

基于街道空间数据及 GPS 测量的 SRTM-DEM 校正和插值细化

肖 飞^{1,2}, Parrot J. F.², 杜 耘¹, 凌 峰¹

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

2. LAGE, Instituto de Geografia, UNAM, Mexico City 04510, Mexico)

摘要: 针对城市地区 SRTM 数字高程模型, 本文引入街道空间分布信息作为辅助数据, 并结合 GPS 实地测量, 对 DEM 中具有空间相关性的误差部分进行修正, 从而尝试在一定程度上提高 SRTM 数据的垂直精度和空间分辨率。本文以墨西哥城 Xico 地区为例, 解析 SRTM DEM 像元分辨率单元内地物表面平均高程值的组成结构; 分析形成 DEM 高程值的地物组分之间的空间关系并根据 GPS 实地测量数据进行检验; 探讨 SRTM DEM 中具有空间相关性系统偏差的产生原因; 计算街道空间分布和 SRTM 数据中与其具有空间相关性的系统误差之间的定量关系; 并评估 SRTM 数据在该区的总体高程偏差。根据辅助数据与 DEM 系统误差之间的空间关系, 通过 GIS 空间运算实现 SRTM DEM 的校正和细化。结果表明, 与原始 SRTM 数据相比, 校正细化后的 DEM 其整体高程偏差, 以及与街道建筑结构相关的系统误差, 均能够得到一定程度的校正和改进, 并能较好地反映城区实际地面高程和城区建筑结构信息。在其他地形数据缺乏情况下, 尽管计算结果受 SRTM 自身数据精度所限, 但利用含有空间定位信息的辅助数据, 对现有较低空间分辨率的 DEM 进行误差校正及细化, 仍可在一定程度上消减与辅助数据相关的空间误差, 提高 DEM 数据精度, 从而为相关研究提供更精确的基础地形资料。

关键词: SRTM; DEM; 空间分辨率; 误差; 细化

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00118

1 引言

作为对地表的数字化表达方式之一, 数字高程模型(DEM)广泛应用于地形、地貌、水文、生态等研究中^[1-3]。数字高程模型常用一组有序数值阵列形式来表示, 并一般由采样点高程数据生成^[4]。除了河流空间分布信息外, DEM 生成过程中较少引入其他附加数据。河流分布信息的加入能有助于对 DEM 进行校正^[5-7]。虽然土地覆被、地貌特征、遥感信息的一些指数(如植被指数 NDVI 等)均含有一定的空间信息, 有助于 DEM 的修正, 但这些数据还很少作为辅助信息应用于 DEM 生成中。本文在此以 SRTM(The Shuttle Radar Topography Mission)高程数据为例, 尝试引入其他辅助数据, 对 SRTM 数据进行修正, 并尝试在辅助信息支持下,

提高 SRTM 数据的空间分辨率。

对于任一地面高程栅格模型, 一般可将其分为二个部分: (1) DEM 确定性部分; (2) DEM 误差面^[8-10]。其中, DEM 误差面又可以视为由两部分组成, 即具有空间相关性的随机误差部分和纯噪声部分^[11]。具有空间相关性的误差组分一般能够利用辅助数据对其进行校正^[12-13]。如在传统的制图学方法中, 地形复杂性、地表覆被, 以及地形遮蔽状况等因子与测量误差空间分布密切相关; 而在摄影测量中, 地形遮蔽状况也能够用于评估高程误差。与此类似, SRTM DEM 会在高冠层林区以及地形遮蔽区等地域会表现出系统误差^[14-15]。对空间误差进行评估并分析其对空间模型的影响, 则是地统计学有关地形模拟的一个重要研究方面^[9, 12-13]。一般如能获取精确的高程样点, 就可直接对误差进行评

收稿日期: 2010-08-25; **修回日期:** 2011-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801045); 湖北省自然科学基金项目(2009CDB138); 中国科学院知识创新项目(0609211120); 国家自然科学基金项目(40801186)共同资助。

作者简介: 肖飞(1978-), 男, 陕西人, 博士, 研究方向: 地形地貌数字分析及 GIS 资源环境应用。E-mail: xiaof@whigg.ac.cn

估并生成误差面^[16],进而采用地统计方法,由 DEM 确定性部分加上误差面来对 DEM 进行有效模拟^[17-18]。因此,利用辅助数据对 DEM 中具有空间相关性的误差部分进行校正,则有可能获取更为精确的 DEM。

2 研究区及数据源

本文以墨西哥城区东南部的 Xico 区为例,以街道空间分布数据为辅助数据进行 SRTM 的修正及细化试验。墨西哥城位于山间盆地之中,地形低洼,大部分城区系围垦湖泊而成,洪涝灾害极易发生。Xico 区洪涝灾害尤为频繁,汇聚山区来水的主干排水渠横贯其北部,山区来水量大时,该主干渠道经常在此区发生溃裂而引起洪涝;该区西南部为 Chalco 湖,湖区与 Xico 城区之间有一矮堤隔开。湖面高程在雨季常高于城区地面,因而,Xico 区亦常面临溃堤淹没风险。该区为城市中低收入者居住区,房屋建筑多为一层院落形式,建筑低矮,一旦发生洪灾,极易造成较大生命和财产损失。目前,缺乏地形数据是在该区域进行洪涝分析的极大障碍。本文以 SRTM 数据作为原始数据,探讨对其进行校正及细化的方法,并分析将该数据应用于此区洪涝分析的可能性。

SRTM-DEM 为美国航天飞机雷达地形测绘计划于 2000 年 2 月份在 STS-99 任务中利用雷达

测图技术所获得的地形数据,是迄今现势性、分辨率和精度方面较好的全球性地形数据之一^[19-21]。SRTM 飞行高度为 233km,搭载有两个 InSAR 装置,包括 C 波段(5.6cm,5.3GHz)和 X 波段(3.1cm,9.6GHz)两个波段的传感器^[22]。C 波段数据经过 NASA 喷气推进实验室(JPL)处理后,以 1"空间分辨率数据发布,而 X 波段数据则处理为分辨率 3"数据。SRTM 数据覆盖地球 60°N 和 56°S 之间地区,但 1"分辨率 DEM 目前仅公开发布美国境内区域。本文采用 3"空间分辨率数据进行分析试验,投影转换为 UTM_Zone_14N,经过投影转换后栅格大小为 89.64m。

本文所辅助数据为 Xico 区街道分布图,系从 QuickBird 数据数字化而来。如图 1 所示,该数据包括了城市该区域所有街道的空间位置及具体街道宽度,同时也包括了临湖堤坝的位置及宽度。此外,在该区还进行了差分 GPS 测量,获得 16 处地面实测高程,其中有 6 个测点位于 Chalco 湖与市区间的堤坝之上。如图 1 所示 GPS 测量点稀少且分布不均匀,仅依靠目前有限的 GPS 测量点位数据,无法获得该区较为精确的地形资料。如能根据 SRTM DEM 数据及其他辅助信息,并结合地面实际测量,校正系统偏差,则有可能获取较原始 SRTM 数据更为精确的城市地形信息,不仅有助于该区的防灾减灾,而且可对其他类似 DEM 缺乏情况提供借鉴。

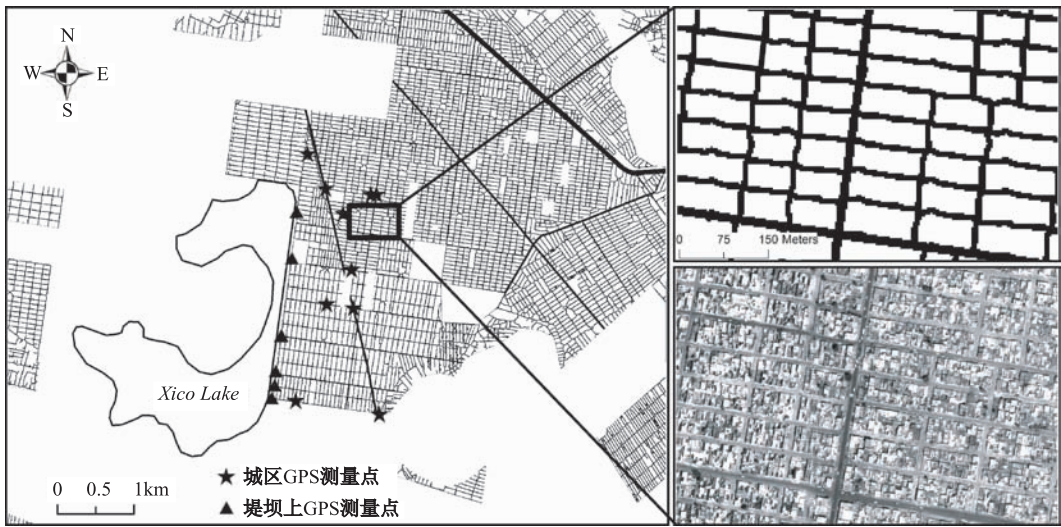


图 1 研究区街道空间分布辅助数据

Fig. 1 Auxiliary data of the street map for correcting and downscaling SRTM DEM in the study area

3 SRTM 数据校正方法

由于雷达扫描特性,SRTM 数据集是一种数字地表高程模型(DSM),如树顶、房顶等,而不是通常的数字地面高程模型(DTM)。所以,SRTM 在某些地区和实际的 DTM 之差往往不是一种偶然误差,而是与该地区中地物特征有关的一种系统误差^[21]。而在洪水淹没及洪水演进计算中,需用各处的地面高程模型数据(DTM),因此,须对上述系统误差进行校正。

3.1 校正模型

对于任一 SRTM 栅格,其高程值为像元分辨率单元内地物表面的平均高程。从城区地表覆被及地形来看,该区极少有树木覆盖,城区地表(不包含堤坝及堤坝两侧 89.64m 缓冲区)可视为由街道、屋顶、庭院、空地这四类表面组成。其中,房屋及庭院组成了各个街区,这样城市地表即可简化为 3 类:街道、街区及空地。因此,每一 SRTM DEM 栅格的高程值就可视为由上述 3 类地表高程所组成,其中,街道高程和空地的高程都是实际地面高程,而街区高程则应为所在像元内街区建筑物顶部的整体实际平均高程。

如图 2 所示,任取一城区 SRTM DEM 栅格,设该像元分辨率单元内地物表面的平均高程为 E_{srtm} ,并设该栅格内街区建筑物顶部整体平均高程为 E_b ,街道地面高程为 E_s ,设街区在该栅格所占面积比例为 φ_b ,而街道在该栅格所占面积比例设为 φ_s ;并将 E_b 与 E_s 高程之差设为 h 。则:

$$E_b - E_s = h \tag{1}$$

$$\varphi_s + \varphi_b = 1 \tag{2}$$

$$E_b \times \varphi_b + E_s \times \varphi_s = E_{srtm} \tag{3}$$

根据(1)-(3)式,可得:

$$E_s = E_{srtm} + h\varphi_s - h \tag{4}$$

$$E_b = E_{srtm} + h\varphi_s \tag{5}$$

在(4)、(5)式中, E_{srtm} 可根据 SRTM DEM 数据直接读取,而街道面积在该栅格所占比例设为 φ_s 则可根据街道分布图,利用地统计学及地理信息系统空间分析方法求算。如能获知每一 SRTM 栅格中街区街区建筑物顶部相对地面的整体平均高度 h ,即可校正 SRTM 数据在该市区的系统偏差。然而, h 值空间分布数据属未知信息,因此,目前尚无法直接利用上述公式进行校正。

根据实地调查,由街道划分而成的街区中,建筑物分布较为均匀(如图 1 中遥感影像所示),且建筑结构相似,绝大多为一层院落结构,并且院子长宽均远较街道宽度为小。因此,本文假设此地各街区建筑物整体平均高度基本相同,即 h 在该区为一定值。根据(4)式,如 $E_{srtm} - E_s$ 和 φ_s 成线性反比关系,那么就能够说明上述假设是成立的。如该条件成立,那么就可以根据地面实测 GPS 点来计算出 h 值,进而根据(4)及(5)式求解实际地面高程 E_s 及各街区平均高程 E_b 。因此,在上述条件下,基于辅助街道空间数据及 GPS 测量数据的支持,上述关系式中各项均可求算。

3.2 假设条件检验

为了验证 h 在该区为定值这一假设,本文根据 GPS 实际地面测量点来进行相关检验。对比城区地面实测 GPS 高程值及 SRTM 数据,如图 3 所示,纵坐标 E_s 表示城区 GPS 测量点高程,横坐标 E_{srtm} 表示各测量点位处 SRTM 高程值。可见二者之间呈现一定的线性正比关系。进行曲线拟合,可计算出该直线斜率为 0.47,相关系数为 0.78。由于斜率不为 1,可见 SRTM 数据在该城区的系统偏差并非一恒定值,其大小主要取决于 h 及 φ_s 。

在检验 $E_{srtm} - E_s$ 和 φ_s 之间关系时,由于 φ_s 参数

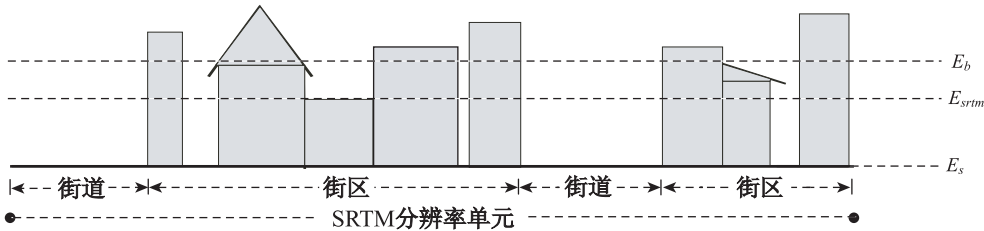


图 2 SRTM DEM 像元分辨率单元内地物表面平均高程值组成结构的概念关系图解

Fig. 2 Conceptual representation of spatial structures of the surface features contributing the elevation value within a single SRTM resolution cell

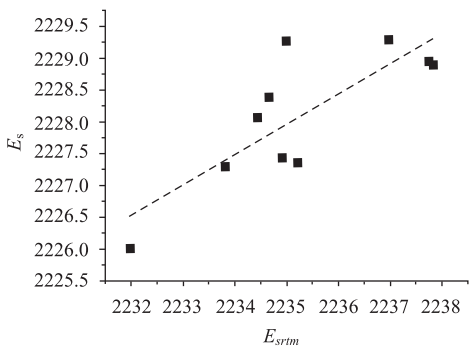


图 3 GPS 实测街道地面高程 E_s 与 SRTM 数据高程值 E_{srtm} 间统计关系

Fig. 3 Relations between ground elevations from GPS survey(E_s) and elevation values from SRTM data (E_{srtm})

涉及面积比例关系,因此,需要确定参数取值的准确位置及范围。GPS 测点位置一般并非恰好对应于 SRTM 栅格的中心,而是往往处于相应栅格的边缘处。而在同一栅格的不同位置,街道、街区所占单位面积百分比均有不同,这将直接影响到上述各关系式的解算及检验。考虑到 GPS 测点数据对其周边地物高程的代表性,本文以各 GPS 测量点为中心,构造与 SRTM 栅格大小一致的矩形分析单元进行相关参数计算。以各 GPS 测量点为中心,做 $89.64\text{m} \times 89.64\text{m}$ 的矩形;将该矩形与 SRTM 数据进行空间叠加,根据各矩形分析单元所涉及 SRTM 栅格的面积比例,计算 SRTM 栅格高程在该矩形中的加权平均值,获取以 GPS 测量点为中心的 E_{srtm} 值;进而计算各点 $E_{srtm} - E_s$ 值。同时,将所做的矩形单元与街道分布图做空间叠加运算,并统计每一矩形单元内街道和街区分别所占面积百分比,从而获得 φ_s 及 φ_b 值。 $E_{srtm} - E_s$ 与 φ_s 关系如图 4 所示,可见二者之间呈近似线性反比关系,相关系数为 0.61。因此,在资料缺乏条件下,可设定此研究区各街区建筑物整体平均高度基本相同。

3.3 堤坝存在时的校正模型

在假设及验证 h 值的过程中,为了使条件及计算简化,本文仅用了堤坝及其 89.64m 缓冲区之外的城区 GPS 测量数据。为了分析洪水漫溢及溃坝风险,另外,还有 6 个测点布设于堤坝之上。该处由于堤坝的影响,SRTM 系统误差校正的数据处理就较为复杂。对于任一包含有堤坝及城区的 SRTM DEM 栅格,设该栅格单元内堤坝顶部高程

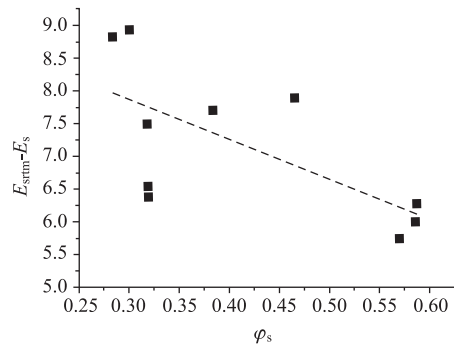


图 4 街道在栅格单元内所占面积比例 φ_s 与 $E_{srtm} - E_s$ 间关系

Fig. 4 Relations between values of $(E_{srtm} - E_s)$ and percentages of street area in SRTM resolution cells (φ_s)

为 E_d ,堤坝在该栅格所占的面积比例设为 φ_d ,那么在包括坝区的整个城区则有下列关系式:

$$E_b - E_s = h \tag{6}$$

$$\varphi_d + \varphi_s + \varphi_b = 1 \tag{7}$$

$$E_d \times \varphi_d + E_b \times \varphi_b + E_s \times \varphi_s = E_{srtm} \tag{8}$$

上述(6)-(8)式中, E_s 及 E_d 可由 GPS 测点数据获知, φ_d 、 φ_s 、 φ_b 可根据辅助街区分布图利用空间分析方法计算。

4 辅助数据与 GPS 测量支持下的 SRTM 数据校正及细化处理

4.1 SRTM 数据校正与插值细化处理分析步骤

根据 GPS 测量点数据及街道空间分布数据,综合上述(6)-(8)式,即可求算各变量之间的关系,进而利用 GIS 空间分析方法推算整个研究区的地面高程。具体步骤如下:

(1)数据处理

本区最低等级街道宽度约 10m ,远小于原始 SRTM 数据空间分辨率。而在洪水演进过程中街道和街区水流流速不同,为了能够在最终校正后的 DEM 中将街区和街道区分开来,本文根据该区最低等级街道宽度,以 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 作为计算单元。

利用地理信息系统空间分析方法,将矢量格式街道分布图中的街道和堤坝分别提取出来,并分别转换为栅格大小为 3m 的栅格格式;同时 SRTM 数据按最近邻方法重采样至 3m ;以所有 GPS 测量点为中心,分别构造边长 89.64m 的矩形,并同样将这些矩形重采样至 3m 。

(2)校对方程解算

将以 GPS 测点为中心构造的矩形栅格分别与街道栅格和堤坝栅格进行空间运算,计算街道栅格及堤坝栅格在 89.64m×89.64m 范围内各自所占的面积百分比,求取各 GPS 测点处的 φ_s 值及 φ_d 值。同时,将重采样至 3m 的 SRTM 数据也与所构造的矩形栅格进行空间叠加运算,计算在各矩形栅格区域内 SRTM 的平均高程,即各 GPS 测点处的 E_{srtm} 值。

设 E_r 等于 $E_{srtm} - E_s + E_s\varphi_d - E_d\varphi_d$, 根据 (6)-(8), E_r 应该与 $h\varphi_b$ 相等。利用所计算的各测量点处的相关参数,代入 $E_{srtm} - E_s + E_s\varphi_d - E_d\varphi_d$ 求算 E_r 。分析在 E_r 与直接根据街道空间分布图所得到的 φ_b 值之间关系,进行曲线拟合, E_r 与 φ_b 之间关系可近似表示为 $E_r = 5.219\varphi_d + 4.187$, 相关系数为 0.73。

如图 5 所示,二者虽然呈线性关系,但截距不为零。分析其原因,应是 SRTM 误差所造成。如其他类型的数字高程模型一样, SRTM 数据同样可分为 DEM 确定性部分和误差面两部分,误差面部分在此仍可分为具有空间相关性误差部分及纯噪声部分。其中,由于城区建筑而引起的系统误差属于具有空间相关性误差部分。鉴于其他具有空间相关性的误差和纯噪声部分与 φ_b 无明显相关关系,因而,如不考虑该两项误差,则 E_r 与 φ_b 之间的关系可表示为 $E_r = 5.219\varphi_d$, 由此可知 h 等于 5.219。噪声部分随机出现于 SRTM 中,一般呈正态分布,其对 E_r 数值的影响会因随机波动而正负误差具有相互抵偿性,对 E_r 与 φ_b 之间的统计关系影响也较小,因此,在实际测量数据所得的 E_r 与 φ_b 关系式中,截距 4.187 可视为 SRTM 数据在该区的整体偏差。

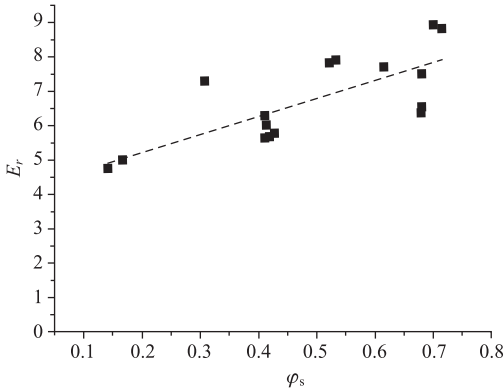


图 5 街区在栅格单元内所占面积比例 φ_b 与 E_r 间关系

Fig. 5 Linear relation between values of E_r and percentages of street area in SRTM resolution cells (φ_b)

(3)空间运算

将栅格大小为 3m 的栅格格式街道分布图、重采样为 3m 的 SRTM 数据以及栅格大小为 89.64m 的原始 SRTM 数据组合进行空间合并运算,求取每一 SRTM 栅格单元内 φ_s 值、 φ_b 及 φ_d 值。将 SRTM 数据与 4.187 做差值计算,进行初步校正以去除该数据在此区的整体偏差。为了能在最终校正后的 DEM 中将街区和街道区分开来,并避免最终结果围绕原始 SRTM 栅格边缘产生阶梯状跳动,本文对初步校正后的城区 SRTM 数据进行径向基函数插值,栅格大小设为 3m。将初步校正并插值后的 SRTM 数据、 φ_s 、 φ_b 及 φ_d 代入 (6)-(8) 式,采用地理信息系统空间计算方法,即可获得校正后的实际地面高程值,同时也可算出各街区建筑顶部平均高程。城区之外的数据虽重采样至 3m,但未做其他插值计算,仅校正了其整体高程偏差。最后,合并城区街道、街区和城外地区数据,得到计算结果(图 7)。

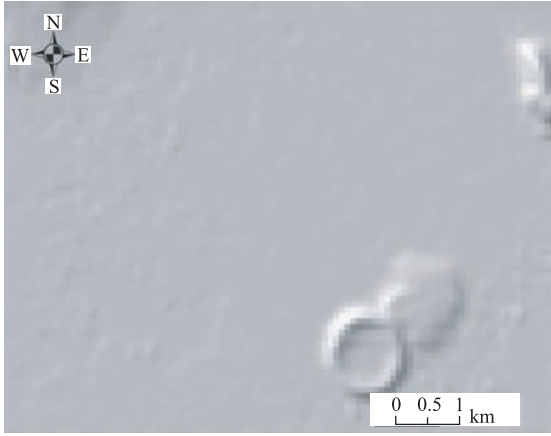


图 6 研究区原始 SRTM-DEM 地形阴影图
Fig. 6 Hillshade map created from the original SRTM-DEM data

4.2 结果分析

在辅助街道空间分布数据与 GPS 测量支持下,研究区 SRTM 数据经上述过程得以校正及细化。根据校对方程解算,研究区原始 SRTM DEM 在垂直精度方面存在 4.187m 的整体偏差。整体偏差利用栅格计算进行修正,而城区 DEM 数据则根据街道空间分布和 SRTM 数据中与其具有空间相关性的系统误差之间的定量关系,进行了进一步校正。图 6 为原始 SRTM 数据地形阴影图,图 7 为校正细化后空间分辨率为 3m 的 SRTM 数据地形阴影图。由于原始 SRTM 数据集为数字地表高程模型

(DSM),其城区高程数据为地面及建筑物顶部高程信息的综合结果,而非通常的数字地面高程模型(DTM),因而难以准确反映城区实际地形起伏状况。此外,由于区内最低等级街道宽度约 10m,远小于原始 SRTM 数据空间分辨率,因此,原始数据无法反映街区结构信息。由图 6 可见,原始 SRTM 数据所反映的城区地形平坦,街道建筑等形态结构不能直接辨识。

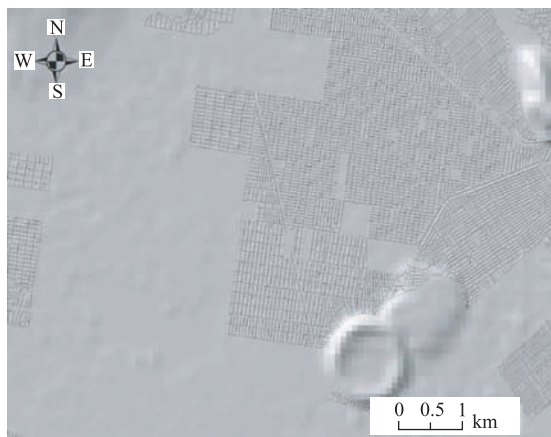


图 7 经校正和插值细化后空间分辨率为 3m 的 SRTM-DEM 地形阴影图

Fig. 7 Hillshade map created from the corrected and downscaled 3m SRTM-DEM data

经过辅助街道空间数据及 GPS 测量的校正和插值细化处理过程后,原始 SRTM-DEM 数据集融合了辅助的街道空间结构信息和 GPS 定位测量信息,数据中与街道分布具有空间相关性的系统误差得以校正,街道及街区建筑空间分布信息得以细化。如图 7 所示,SRTM 数据城市区域空间分辨率得到提高,细化后的城区数据栅格大小为 3m,计算结果能够反映城区实际地面高程和城区建筑结构信息。同时,根据运算过程所建立的校正方程,计算出原始 SRTM 数据在本区的整体高程偏差并加以校正。因此,与原始 SRTM 数据相比,校正细化后的 DEM 其整体高程偏差,以及与街道建筑结构相关的系统误差均能够得到一定程度的校正和改进,并能较好地反映城区实际地面高程和城区建筑结构信息。

5 讨论与结论

以含有空间信息的地物数据作为辅助,可在

DEM 的生成和修正过程中提供一定的附加空间信息和限定条件,从而有助于获得更为准确的数字高程模型。本文采用街道空间分布数据作为辅助信息,并结合 GPS 实地测量,以墨西哥城区东南部洪涝灾害易发的 Xico 区为例,对 SRTM 进行校正和细化试验。针对原始 SRTM 数据,本文对其具有空间相关性的系统偏差部分进行分析。对城区地表覆盖结构进行分类,分析系统偏差产生原因;计算街道空间分布与 SRTM DEM 中具有空间相关性的系统误差之间的空间关系,并评估 SRTM 数据在该区的总体高程偏差,从而对 SRTM 进行校正和细化。校正和细化后,原始数据垂直精度方面所存在的 4.187m 整体偏差得以校正,而城区数据栅格大小则细化为 3m,能够区分城区街道和街区,并可获得整个城区的地面高程模型及街区高程数据。

上述方法虽能在一定程度上对数据进行校正和细化,但方法的适用范围与研究区城市特点相关,即各街区建筑物整体平均高度应基本相同。此外,SRTM 本身数据精度仍然限制了最终计算结果的精度。在 SRTM 计划设计之初,该数据被认为其绝对水平精度可达 20m,绝对垂直精度可小于 16m,而相对垂直精度可小于 10m^[19]。根据 NI-MA、USGS,以及 SRTM 计划工作组的相关数据精度评价研究^[22-25],SRTM 数据的垂直精度好于预期,在较好情况下绝对垂直精度接近 5m,相对垂直精度则更高。本城区地形较为平坦,与 GPS 实际测量数据对比可见本区 SRTM 数据波动较小。即便如此,SRTM 数据误差中噪声部分在校正和细化过程中仍然难以得到改善。虽然与街道建筑结构相关的系统误差以及整体高程偏差能够得到一定程度的校正和改进,但 SRTM 其本身数据波动产生的误差会对计算结果造成影响。此外,由于 GPS 测量点较为稀少,计算中所得到的空间相关关系还需进一步验证。

总之,尽管本文方法具体适用范围与研究区特点相关,计算结果亦受 SRTM 自身数据精度所限,但仍可表明,在其他地形数据缺乏情况下,利用含有空间定位信息的辅助数据对现有较低空间分辨率的 DEM 进行误差校正及细化,可在一定程度上消减与辅助数据相关的空间误差、提高 DEM 数据精度,从而为相关研究提供更精确的基础地形资料。

参考文献:

- [1] 周成虎,程维明,钱金凯,等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.
- [2] 程维明,周成虎,柴慧霞,等. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 725-736.
- [3] 肖飞,张百平,凌峰,等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 459-466.
- [4] 杨昕,汤国安,刘学军,等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1058-1070.
- [5] 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: 211-232.
- [6] Hutchinson M F. A Locally Adaptive Approach to the Interpolation of Digital Elevation Models. // NCGIA. Proceedings of the Third International Conference Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling[C]. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis, 1996.
- [7] Ling Feng, Zhang Qiuwen, Wan Cheng. Filling Voids of SRTM with Landsat Sensor Images in Rugged Terrain [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(2): 465-471.
- [8] Holmes K W, Chadwick O A, Kyriakidis P C. Error in a USGS 30m Digital Elevation Model and Its Impact on Digital Terrain Modeling [J]. Journal of Hydrology, 2000, 233: 154-173.
- [9] Hunter G J, Goodchild M F. Modeling the Uncertainty of Slope and Aspect Derived from Spatial Databases [J]. Geographical Analysis, 1997, 29(1): 35-49.
- [10] Oksanen J, Sarjakoski T. Error Propagation of DEM-based Surface Derivatives [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(8): 1015-1027.
- [11] Hengl H, Bajat B, Blagojević D, *et al.* Geostatistical Modeling of Topography Using Auxiliary Maps [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34: 1886-1899.
- [12] Carlisle B H. Modelling the Spatial Distribution of DEM Error [J]. Transactions in GIS, 2005, 9: 521-540.
- [13] Oksanen J. Uncovering the Statistical and Spatial Characteristics of Fine Toposcale DEM Error [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(4): 345-356.
- [14] Kellndorfer J, Walker W, Pierce L. Vegetation Height Estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93: 339-358.
- [15] Simard M, Rivera-Monroy V H, Mancera-Pineda J E, *et al.* A Systematic Method for 3D Mapping of Mangrove Forests Based on Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data, ICESat/GLAS Waveforms and Field Data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2131-2144.
- [16] Temme A M, Heuvelink G B M, Schoorl J M, *et al.* Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry. // Hengl T, Reuter H I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications [C]. Amsterdam: Elsevier, 2008. 121-140.
- [17] Kyriakidis P C, Shortridge A M, Goodchild M F. Geostatistics for Conflation and Accuracy Assessment of Digital Elevation Models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(7): 677-708.
- [18] Christensen R. Linear Models for Multivariate, Time Series, and Spatial Data [M]. New York: Springer, 2001, 393-394.
- [19] Rabus B, Eineder M, Roth A, *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission: A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003, 57: 241-262.
- [20] 李爽,姚静. 数字地形模型数据产品特点与评估分析 [J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 99-108.
- [21] 陈俊勇. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(11): 941-944.
- [22] Rosen P, Eineder M, Rabus B, *et al.* SRTM Mission Cross Comparison of X and C Band Data Properties [C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 2: 751-753.
- [23] Rosen P, Hensley S, Gurrola E, *et al.* SRTM C-band Topographic Data: Quality Assessments and Calibration Activities [C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 2: 739-741.
- [24] Smith B, Sandwell D. Accuracy and Resolution of Shuttle Radar Topography Mission Data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30: 1467-1470.
- [25] Sun G, Ranson K J, Kharuk V I, *et al.* Validation of Surface Height from Shuttle Radar Topography Mission Using Shuttle Laser Altimeter [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88: 401-411.

Correcting and Downscaling SRTM DEM Using Auxiliary Street Map and GPS Data

XIAO Fei^{1,2}, PARROT J. F.², DU Yun¹, LING Feng¹

(1. *Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;*

2. *LAGE, Instituto de Geografia, UNAM, Mexico City 04510, Mexico*)

Abstract: We developed and tested a geo-statistical methodology to correct the spatially correlated errors of SRTM DEM and downscale the spatial resolution of the DEM using auxiliary street map and GPS data in city areas. The methodology was based on geo-statistics and spatial analysis techniques in GIS. The calculation procedures were illustrated using a case study in the Xico area of Mexico City. Spatial structures of all the surface features contributing the elevation value within a single SRTM resolution cell were separated into basic components. Then the syntagmatic relationships among the basic components were evaluated and verified using GPS survey data in the study area. Afterwards, spatial relations between the structure of the basic components and the errors surface of the DEM were analyzed using GIS spatial analytical methods. From spatial analysis, the error surface of SRTM DEM proved to be spatially correlated with spatial patterns of streets in the study area. A global error of the DEM was also identified through the above process. Accordingly, the spatially correlated random errors and the global error can be located and corrected by using the auxiliary street map and GPS data. Since the auxiliary street map has finer resolution than the SRTM DEM and is spatially correlated with the error surface of the DEM, the coarse-resolution DEM in the city area can be downscaled to a finer resolution DEM according to the spatial relations between DEM and the auxiliary street map using geo-statistical methodology. The result shows that the downscaled DEM has better performance on the representation of real topography and urban structure. Even though the result was determined by the accuracy of the original DEM, the methodology presented here is effective at downscaling of spatial resolution and the correction of the spatially correlated errors for SRTM in city areas, and could be helpful in topographical information collection provided that there are deficient of other higher resolution DEMs.

Key words: SRTM; DEM; spatial resolution; error; downscale