

# 中分辨率水文地貌关系正确DEM建立方法研究 ——以黄土丘陵区为例

师维娟<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>1,2</sup>, 赵东波<sup>1,2</sup>, 卫建军<sup>1,2</sup>

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 以陕北延河流域的县南沟小流域为样区, 利用1:5万数字地形图和ANUDEM软件, 对黄土丘陵区中等分辨率水文地貌关系正确DEM的建立方法进行研究, 并从建立的DEM与基础数据比较、DEM对地形的表现能力及水系网络分析3个方面对DEM的质量进行了评价。结果表明, 利用ANUDEM和1:5万地形图插值建立的黄土丘陵区DEM 3个主要参数分别为: 分辨率10 m, 迭代次数35, 第二糙度系数0.7。从建立的DEM上提取的派生等高线与原始等高线符合度高; 并且对地形形态的描述和对地貌与水文关系的表现, 均更加准确和真实。

[关键词] 数字高程模型; ANUDEM; 分辨率; 黄土丘陵区

[中图分类号] S159

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0143-06

## The research on generating a hydrologically correct DEM of mesoscale in the loess hilly region

SHI Wei-juan<sup>1,2</sup>, YANG Qin-ke<sup>1,2</sup>, ZHAO Dong-bo<sup>1,2</sup>, WEI Jian-jun<sup>1,2</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northwestern A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The research was conducted to generate a hydrologically correct DEM of Mesoscale in the loess hilly region with the 1:50 000 digital topographic maps, including contours, spot heights and streams, and the ANUDEM software in Xian Nangou catchment of Yanhe river. The derived contours, the representation of topography and river networks were selected to evaluate the quality of the DEM. Result showed that using digital map and ANUDEM software can generate hydrologically correct DEM of meso-scale in the loess hilly region. For generating the DEM, three main parameters of ANUDEM including resolution, iteration number and 2nd roughness, were 10 m, 35, and 0.7 respectively. The derived contours and river networks were highly up to the input data. The DEM generated can correctly describe the topography characteristics and the relationship of physiognomy and hydrology.

**Key words:** DEM; ANUDEM; resolution; loess hilly region

数字高程模型(DEM)既是区域地面高程的数字表示,也是GIS数据库中赖以进行地形分析的核心数据。DEM已经在地貌定量分析、流域水文和土

壤侵蚀模拟分析等方面发挥着越来越大的作用<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术的发展,虽然DEM可以通过遥感数据直接提取,但迄今为止,最为成熟、经济可行的方

[收稿日期] 2006-07-25

[基金项目] 国家“973”计划项目(2007CB407203);国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD09B05);黄河水利委员会治黄专项(2004SZ01-04)

[作者简介] 师维娟(1981-),女,陕西眉县人,在读硕士,主要从事GIS与遥感应用研究。

[通讯作者] 杨勤科(1962-),男,陕西陇县人,研究员,主要从事基于遥感和GIS技术的区域水土流失评价研究。E-mail: qkyang@m.s.iswc.ac.cn

法是利用数字地形图插值建立DEM。目前较为成熟的插值建立DEM的方法有2种,一种是利用高程信息通过构建不规则三角网(TIN)生成DEM<sup>[3-5]</sup>。有研究表明,用此方法建立的DEM中会产生一些“平三角”,影响DEM在水文和土壤侵蚀模拟分析中的应用<sup>[6-7]</sup>。此外,为保证数据精度,必须要根据地形的特点,增加高程骨架点,该过程会增加工作量,而且受作业人员主观因素的影响较大<sup>[6]</sup>。另外一种是由Hutchinson于20世纪80年代提出的DEM插值算法<sup>[8-10]</sup>。该方法直接针对水文和土壤侵蚀分析对DEM的需要,利用地形图上的等高线、高程点和河流等数据,通过插值运算建立水文地貌关系正确的DEM(Hydrologically Correct DEMs)。与普通DEM相比,该方法建立的DEM能准确地表现水文地貌特征,其提取的河流网络、流域边界及坡度等参数,其准确性和精度均更高<sup>[7,11]</sup>。此方法在国外受到了广泛关注<sup>[12-13]</sup>,国内近年对其也有少量应用和介绍<sup>[7,10,14-16]</sup>。本试验以黄土丘陵区为例,利用1:5万数字地形图和ANUDEM软件对建立中等分辨率水文地貌关系正确的DEM方法进行了研究,以期对区域水土流失评价及其相关研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与基础数据

1.1.1 研究区域 研究区位于黄土高原延河流域2级支流——县南沟流域,属典型的黄土丘陵沟壑区。该区地面破碎,地面坡度陡峻。据1:1万DEM量算<sup>[16]</sup>,25~45°坡地占流域面积的62.4%。

1.1.2 基础数据及其预处理 本研究所用的基础数据是1981年国家测绘局编制的1:5万地形图,其等高线间距为20 m<sup>[17]</sup>。对试验样区所涉及图幅数字化、投影换算(高斯投影),图幅拼接后将县南沟流域切割出来(试验样区面积为119.5 km<sup>2</sup>),在ARC/INFO中将各图层(等高线、高程点、水系)转换成ANUDEM可以读取的文件格式。为了与TIN方法建立的DEM进行比较,还收集了利用1:5万地形图和TIN方法建立的25 m分辨率DEM(DEM<sub>t</sub>)<sup>[3-5]</sup>。

### 1.2 插值方法(ANUDEM)简介

ANUDEM是澳大利亚国立大学开发的专业化DEM插值软件<sup>[9-10]</sup>。该软件采用了迭代有限微分插值算法,既保留了局部算法的优点,又具有整体插值算法的表面连通性。该算法计算结果受到用户规定粗糙度罚函数(roughness penalty)的制约,使得输

出的插值更接近真实地表。与一般插值技术相比,该软件能利用地形强化算法以及输入的河流数据,自动去除伪下陷点,确保输出DEM在地形形态及水系结构的正确表现,克服了一般插值算法生成的DEM不能完全适应水文分析的缺陷<sup>[9]</sup>。这种插值技术简单易操作,只需将等高线、高程点、河流等信息输入到软件中,再设置好各参数运行,即可输出高质量的DEM。

### 1.3 ANUDEM关键参数的确定

用ANUDEM软件建立DEM,输入高质量的数据和利用优化的参数是两个十分重要的方面。可参照文献[14]的方法进行数据质量的检查与校改,故本研究只对参数的优化进行讨论。运行ANUDEM生成DEM,需要设置的参数有10多个<sup>[9-10]</sup>,其中与数据和插值地区地形特征有关、需要用户率定的参数有3个,即分辨率、迭代次数和糙度系数。通过多次运行ANUDEM系统,对上述3个参数进行优化,这是建立DEM的关键。

1.3.1 分辨率 在一定地理区域、一定比例尺条件下,能读取基础数据全部地形信息量,并能最大限度反映地形特征的DEM栅格尺寸称为DEM分辨率<sup>[18]</sup>。本研究采用信息含量分析法确定分辨率<sup>[18-19]</sup>,具体方法是利用ANUDEM输出的文件,点绘“坡度均方差—栅格尺寸”关系曲线,该曲线上转折明显点处的栅格尺寸即为分辨率。

1.3.2 迭代次数 ANUDEM采用了多分辨率插值算法,每个分辨率的插值通过有限差分方程实现<sup>[11]</sup>,用户需根据插值区的地形特征设置合适的迭代次数。对每个栅格尺寸的插值运算,系统运行记录文件中记录了一个统计参数——剩余新数据行数(Number of Last New Lines),其值随着运算过程不断减小。该值越小说明后续迭代对DEM的影响越小,因而DEM也越稳定。

1.3.3 糙度系数 为了有效地消除数据错误对插值的影响,克服拟合过程生成的非真实地形,ANUDEM引入了粗糙度罚函数,使预测值接近测量值,同时使拟合表面平滑。粗糙度罚函数是通过设置第1和第2糙度系数实现的。据ANUDEM手册,如以等高线为主进行插值,则第1糙度系数一般为0;第2糙度系数( $R_n$ )要根据读者自己的数据和应用做出选择。在以往的研究中,采用了统计学、地貌学和误差分析等方法确定<sup>[14-15]</sup>。本研究将综合上述几种方法,确定 $R_n$ 值。

(1) 统计学分析和地貌学分析。在试验样区生成

不同  $R_n$  值(0, 0.1, 0.2, ..., 0.9)的DEM中,对其上的地形强化数和伪下陷点数及派生河流总长度分别进行统计分析。对水文分析和数字地形分析而言,地形强化数越大,伪下陷点数越少,则生成的DEM越理想。同时,在不同  $R_n$  值生成的DEM中选择典型地貌特征点(包括梁峁顶、鞍部、沟头、沟口)和特征线(梁脊线),在其上读取这些特征点和线的高程值,分析DEM高程随  $R_n$  的变化情况。

(2) 误差分析。在试验样区随机选择均匀分布的高程点,令其不参与插值运算,最后将其高程值与第2糙度系数不同取值生成DEM相应点的模拟高程值相比,分别计算其平均差,误差越小,DEM模拟效果越好,则表明第2糙度系数取值越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 ANUDEM 关键参数的确定

2.1.1 分辨率 由图1可知,坡度均方差与栅格尺寸关系曲线上转折比较明显的点出现在栅格10m处,所以选择10m为该区的分辨率。

2.1.2 迭代次数 由图2和图3可知,随迭代次数

的增加,运行时间基本呈直线快速增加,地形强化数也基本呈增加的趋势。当迭代次数为10~25时,剩余新数据行数和伪下陷点数急剧下降;之后随迭代次数增加,剩余新数据行数和伪下陷点数逐渐递减;当迭代次数为35~45时,剩余新数据行数和伪下陷点数基本趋于稳定,考虑到系统运行时间的影响,该样区选用35次作为最佳迭代次数。

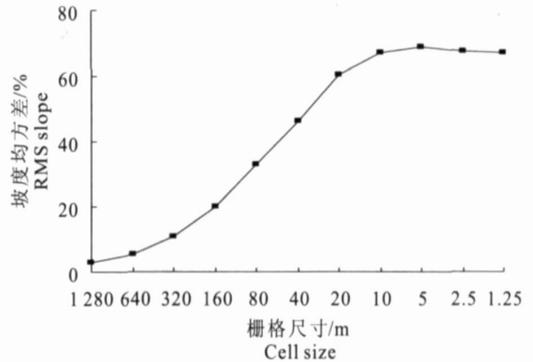


图1 坡度均方差与栅格尺寸关系曲线

Fig. 1 Relation curve of cell size and RMS slope

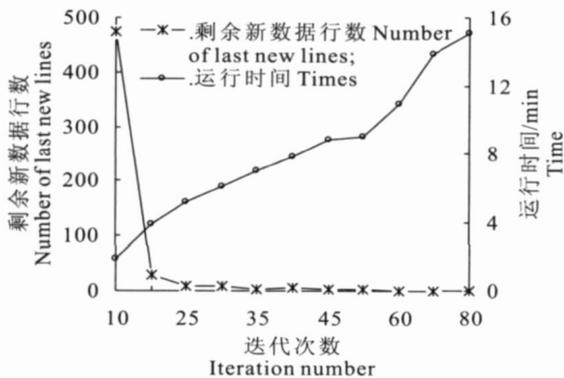


图2 迭代次数对剩余新数据行数和运行时间的影响

Fig. 2 Effect of iterations on last new lines & running time



图3 迭代次数对地形强化数和伪下陷点数的影响

Fig. 3 Effect of iterations on drainage enforcement & sinks

2.1.3 糙度系数  $R_n$  对地貌特征的影响见图4。图4表明,随  $R_n$  值的增加,梁峁顶、梁脊线和鞍部的相对高程增加,沟头和沟口的相对高程降低。说明  $R_n$  值越大,生成的DEM表面上地形起伏越大。

$R_n$  对地形强化数和伪下陷点数的影响见图5。图5表明,随着  $R_n$  值的增加,伪下陷点数维持在150~160,  $R_n=0.7$  之后开始急剧增加;地形强化数先减少后增加,在  $R_n=0.6$  时达最大,之后开始减少,当  $R_n=0.8$  后急剧减少。

当  $R_n$  为0~0.8时,随  $R_n$  值增加,提取河流总长度总体呈递减的趋势,在  $R_n=0.8$  时降至最低,之后又急剧增加,可能是由于  $R_n=0.8$  以后,系统开始不稳定并引入了一些误差所致。

本试验用随机均匀选择的两组高程样点做误差分析,结果如图7所示。由图7可知,两组样点的平均绝对误差基本上均随着  $R_n$  值的增加而呈减少趋势,当  $R_n=0.8$  时降至最小,说明DEM的精度随着  $R_n$  值的增加而增加;当  $R_n > 0.8$ , 两组样点的平均绝对误差又逐渐增加,说明  $R_n$  值应小于0.8。

综合上述分析可知,当  $R_n$  值为0.7时,地形强化系数较高,伪下陷点数较少,生成的DEM 精度较高

且系统稳定未引进新的误差。因此,该样区第二精度系数  $R_n$  取值为0.7。

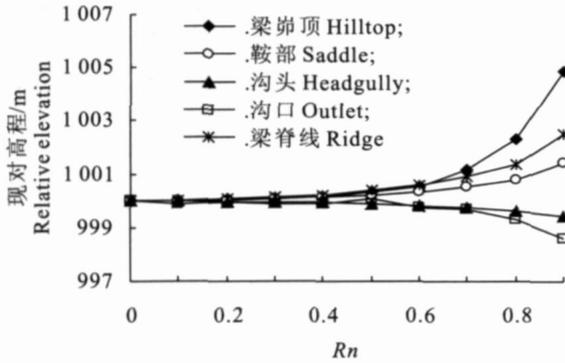


图4  $R_n$  对地貌特征的影响

Fig.4 Effect of  $R_n$  on geomorphologic features

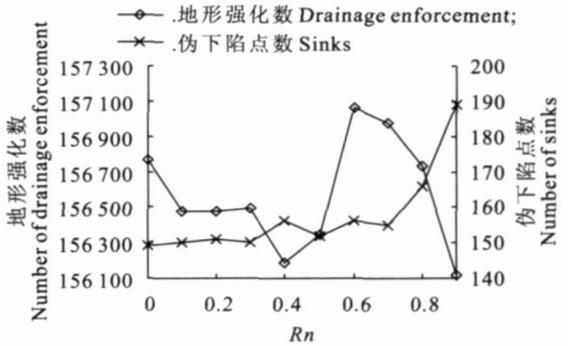


图5  $R_n$  对地形强化数和伪下陷点数的影响

Fig.5 Effect of  $R_n$  on drainage en. and sinks

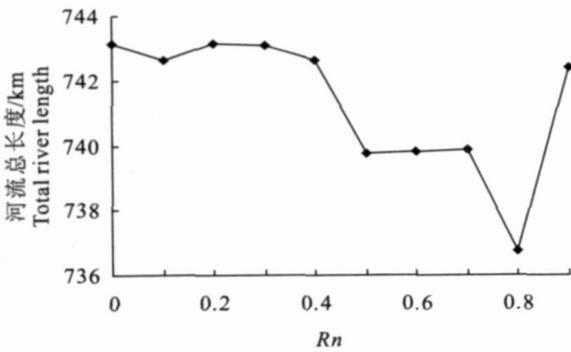


图6  $R_n$  对提取河流总长度的影响

Fig.6 Effect of  $R_n$  on total length of derived rivers

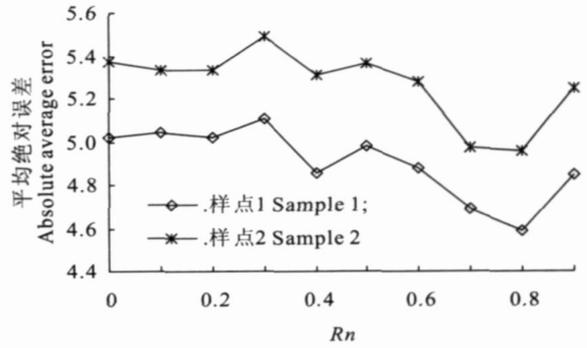


图7  $R_n$  对高程平均绝对误差的影响

Fig.7 Effect of  $R_n$  on elevation error

### 2.2 DEM 的建立及质量评价

将2.1确定的3个关键参数及经过检查编辑好的高质量1:5万地形图数据输入到ANUDEM软件中运行,即可得到高质量的DEM(简称DEM<sub>a</sub>)。通常DEM质量检查方法有目视检查、交互检查、自动检查和影像分析检查4种<sup>[2]</sup>。本研究用简单的目视检查方法,从建立的DEM与基础数据比较、DEM对地形的表现能力及水系网络分析3个方面对DEM的质量进行评价。

2.2.1 DEM与基础数据的比较 在利用上述参数生成的DEM中提取20m等高距的派生等高线,将其与输入的原始等高线比较,结果如图8所示。

从图8可以看出,派生等高线与输入等高线弯曲趋势一致,位置也基本重叠,符合度较高。计算的派生等高线总长为2936.827km,派生等高线的密度为25.77km/km<sup>2</sup>,与输入等高线密度(26.39km/km<sup>2</sup>)接近。说明此方法建立的DEM基本保留了输入数据的信息,可以确保地形形态的正确表现。

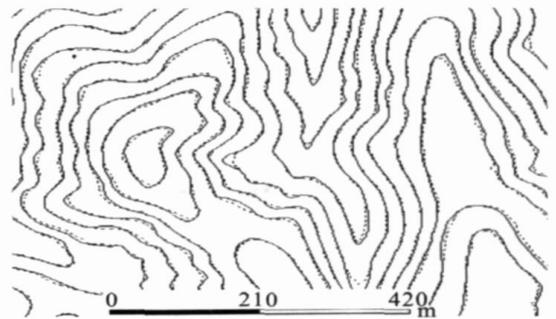


图8 原始等高线与派生等高线的比较

—·—·—· 原始等高线; ———— 派生等高线

Fig.8 Comparison between derived contours & digital contours

—·—·—· Digital contour; ———— Derived contour

2.2.2 DEM对地形的表现能力 从ANUDEM建立的DEM(DEM<sub>a</sub>)光照模拟图(图9)可以看出,此方法建立的DEM山脊、沟道地形连续,且无平三角现象出现,真实地反映了地形的形态。基于DEM<sub>a</sub>和DEM<sub>b</sub>(由TINDEM建立的DEM)提取的坡度分别为

$SLP_a$  和  $SLP_t$ 。由表1可知,  $SLP_a$  和  $SLP_t$  在  $0 \sim 5^\circ$  坡所占比例和平均坡度有较大的差异。与基于大比例尺DEM提取的坡度  $SLP_{a_0}$  相比<sup>[16]</sup>,  $SLP_a$  的平均值、均方差及  $0 \sim 5^\circ$  坡所占比例更接近  $SLP_{a_0}$ 。由图10可见,  $SLP_a$  与  $SLP_{a_0}$  在  $0 \sim 5^\circ$  坡的频率曲线分布也比较接近。 $SLP_a$  的最大值小于  $SLP_{a_0}$ , 可能是由于制图综合的原因。由此可知, ANUDEM建立的DEM能很好地反映地形的形态和起伏。

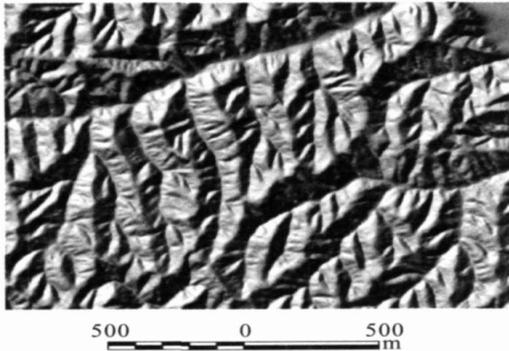


图9 ANUDEM建立的DEM光照模拟图  
Fig. 9 Hillshade of the constructed DEM

表1 基于不同DEM提取的坡度统计表

Table 1 Statistics of slope derived from different DEMs

项目 Item	最大值 Max	平均值 Mean	均方差 Stdevpa	0~5坡 所占比例/% Percentage of 0~5° slope
$SLP_t$	59.876	23.082	9.787	5.414
$SLP_a$	60.818	25.326	10.278	2.917
$SLP_{a_0}$	74.919	28.897	12.098	2.204

注:  $SLP_t$  为基于TINDEM提取的坡度;  $SLP_a$  为基于ANUDEM提取的坡度;  $SLP_{a_0}$  为基于大比例尺DEM提取的坡度。

Note:  $SLP_t$  is slope derived from TINDEM;  $SLP_a$  is slope derived from ANUDEM;  $SLP_{a_0}$  is slope derived from large-scale DEM.

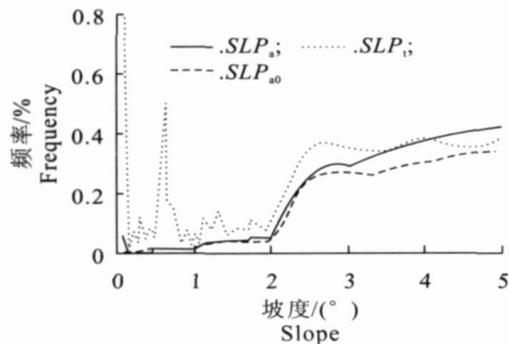


图10 基于不同DEM提取的0~5坡度频率曲线  
Fig. 10 Frequency curve of 0~5° slope derived from different DEMs

沟壑区最明显和最重要的地理特征之一, 正确提取河流水系在流域水文和土壤侵蚀模拟中具有重要的实际意义。从图11可以看出, 在本研究建立的DEM提取水系网络中, 河流基本连续, 很少有梳状平行河流出现。提取的水系与输入河流位置基本重叠, 偏移少, 而基于DEM<sub>t</sub><sup>[3-5]</sup>提取的水系网络中, 水系与输入河流位置有些偏移。说明本研究建立的DEM能正确反映地貌与水文的关系。

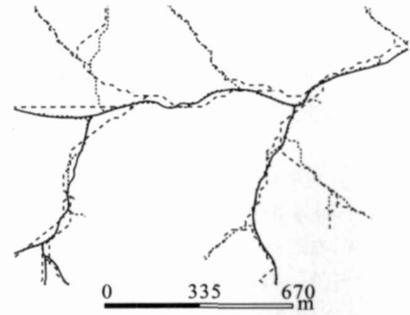


图11 基于不同DEM提取的水系网络图

——. 输入河流; ——. 基于ANUDEM提取的河流;  
——. 基于TINDEM提取的河流

Fig. 11 Derived river network & digital river derived from different DEMs

——. Input river; ——. River derived from ANUDEM;  
——. River derived from TINDEM

### 3 结论与讨论

建立水文地貌关系正确的DEM, 是大流域水文模型和区域尺度土壤侵蚀评价等研究的基础。本研究结果表明, 利用已有数字化地形图和ANUDEM软件, 可以在黄土丘陵区生成中分辨率水文地貌关系正确的DEM; 用1:5万地形图数据和ANUDEM软件建立的DEM 3个基本参数分别为: 分辨率10 m, 第二精度系数0.7, 迭代次数35, 所建立的DEM派生等高线与原始等高线符合度高; 并且对地形形态(坡度)的描述和对地貌与水文关系的表现均更加准确和真实; 从建立的DEM上提取水系网络, 更符合地形图上的水系网络。这种DEM可以为水文和土壤侵蚀模拟分析以及其他相关科研提供更直接的数据支持。

分辨率的确定是DEM建立的最主要问题之一, 本研究分辨率的确定是根据信息含量法估计的<sup>[17-18]</sup>, 与我国目前使用的25 m分辨率不同<sup>[4]</sup>。本研究对于DEM精度的评价也还比较初步, 这些均应予以进一步的研究。另外, 还应在更多地貌类型

区,应用 ANUDEM 建立中等分辨率 DEM,并与已经建立的 DEM 进行比较分析,以便形成具有可操作性的工作流程和方法,通过改善 DEM 的质量,为数字地形分析、流域水文和土壤侵蚀定量模拟等提供支持。

### [参考文献]

- [1] Wilson J P, Gallant J C. Terrain analysis, principles and applications[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [2] 李志林,朱庆.数字高程模型[M].武汉:武汉大学出版社,2000.
- [3] 唐新明,李莉,季小燕,等.全国七大江河流域重点防范区 1:1 万数字高程模型(DEM)数据库的建[J].测绘通报,2002(6):19-22,55.
- [4] 王东华,吉建培,刘建军,等.论国家 1:50 000 数字高程模型数据库建设[J].地理信息世界,2003,1(2):12-15,20.
- [5] 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):27-28,31.
- [6] 赵帮元,汤国安,马安利,等.不同地貌类型区 1:25 万比例尺 DEM 的建立方法[J].水土保持通报,2002,22(2):45-48.
- [7] 周买春,黎子浩, Jayawardena A W. 数值地形图的生成及其水文地貌特征评价[J].水利学报,2002(2):71-74,78.
- [8] Hutchinson M F. New procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. Journal of Hydrology, 1989, 106(3-4):211-232.
- [9] Hutchinson M F. ANUDEM version 5.1 user guide[M]. Canberra: Centre for resource and environmental studies, Australian National University, 2004.
- [10] 杨勤科, Mcvicar T R, 李领涛,等. ANUDEM —— 专业化数字高程模型插值算法及其特点[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):36-41.
- [11] Clarke S, Burnett K. Comparison of digital elevation models for aquatic data development [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(12):1367-1375.
- [12] U S Geological Survey. Hydrok Elevation Derivative Database [DB/OL]. [2006-04-20]. <http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/hydro/index.html>.
- [13] Hutchinson M F, Stein J A, Stein J L. Upgrade of the 9 second digital elevation model for Australia[M]. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, 2001.
- [14] Yang Q K, VanNiel T G, Mcvicar T R, et al. Developing a digital elevation model using ANUDEM for the Coarse sandy hilly catchments of the loess plateau, China[M]. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report, 2005.
- [15] 张彩霞,杨勤科,段建军.用数字地形图和 ANUDEM 建立高分辨率 DEM 方法研究[J].水利学报,2006,37(8):1009-1014.
- [16] 张彩霞,杨勤科,段建军.一种高质量的数字地形模型建立方法——ANUDEM 法[J].中国农学通报,2005,21(12):411-415.
- [17] 国家测绘局. GB/T 20257.3-2006 国家基本比例尺地图图式第三部分 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 地形图图式[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [18] 杨勤科,张彩霞, Tim T, 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):23-26.
- [19] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models [C]. Third Conference Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Barbara: NCGIA, University of California, 1996.