市地形是由城市道路及其围合而成的地块构成的思想,在地形图分类标准的基础上,提出了面向城市DEM构建的地形要素分类及表达方法。

2.3 城市地形要素分类方法

依据DEM高程表达的单值性原则,城市地形要素在本文指城市范围内、带有地形信息的、非镂空地物抽象形成的地形要素总称。根据2.1节的分类思想,以DEM建模为目的,城市地形要素分为城市道路和城市地块2大模块,并在本底基础要素和专题要素的类别下分为不同的“对象”,每个对象根据几何、语义信息及建模方式的不同进行细化。对于城市道路而言,不同的城市道路类型具有高程异值性与空间异位性,分为机动车道、非机动车道、人行道以及围合型隔离带4种对象,机动车道根据横切面的几何形态分为单向坡面型和双向坡面型。城市地块则以大比例尺地形图的分类为基础,依据地形要素表达的形态一致性以及城市地块要素的完整覆盖性、准确性、区域异质性为原则,分为建筑物基底、水域、小区道路、边坡、平直场区、铁路、其他硬化区7类对象。各对象要素又根据建模的几何及语义信息不同进行细分,具体分类情况如表1所示。

为了便于数据存储、管理和利用,本文采用7位编码方式对每个类别进行编码,各地物要素编码见表1。主编码有3位,第1位为一类的编码,即属于城市道路还是城市地块,后2位代表2大模块下的地形要素类别即二类编码;次编码由两位数字构成表示在基础要素和专题要素下的各对象类别,而附类编码则表示3类对象的进一步细分。编码方式如下:

表1 城市地形要素分类情况
Tab. 1 Classification results of urban topographic features

一类	二类	三类	四类	编码	备 注
城市道路	基础要素	道路高程点		1010100	城市道路边界范围内的高程点
		道路边界		1010200	城市道路的最外沿边界
	专题要素	机动车道	单向坡面型	1020101	指横断面成单向倾斜状的车道
			双向坡面型	1020102	指从由中央向两边倾斜的车道
		非机动车道		1020200	
		人行道		1020300	
		围合型隔离带		1020400	指道路面上隔离性和装饰性地表非镂空围合型花坛或绿化带
城市地块	基础要素	地块高程点		2010100	
		等高线		2010200	
		陡坎线		2010300	包括自然的和人工修整的陡坎
		地块边界		2010400	指城市地块的外边界
	专题要素	建筑物基底		2020100	包括一般房屋、简易房屋以及有平直基底的人工建筑物等
		水域	独立型水域	2020201	指在地块内完整封闭的水域,如湖泊、池塘、露天泳池等
			连通型水域	2020202	指具有流动连通性的水域如河流、沟渠等
		小区道路	主干道	2020301	指小区块内经过人工修整的主要道路
			人行道	2020302	
		边坡	规则边坡	2020401	包括自然坡面、及路堤、阶梯、地下车口入口等人工边坡
			不规则边坡	2020402	
		铁路		2020500	非镂空铁路
		平直场区		2020600	包括广场、球场、以及停车场或公园内相对平直的区域
		其他硬化区	主体硬化区	2020701	指地块内未被分类的其他非平直硬化区域
			围合型构筑物	2020702	区域内人工构筑物,如花坛等

注:本分类表中的各类别均是独立对象,若存在包含关系,则是指剔除了被包含对象后的范围

主编码(3位)	+	次编码(2位)	+	附编码(2位)
XXX	+	XXX	+	XXX
包括城市道路、城市地块两大类(1位),以及此两类下的地形要素类别(2位),不足位数的用“0”补齐		在主编码的基础上,对基础要素和专题要素进行分类的码,不足位数的用“0”补齐		各地形要素对象进行几何和语义的附加细分类,无细分类时用“0”补齐

值得一提的是,上述城市地形要素分类方法充分顾及了城市地形的骨架特征,但鉴于科学研究是一个由简到繁、逐步完善的过程,本文提出的分类方法未考虑以下城市地形要素:① 建筑物。本文统一将建筑物抽象为镂空地物,这与实际存在一定的出入;② 小型独立构筑物。如混凝土立柱、实体围墙等,由于这些小型独立地物具有较小的长度或宽度,格网DEM难以对其进行有效表达;③ 阶梯。本文将阶梯归为边坡一类,即DEM对其表达时仅能反映出其整体形态特征;④ 下水井。由于下水井面积较小,考虑到DEM表达的有效性,本文未对其进行归类;⑤ 地下人工改造地形。如地下室、地下管

道等。因此,在应用本文提出的城市地形要素分类方法时,需注意以上地形要素。

2.4 城市地形要素的表达

在上述分类基础上,需对城市地形要素进行其空间位置、几何以及语义信息的表达,才能为地形建模提供支撑。归结起来,地形要素中的各类别对象可以抽象并概括为具有上述信息的点、线、面3种形态要素,并可进行基于数学语言的抽象描述。

本文的点状要素主要是指各地形要素类别包含的普通高程点及地貌特征点,如道路面上高程点、边坡面内高程点等。每个点的空间位置可以用其三维坐标进行数学表达;对于任意一点对象本体的高程语义信息用 P_H 表示,其与临对象之间的比较语义、关联语义信息等关系语义用 P_G 表示,因此本文用式(1)进行点状地形要素的表达。

$$\{x,y,z\}\{P_H\}\{P_G\} \tag{1}$$

线状地形要素是指在空间上呈线条状分布的普通线状要素或地物的几何边界线状要素。线是

点的集合,故可以用序列点来表达线状要素。除了点的序列坐标外,各线状地形要素在高程语义约束的基础上又包含了自身形态语义 P_M 以及与邻近对象的空间关系以及逻辑关系等关系语义 P_G ,其表达式见式(2)。部分地形要素在仅考虑几何形态的情况下,式(2)中的高程信息可以忽略。

$$\{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n\} \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \{P_H, P_M\} \{P_G\} \quad (2)$$

面状地形要素是指以完整平直面状、微起伏状或倾斜状形态分布的区域性地形要素,如水域面、建筑物基底面、边坡面等。从地物分类的角度看,围成面状要素的边界为线状要素,且此线状要素本身也是一个独立对象;从数学的角度来讲,面是由线构成,所以本文的面状要素通过线状要素来表达,并通过 $Type$ 类型来区分。另外,不同类别的面具有不同的高程信息,如独立建筑物基底、球场等在人为认知的情况下认为是平直面状,即只有一个高程值或认为高程值在整个区域内相等,边坡面是倾斜状形态分布,其点的分布具有一定数学关系,而自然起伏地形的高程信息区别于规则地形;同时,此面对象与邻近对象的空间关系如何也是需要表达的语义信息。本文结合面对象本体具有的语义及与临对象之间的关系语义表达面状地物语义

信息,同时为了区分地物类别加入了 $Class$ 字段。

$$\{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n\} \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \{P_H, P_M\} \{P_G\} \{Type\} \{Class\} \quad (3)$$

针对本文城市地形要素分类情况及各类别对象的表达类型,可统一概括并综合为点和线要素的表达,具体表达方式如表2所示。

3 实验与结果分析

3.1 实验数据

为验证本文提出的城市地形分类与表达方法的有效性,以南京市局部区域为实验区进行了测试实验。该实验区由低山、平原、河流、湖泊和沿江河地等地形单元构成,山水城林融为一体,平地山丘相得益彰,具有自然地形与人工地形交错,渐变地形与突变地形交融,平直地形与起伏地形共存的特点,形成了典型的地貌综合体,城市结构完整,具有代表性。

本文以实验区2014年更新后的1:500地形图为基础数据(图2),通过以下的预处理,获取实验区可用于城市地形要素提取的数据。

(1)格式转换。原始地形图数据不是以点、线

表2 地形要素信息表达

Tab. 2 Quantitative expression of urban topographic features

要素类型	地物类别	形态信息表达
点	高程点	$\{x, y\} \{z\} \{P_H\} \{P_G\} \{Type\} \{Class\}$
线	陡坎线、等高线、道路边界、地块边界等; 机动车道线(面)、非机动车道线(面)、人行道线(面)、围合型隔离带线(面)、建筑物基底线(面)、水域线(面)、小区道路线(面)、边坡(面)等	$\{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n\} \{z_1, z_2, \dots, z_n\} \{P_H, P_M\} \{P_G\} \{Type\} \{Class\}$

注: $Type$ 表示地形要素形态类型(点、线或面); $Class$ 表示地形要素分类类别; P_H 表示高程语义; P_M 表示形态语义; P_G 表示与邻近对象之间的关系语义

或面数据的形式进行存储且不具有矢量数据特征,为方便点线面要素的提取和编辑,本文将CAD格式数据转换为矢量数据。

(2)图幅拼接。地形图数据以标准图幅进行存储,每个图幅的实际面积较小,为保证本实验区数据的完整性需对实验数据进行图幅拼接。

(3)数据精简。由于地形图数据中存在花圃填充符号、管线以及图幅框等非地形建模所需数据,本文将其剔除,使其简化。

(4)数据符号化。为了区分不同地物,方便目视解译,本文将数据进行符号化。



图2 研究区域地形图

Fig. 2 Topographic map of study area

验证数据中用到的遥感影像为课题组购买的GeoEye影像,获取时间为2015年,与地形图数据的地物类型基本吻合。

3.2 地形要素提取方法

为对分类结果进行评价并满足地形要素的表达,依据本文分类标准,在上述预处理数据的基础上,利用地形图原有属性代码,进行各地形要素的点、线、面信息提取。各线状地形要素从线图层中提取,面要素以“线图层为主、面图层为辅”进行提取、编辑和构面,点要素利用已提取的各类别面要素或者线要素结合点图层提取,并在建立拓扑的前提下进行检查、编辑以及语义信息嵌入,进而将各个地形要素类别分别依据现有编码方式编码及数据入库。

地形要素提取流程如图3所示,城市道路提取出机动车道、非机动车道、人行道以及围合型隔离带4个类别。为方便后期DEM构建并保持“城市被道路网分割”的原则,隧道以及高架在本文中被并入相应车道内,即隧道和镂空高架车道类型与此条城市道路的道路类型保持一致。高程值需保持单一性原则,以地面真实高程为准,隧道遇到镂空道路桥则以隧道形态为主。地块要素的提取与城市道路提取思路相似,根据图层中的原有属性代码字段进行提取,同时以数据完整、逻辑正确、线条平滑、水域连通等原则进行要素编辑,进而构面及高程点提取。为了保持图面简洁,高程点、等高线等基础数据在本文中不展示,专题要素中线状要素和面状要素共存的则只展示面状要素,并用不同颜色进行可视化,其他区域指基础地块面内未被分类的区域,各专题地形要素提取结果如图4所示。

3.3 结果分析

从图4可看出,本文的分类方法能够较好地地进行地形对象细分。城市道路能够构成城市地形的骨架,分类结果剔除了DEM不表达的镂空城市要素。本文提出的面向对象分类方法解决了地形图中公共边界只属于某一地类而无法直接提取利用的弊端,也验证了城市地形是由城市道路和城市地块两部分组成的思想。将上述分类结果与遥感影像套合,通过目视解译可以看出城市地形要素分类结果与遥感影像在位置及类别上能够很好地吻合。各地形要素套合局部放大结果见图5,实验区整体套合效果如图6所示。

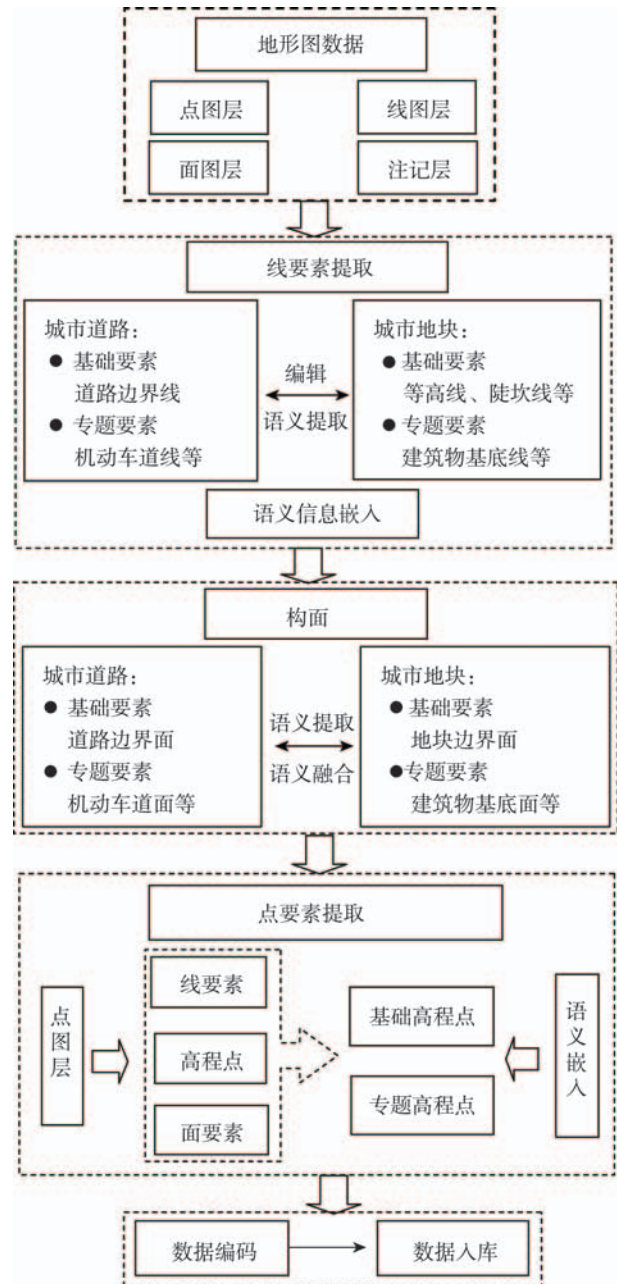


图3 城市地形要素提取流程图

Fig. 3 Flow diagram of extracting urban terrain features

利用上述分类结果,在其数学表达的基础上,以“基础要素构建本底数据,专题要素复合嵌入”的方式对实验区进行了城市DEM建模,并进行坡度计算,结果如图7、8所示。同时,本文根据已有建模方法^[2]直接利用基础地形要素构建了DEM,结果如图9所示。对比图7、9可见,在本文分类基础上完成的DEM模型更细致地刻画出了城市道路、建筑物、球场、水域、边坡等城市地形要素,更符合城市地形形态。由图7、8可知,从整体上看,基于地形要素分类构建的DEM所表达的城市地形与实验区地

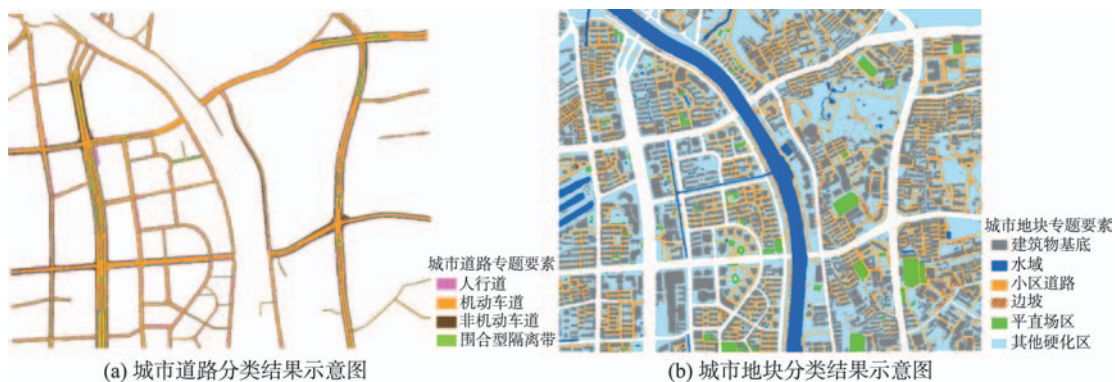


图4 地形数据分类结果

Fig. 4 Classification results of urban topographic features

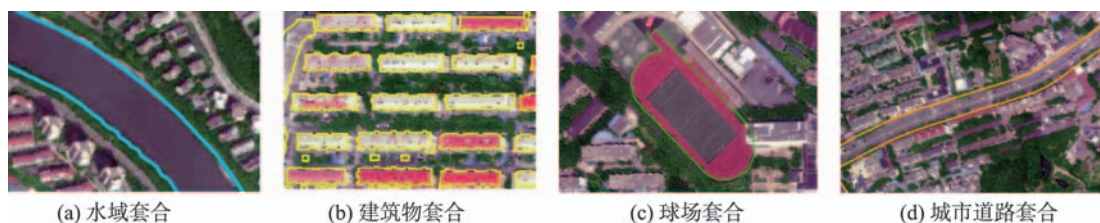


图5 分类结果与遥感影像套合局部细节图

Fig. 5 Partial enlarged figures of RS image registration



图6 分类结果与遥感影像套合示意图

Fig. 6 Map of registration between classification results and a RS image

形的形态基本吻合,城市道路框架明显。城市地形在整体平缓渐变的同时夹杂起伏突变现象,实验区西半部分以城区为主地形较平缓,坡度较小;中部河流边界及两岸边坡形态得到了较好表达;实验区东部多低山及起伏地势,以及陡坎突变地形,坡度变化较大;模型结果与遥感影像及实际地形相符。从局部上分析,各地物除了几何信息能够有效表达外,此模型还保留了平直场区和建筑物基底的语义



图7 实验区地形模型示意图

Fig. 7 Map of hill-shade of study area

平直性(如图7中1号位置球场),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的特性以及水面的语义平稳性(如图7中2号和3号位置)、陡坎的突变性、边坡和低山的渐变性等,同时各对象在与邻近地物的关系语义也能够有效表达,如1号球场和旁边阶梯的空间关系,2号道路与周围建筑物以及山丘等的位置方位及拓扑关系等,3号位置的水面与河岸的衔接等,各地物间能够较好地吻合。

综上所述,城市地形遵循被城市道路网分割的

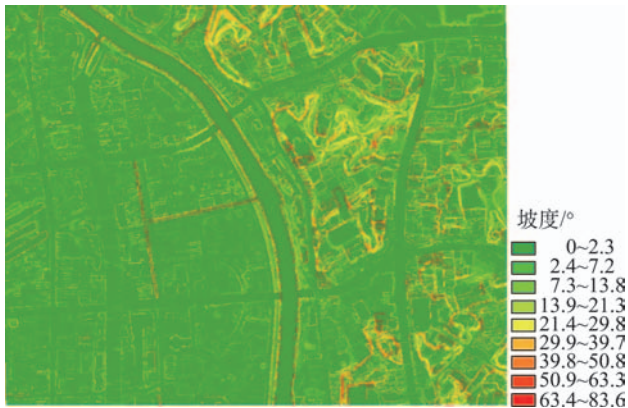


图8 实验区坡度图

Fig. 8 Slope map of study area

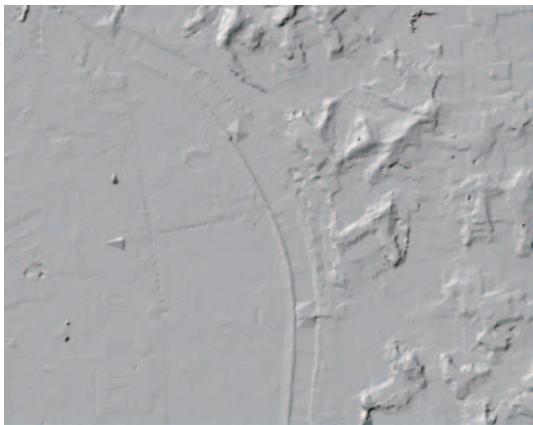


图9 基于基础地形要素构建的地形模型

Fig. 9 Hill-shade model based on basic features

原则,各地形要素分类完整,具有正确的逻辑关系和空间关系,本文提出的分类和表达方法能够从全局进行城市地形控制,从局部进行形态表达,为城市DEM建模提供基础。

4 结语

本文分析了城市地形特征以及大比例尺地形图分类标准在城市DEM建模应用方面的不足,构建了面向复杂城市地形的地形要素分类与表达方法。实验结果表明,对于几何和语义信息共生为主体的复杂城市地形而言,本文提出的分类和表达方法能够表达城市地形结构,为城市DEM构建提供基础。在城市地形要素分类和表达的基础上,可进一步利用面向地理对象的思想针对城市地形进行整体和分区DEM建立,有望实现地形建模从传统的测量标绘到地理赋值、从整体构建到分层表达、从重几何轻语义到注重几何语义信息共生的转变。

本文提出的方法可为城市地形图的最大化利用、城市地形建模及应用推广提供基础。然而,本文主要针对城市地形的地形要素分类和表达方法进行了研究,对于微观尺度下的表达以及分类粒度问题还有待进一步探讨;同时,要实现高精度、高保真的城市地形构建,除要考虑数据特点外,还需要对高程点加密、模型内插等DEM构建方法和表达方式方面进行研究,这将是下一阶段的研究重点。

参考文献(References):

- [1] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325. [Tang G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(9):1305-1325.]
- [2] 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[M].北京:科学出版社,2009. [Tang G A, Liu X J, Lv G N, et al. The principle and methodology of DEM based Geo-analysis[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [3] 田丹,刘爱利,丁浒,等.地貌形态类型面向对象分类方法的改进[J].地理与地理信息科学,2016,32(2):46-50. [Tian D, Liu A L, Ding H, et al. Improvement of Object-Oriented classification method for landform types[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(2):46-50.]
- [4] 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.]
- [5] 王春,刘学军,汤国安,等.格网DEM地形模拟的形态保真度研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2009,34(2):146-150. [Wang C, Liu X J, Tang G A, et al. Morphologic fidelity of grid digital elevation model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(2):146-150.]
- [6] 王耀革,朱长青,王志伟.基于Coons曲面的规则格网DEM表面模型[J].测绘学报,2008,37(2):217-222. [Wang Y G, Zhu C Q, Wang Z W. A surface model of grid DEM based on coons surface[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008,37(2):217-222.]
- [7] 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.
- [8] Kingder D B. High-order interpolation of regular grid digital elevation models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,21(14):2981-2987.
- [9] Gabet L, Giraudon G, Renouard L. Automatic generation

- of high resolution urban zone digital elevation models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1997,52:33-47.
- [10] Noumi Y, Shiono K, Masumoto S, et al. Generation of DEM from the topographic maps: Utilization of Inter-Contour information[J]. Geological Data Processing, 1999,10:235-246.
- [11] Guo L, Yang W, He H, et al. Study on updating method of DEM based on Large-Scale topographic map[J]. Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2013,20:1339-1342.
- [12] 高轩. 基于大比例尺地形图的城郊道路DEM构建研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011. [Gao X. Research on creating DEM of suburban roads based on large scale digital map[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.]
- [13] 胡刚, 宋慧, 张明礼. 栅格DEM中隔断线约束算法应用评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014,38(1):140-144. [Hu G, Song H, Zhang M L. Application evaluation of the bounding algorithm for breakline in grid DEM[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014,38(1):140-144.]
- [14] 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.]
- [15] 古云鹤, 杨勤科, 罗仪宁, 等. 突变地形特征在DEM上的表达[J]. 水土保持研究, 2011,18(2):174-179. [Gu Y H, Yang Q K, Luo Y N, et al. Representation of eroded geomorphological features on the DEM[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(2):174-179.]
- [16] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准 1:500、1:1000、1:2000地形图要素分类与代码(GB/T14804-1993) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993. [National Technical Supervision Bureau. Classification and codes for features of 1:500, 1:100, 1:2000 topographic maps (GB/T14804-1993) [S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.]
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 基础地理信息要素分类与代码(GB/T 13923-2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China. Specifications for feature classification and codes of fundamental geographic information (GB/T 13923-2006) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.]
- [18] 张雪英, 张春菊, 闫国年. 地理命名实体分类体系的设计与应用分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010,12(2):220-227. [Zhang X Y, Zhang C J, Lv G N, et al. Design and analysis of a classification scheme of geographical named entities[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010,12(2):220-227.]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国行业标准城市道路工程设计规范(CJJ37-2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for design of urban road engineering (CJJ37-2012) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.]