

基于全数字摄影测量数据建立 DEM 时分辨率的确定

王 雷^{1,2}, 杨勤科^{1,2}, 龙永清², 王春梅², 郭伟玲¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要: 分辨率是栅格 DEM 的基本参数之一, 其大小直接影响到 DEM 的数据质量和地形分析的精度。采用多大的分辨率是建立和应用 DEM 时需解决的基本问题。利用全数字航空摄影测量方法, 获取了位于陕北丘陵沟壑区的实验样区的高精度地形特征点、线数据, 在此基础上, 生成了 9 种不同数据密度的点数据集。然后利用 ANUDEM 和 TIN 方法, 建立具有不同网格尺寸的 2 种 DEM 数据系列, 并提取坡度均方差, 平均坡度和高程中误差。根据坡度均方差、平均坡度和高程中误差随网格尺寸变化的规律, 确定了建立 DEM 时合适的分辨率大小。研究结果表明, 在利用全数字摄影测量方法建立 1 : 10 000 比例尺的 DEM 时, 应采用的分辨率约为 2.5 m。

关键词: DEM; 分辨率; 网格尺寸

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)05-0152-04

中图分类号: P931.1

Determining DEMs' Resolution with Digital Photogrammetric Data

WANG Lei^{1,2}, YANG Qin-ke^{1,2}, LONG Yong-qin², WANG Chun-mei², GUO Wei-ling¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: As one of basic parameters of gridded DEMs, resolution influences the quality of DEMs and the precision of terrain analysis. Choice of a suitable resolution is the basic problem to solve in generating and using DEMs. Based on the terrain features data with high precision of study area in northern Shaanxi Province, which are extracted by the full digital photogrammetry, 9 source data with different data densities to create DEMs are obtained. Two types of DEMs, i. e., ANUDEM and TIN-DEM with different grid sizes, are generated using the source data, and RMS slope, average slope and RMSE of elevation are extracted from the DEMs. According to the relationship between the grid size and RMS slope, average slope and RMSE of elevation, a suitable resolution is achieved. Results show that the suitable resolution for building DEM by the full digital photogrammetry is about 2.5 m in scale 1 : 10 000.

Keywords: DEMs; resolution; grid size

目前, 栅格 DEM 作为最基本的基础地理数据, 已被广泛应用于众多地学分析和建模中^[1-2], 水平分辨率是 DEM 的基本技术指标, 对基于 DEM 的地形分析和地学建模具有重要影响^[3-6]。尽管人们都认识到这一点, 也做了大量的工作分析其影响程度, 但是对栅格 DEM 的分辨率究竟如何确定, 仍然存在较大的争论。朱庆等^[7]研究了 DEM 的空间分辨率与地形图等高线的等高距之间的关系, 提出了一种根据等高距与地面的平均坡度确定 DEM 分辨率的方法。Hutchinson 等^[8-9]提出一种基于 DEM 信息含量的确

定分辨率的方法。刘学军等^[10]则基于理论曲面上坡度坡向误差分析, 提出了基于坡度与坡向中误差的分辨率的确定方法。Hengl 等^[11]认为对于二维数据, 合适的分辨率可以根据采样定理, 通过计算研究区域面积内等高线密度推算。汤国安等^[12]建议根据 DEM 对坡度等地形指标提取精度的影响确定 DEM 分辨率; 王东华等^[13-14]认为用相邻两条等高线之间的水平距离作为分辨率, 或根据与国外 (如美国) 相近比例尺地形图插值栅格尺寸进行类比的方法确定。目前中国测绘部门生产的国家标准 DEM 的分辨率

收稿日期: 2012-09-06

修回日期: 2012-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原小流域侵蚀沟网络的空间频谱分析”(41101264); 陕西省教育厅科研计划项目“黄土高原小流域沟道网络空间频谱研究”(11JK0740); 西北大学科学研究基金“适于区域土壤侵蚀评价的 DEM 水平分辨率研究”(10NW07)

作者简介: 王雷 (1977—), 男 (汉族), 陕西省兴平县人, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为地理信息系统、数字地形分析等。E-mail: montez@nwwu.edu.cn.

通信作者: 杨勤科 (1962—), 男 (汉族), 陕西省陇县人, 教授, 博士, 主要从事区域水土流失与 GIS 应用研究。E-mail: qkyang@nwwu.edu.cn.

确定主要采用此种方法,但在中国的 DEM 生产及建库的技术标准中并未对这种方法的理论依据进行解释与说明^[15-16]。综上所述,关于 DEM 分辨率确定方法仍需深入探讨。本文试图通过对全数字航空摄影测量所得的高精度高程数据的分析处理,分别探讨建立 ANUDEM(也称水文地貌关系正确的 DEM,即 Hc—DEM^[17-18])和基于 TIN 方法建立的 DEM(下文简称 TIN—DEM)分辨率确定的方法。

1 数据基础与研究方法

1.1 实验数据

研究区域。本研究的实验区位于陕北黄土丘陵沟壑区,总面积约为 22.2 km²,高程为 1 000 ~ 1 300 m,平均坡度约为 16°,地面破碎,地形复杂。

原始数据。所采用的原始数据是在地面分辨率 0.36 m 的数码航空相片的基础上,以 1 : 10 000 的比例尺,用全数字航空摄影测量方法,严格按照我国地形图航空摄影测量的相关规范规定的数据采集流程与误差指标,采集地形特征点、线数据。包含特征线上的采样点,共计采集具有高程的点数据 210 225

个。原始数据格式为 MicroStation 的 dgn 格式。

1.2 研究方法

本次实验的主要步骤包括数据格式处理、数据密度控制、DEM 的建立、分辨率的确定 4 个部分。

数据格式处理。将原始数据的 dgn 格式转换为 dxf 格式,然后设计程序将全部地形特征点和地形特征线上的采样点提取出来,生成记录点数据的空间位置坐标(x,y)和高程属性(z)的文本文件,最后将文本文件导入 ArcGIS,保存为 shp 格式文件。

数据密度控制。在对数据格式处理的同时,编写程序对上述点文件进行抽稀,具体的方法:根据数据范围,将上述点数据划分为 $n \times n$ 的网格,将距离网格中心点最近的点抽取出来,可将其保留作为检测点,也可将其删除,以得到较低密度的数据集。利用该程序,最后得到用于计算高程中误差的检测点(94 个)和 9 种密度的数据集。

DEM 建立。基于上述不同密度的数据集,利用 ANUDEM 软件建立多种栅尺寸 Hc-DEM,同时在 ArcGIS 环境下通过构建 TIN 的方法,建立多种栅格尺寸的 TIN-DEM。数据产品及其命名如表 1 所示。

表 1 9 种密度的数据集及生成的对应 DEM 数据

数据集	数据集 1	数据集 2	数据集 3	数据集 4	数据集 5	数据集 6	数据集 7	数据集 8	数据集 9
点数/个	133 925	144 641	156 113	168 064	180 095	191 678	201 489	207 925	210 131
数据密度/(个·km ⁻²)	6 030	6 512	7 029	7 567	8 109	8 630	9 072	9 362	9 461
Hc-DEM 名称*	ADEM1_r	ADEM2_r	ADEM3_r	ADEM4_r	ADEM5_r	ADEM6_r	ADEM7_r	ADEM8_r	ADEM9_r
TIN-DEM 名称	TDEM1_r	TDEM2_r	TDEM3_r	TDEM4_r	TDEM5_r	TDEM6_r	TDEM7_r	TDEM8_r	TDEM9_r

注:DEM 数据命名中的 r 表示栅格尺寸, $r=0.3125 \times 2^n$ ($n=0,1,2,\dots,9$; * 表示对于 Hc-DEM, $n=1,2,\dots,9$)。

分辨率确定方法。根据前期研究,利用信息含量分析法、平均坡度法和中误差分析法分析栅格尺寸的变化规律,以确定分辨率。

2 结果与分析

2.1 基于信息含量分析法的分辨率确定

这一方法为 Hutchinson 提出的基于 DEM 信息含量的确定分辨率的方法^[8-9]。其主要依据为坡度均方根(root-mean-square slope,RMS Slope)随栅格尺寸的变化规律。因为 RMS slope 参数对于采样间隔很敏感,同时具有明确的地貌学意义,因此 Hutchinson 认为在“坡度均方根—栅格尺寸”关系曲线上明显转折点对应的栅格尺寸就是 DEM 分辨率。基于上述方法,分析所获得的 Hc-DEM 的坡度均方根曲线(图 1)。

从图 1 中可以看出,随着栅格尺寸的减小,RMS

Slope 的值在逐渐增大,但栅格尺寸在小于 5~2.5 m 以后增速开始变缓。按照信息含量法的原理,Hc-DEM 的分辨率应在 5~2.5 m。同时,不论建立 DEM 时使用的采样点的密度如何,均有此规律,且不同采样点密度得到的 RMS Slope 差异很小,其原因可能是由 ANUDEM 的插值算法决定的。根据 ANUDEM 的内插算法,在栅格尺寸由大到小变化的过程中,所拟合的栅格高程值是栅格内所包含的高程点或等高线的高程平均值。在一个固定的栅格内,当地形表面一定,影响高程采样点的平均值的主要因素是采样点本身的高程值,而采样点高程值的大小主要取决于采样点在栅格内的空间位置,而不是其数目的多少。同时,RMS Slope 是各栅格点上坡度平方的均值的方根,而坡度的大小仅和格网点高程相关。在本研究中,所采用的采样点均分布在地形特征点、线上,各个密度的数据均是由采样点密度最高的数据抽稀

得到, 采样点密度的减小, 并未影响到采样点在格网内空间分布的整体特征, 因此对高程均值和 RMS Slope 的影响也就较小, 所以, 在图 1 中显示采样点密度并未对 RMS Slope 产生实质性的影响。

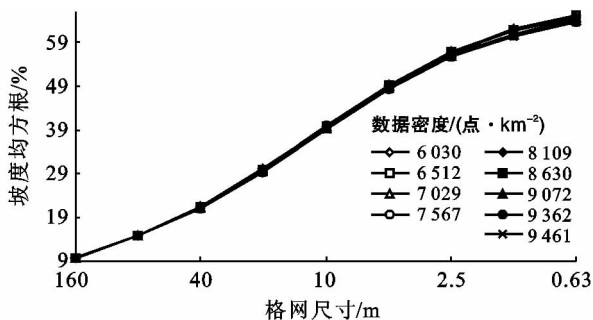


图 1 基于信息含量分析法的分辨率确定

2.2 使用平均坡度判别分辨率

上述得到的 RMS Slope 值, 是由生成 Hc-DEM 时使用的软件 ANUDEM 自动计算出来的。其他常

用的 DEM 生成软件并未提供该项参数。因此, 利用 RMS Slope 确定分辨率的方法, 对于像 ArcGIS 这样以建立不规则三角网 (TIN) 为基础, 生成 DEM 的软件来讲, 就无法应用。对于建立 TIN-DEM 而言, 如果想找一种类似 RMS Slope, 具有明确的地貌学意义且容易实现的方法来确定 DEM 的分辨率, 就必须借助于其他地形参数。基于对 ANUDEM 插值算法的认识和运用^[8,15-19], RMS Slope 的算法与栅格 DEM 的坡度计算有相似之处, 据此我们认为平均坡度应该能够代替 RMS Slope, 作为一种判别建立 DEM 的分辨率的依据。

对本研究生成的 Hc-DEM 和 TIN-DEM 提取坡度, 并统计平均坡度, 得到了与利用 RMS Slope 类似的结果 (图 2)。从图 2 中可以看出, 无论 Hc-DEM 还是 TIN-DEM, 均随栅格尺寸减小, 平均坡度增大, 且栅格尺寸在 5~2.5 m, 增速变缓。因此也可以认为, 建立 TIN-DEM 时, 使用的分辨率应在 5~2.5 m。

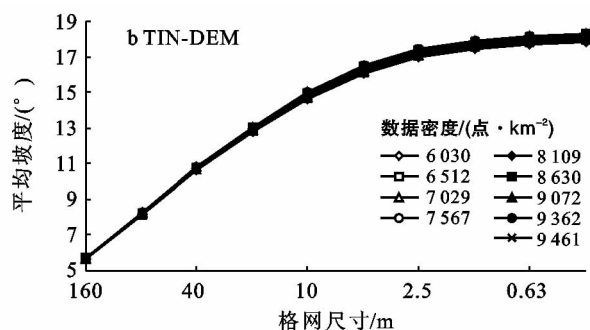
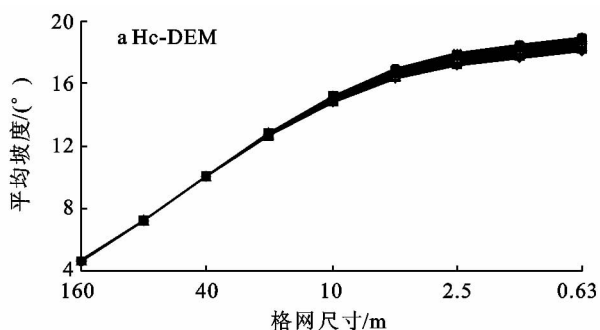


图 2 平均坡度与栅格尺寸的关系

2.3 使用高程中误差判别分辨率

上述两种方法均是从 DEM 地形参数的角度来确定 DEM 的分辨率, 为了验证上述两种方法, 我们用建立中国 DEM 时进行质量控制的主要参数——高程中误差, 来检验分辨率与中误差的关系。

首先在获取建立 DEM 的点数据时, 预留了 94 个点不参与 DEM 建立, 将其作为检测点, 然后利用这些点分别计算建立的 Hc-DEM 和 TIN-DEM 的高程中误差, 结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 尽管建立 DEM 时使用的数据密度不同, 建立的 ANUDEM 和 TIN-DEM 在栅格尺寸小于 2.5 m 以后, 高程中误差均基本达到稳定状态, 即栅格尺寸的减小基本上不影响中误差变化; 数据密度的影响则体现在, 当数据密度大于 7 000 以后, 且栅格尺寸小于 40 m 以后, 高程中误差迅速下降。图 3 中结果与利用 RMS Slope 和平均坡度得到结果基本一致, 即 2.5 m 是建立 DEM 时较为适宜的

分辨率。

利用高程中误差和使用 RMS Slope 及平均坡度所得的结果基本相同的原因, 我们分析认为, 无论是使用 RMS Slope, 还是平均坡度, 其根本的决定因素是栅格高程。正是在一定栅格尺寸水平上, 内插得到的栅格高程最终决定了栅格点上坡度的大小, 也就决定了由此派生的 RMS Slope 和平均坡度的大小。因此可以直接利用高程中误差的变化来确定建立 DEM 时的分辨率。

2.4 讨论

本研究从 RMS Slope, 平均坡度和高程中误差随栅格尺寸变化三个角度出发来探讨建立 DEM 时究竟该采用多大的分辨率的问题。针对这一问题有大量的前人研究成果, 上文所列举的仅为其中一些有代表性的方法。概括起来讲, 从不同的应用角度, 使用不同精度的数据, 采用不同的研究方法, 都会得到不同的分辨率大小。而究竟哪种方法更为合理或可靠?

这直接影响到在实际工作中对DEM的合理利用。作为描述地面高程的基础数据,DEM的高程精度应当是控制DEM质量的核心内容,而高程精度则与DEM格网尺寸紧密相关。只有弄清楚DEM的高程精度随格网尺寸变化的规律及性质,同时弄清楚高程误差的空间分布规律,才能够真正地解决上述问题。

本研究中利用了高程中误差这一常用的描述DEM高程精度指标,虽然与RMS Slope,平均坡度得到的结果基本一致,但高程中误差作为一个统计指标,仅能从统计角度描述DEM的高程精度,要真正搞清楚DEM的高程精度与分辨率关系的问题,仍需进一步深入研究。

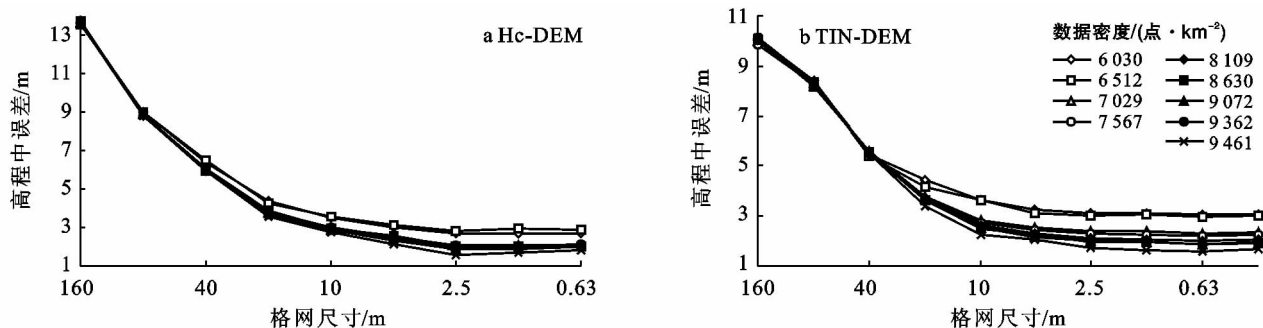


图3 高程中误差与栅格尺寸的关系

3 结论

(1) 利用 Hutchinson 建议的信息含量分析法可确定 Hc-DEM 分辨率,而平均坡度可以替代 RMS Slope 作为确定 DEM 分辨率的一种指标,或者也可以使用高程中误差与栅格尺寸的关系来确定 DEM 的分辨率。这三种方法其本质是相同的,都是反映了格网高程(或其派生信息)的统计特征随格网尺寸变化的规律。

(2) 根据上述三种方法的实验结果,基于全数字航摄数据建立 1:10 000 比例尺 DEM 时,合适的栅格分辨率应当在 2.5 m 左右。如果分辨率小于 2.5 m,高程中误差将会增大,坡度也会出现不同程度的衰减。

致谢:本次研究所使用航测数据由黄河水土保持生态环境监测中心提供,特此致谢。

[参 考 文 献]

- [1] Wilson J P, Gallant J C. Digital terrain analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000:1-27.
- [2] 汤国安,李发源,刘学军. 数字高程模型教程[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2010.
- [3] Horritt M S, Bates P D. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow[J]. Journal of Hydrology, 2001,253(1):239-249.
- [4] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling[J]. Geoderma, 2001,100(1):67-89.

- [5] Sørensen R, Seibert J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components[J]. Journal of Hydrology, 2007,347(1):79-89.
- [6] 吴险峰,刘昌明,王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报,2003,18(2):148-154.
- [7] 朱庆,李志林,龚健雅,等. 论我国“1:1 万数字高程模型的更新与建库”[J]. 武汉测绘科技大学学报,1999,24(2):129-133.
- [8] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models[C]// Proceedings of Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling. 1996.
- [9] 杨勤科,张彩霞,李领涛,等. 基于信息含量分析法确定 DEM 分辨率的方法研究[J]. 长江科学院院报,2006,23(5):21-23.
- [10] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):1-5.
- [11] Hengl T, Evans I S. Mathematical and digital models of the land surface[J]. Developments in Soil Science, 2009,33:31-63.
- [12] 汤国安,赵牡丹,李天文,等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报,2003,58(6):824-830.
- [13] 王东华,吉建培,刘建军,等. 论国家 1:50000 数字高程模型数据库建设[J]. 地理信息世界,2003,1(2):12-15.
- [14] 王东华,刘建军,商瑶玲,等. 全国 1:25 万数字高程模型数据库的设计与建库[J]. 测绘通报,2001(10):27-28.

(下转第 195 页)

- ent model scales [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005,7(4):324-338.
- [4] Zhu Axing, Mackay D S. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling [J]. Journal of Hydrology, 2001,248(1/4):54-77.
- [5] Mutiah R S, Wurbs R A. Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model [J]. Journal of Hydrology, 2002,256(3):264-285.
- [6] 李润奎,朱阿兴, Peter, 等. SWAT 模型对高精度土壤信息的敏感性研究[J]. 地球信息科学, 2007,9(3):72-90.
- [7] 文小平, 万育安, 敖天其. 土壤空间分辨率对 BTOPMC 模型径流模拟的影响[J]. 人民黄河, 2010,32(11):45-48.
- [8] Peschel J M, Haan P K, Lacey R E. Influences of soil dataset resolution on hydrologic modeling [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5):1371-1389.
- [9] Levick L R, Semmens D J, Guertin D P, et al. Adding global soils data to the automated geospatial watershed assessment tool(AGWA) [C]. Proceedings of Second International Symposium on Transboundary Waters Management, Tucson, Arizona: Routledge, 2004:1-9.
- [10] Mukundan R, Radcliffe D E, Risse L M. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,65(2):92-104.
- [11] Cho H, Olivera F. Effect of the spatial variability of land use, soil type, and precipitation on streamflows in small watersheds [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009,45(3):673-686.
- [12] Maeda K, Tanaka T, Park H, et al. Spatial distribution of soil structure in a suburban forest catchment and its effect on spatio-temporal soil moisture and runoff fluctuations [J]. Journal of Hydrology, 2006,321(1):232-256.
- [13] Loague K, Kyriakidis P C. Spatial and temporal variability in the R-5 infiltration data set: Déjà vu and rainfall-runoff simulations [J]. Water Resources Research, 1997,33(12):2883-2895.
- [14] 张奇. 湖泊集水域地表—地下径流联合模拟[J]. 地理科学进展, 2007,26(5):1-10.
- [15] Zhang Qi, Li Lijiao. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China [J]. Quaternary International, 2009,208(1/2):102-108.
- [16] Ye Xuchun, Zhang Qi, Bai Li, et al. A modeling study of catchment discharge to Poyang Lake under future climate in China [J]. Quaternary International, 2011,244(2):221-229.
- [17] Li Xianghu, Zhang Qi, Xu Chongyu. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin [J]. Journal of Hydrology, 2012,426/427:28-38.
- [18] Li Xianghu, Zhang Qi, Shao Min, et al. A comparison of parameter estimation for distributed hydrological modelling using automatic and manual methods [J]. Advanced Materials Research, 2012,356/360:2372-2375.

(上接第 155 页)

- [15] 基础地理信息数字产品 1:10 000,1:50 000 生产技术规程(第 2 部分):数字高程模型(DEM) CH/T 1015.2-2007[Z]. 北京:标准出版社.
- [16] 基础地理信息数字产品 1:10 000,1:50 000 数字高程模型 CH/T 1008—2001[Z]. 北京:标准出版社.
- [17] 杨勤科, 师维娟, Tim R M V, 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(4):1-6.
- [18] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5. 1 User Guide [Z]. The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra. 2004.
- [19] Yang Qinke, McVicar T R, Niel T G, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007,9(3):235-246.