

# ANUDEM 和 TIN 两种建立 DEM 方法的对比研究

杨勤科<sup>1,2</sup>, Tim R. McVicar<sup>3</sup>, Tom, G. Van Niel<sup>4</sup>, 李领涛<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 澳大利亚 联邦科工组织水土资源研究所 堪培拉; 4. 澳大利亚 联邦科工组织水土资源研究所 珀斯)

**摘 要:** 针对流域水文和土壤侵蚀定量模拟分析需要, 对基于 TIN 和 Hutchinson 方法建立的 DEM 表现地形形态和起伏的能力进行了对比研究。结果表明, 基于 TIN 建立的 DEM 始终存在一些平顶现象, 一些较小的侵蚀沟被忽略, 其上提取的河流不完全连续, 多处出现多重线条河流, 因而不能如实地反映地形起伏的细部特征。而基于 ANUDEM 建立的 DEM, 其派生等高线的形状与输入等高线吻合较好, 较好地表现了地形的形态和起伏, 对地形和坡度的反映更加连续和光滑, 其上提取的河流信息基本与地形图上的河流一致。

**关键词:** 黄土高原; 数字高程模型 (DEM); ANUDEM

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2006)06-0084-05

中图分类号: P237

## Comparison of Hydro-geomorphology Representing Between DEMs by TIN and ANUDEM Approaches

YANG Qin-ke<sup>1,2</sup>, Tim R. McVicar<sup>3</sup>, Tom G. Van Niel<sup>4</sup>, LI Ling-tao<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. CSIRO Land and Water, Canberra, 2601, ACT, Australia; 4. CSIRO Land and Water, Wembley, 6913, WA, Australia)

**Abstract:** Mainly considering the demand of regional soil erosion and hydrological modeling, the DEMs generated from TIN and Hutchinson's method (ANUDEM), and their representation of the hydro-geomorphology characteristics have been compared. The results show that, in the TIN DEM, there are inevitably flat hilltops, some eroded gullies have been ignored during TIN constructing, the stream networks based on the DEM is not continuous, and multiple lines rivers exist. In Hutchinson method based DEM, the DEM derived contours match to the original input contours, and the relief and slope can be represented smoothly and continuously. Therefore, the hydro-geomorphological features can be represented correctly even no rivers input to drive ANUDEM.

**Keywords:** Loess plateau; digital elevation model (DEM); ANUDEM

## 1 引言

数字高程模型 (DEMs) 是利用一组有序数据阵列对地表高度空间变化的定量表现<sup>[1]</sup>。DEM 在地貌定量分析、流域水文和土壤侵蚀模拟分析、工程设计、遥感图像辅助分类等方面具有重要用途<sup>[1-4]</sup>。基于数字地形图, 通过插值建立规则网格的 DEM, 是迄今为止最为成熟和经济实用的 DEM 建立方法。常见插值方法有 2 种, 一是不规则三角网 (TIN) 方法, 即基于数字地形图, 通过多层高程信息构建 TIN, 再将 TIN 插值得到规则网格的 DEM。这种方法简单易

用, 在我国得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>。二是国外比较流行的 ANUDEM 方法, 即利用等高线、高程点、河流等基本地形信息, 通过插值生成 DEM<sup>[8-10]</sup>。这种方法生成的 DEM, 可全部或部分清除地形伪下陷点, 合理表现地表高程的连续与突变, 强调坡向转折 (流域边界线和沟底线), 保证流水线的连续性和流域边界的准确等。被称为是一种水文地貌关系正确 (Hydrologically Correct) 的 DEM 建立方法。这种方法在我国已有少量介绍和研究报道<sup>[10-12]</sup>。本文以黄土丘陵区为例, 用上述 2 种方法建立 DEM 并对其对比研究, 以期为我国 DEM 建立和应用提供参考。

收稿日期: 2006-07-25

修稿日期: 2006-08-10

资助项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目“水土流失动态监测与评价关键技术” (2006BAD09B05); 黄委会治黄专项二级课题“区域水土流失模型试验研究” (2004SZ01-04)

作者简介: 杨勤科 (1962—), 男 (汉族), 陕西省陇县人, 主要从事区域水土流失定量评价和遥感 GIS 应用研究。电话 (029) 87019577, E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn。

2 方 法

(1) 基础数据。本研究利用国家基础地理信息中心生产的 1:25 万数字地形图作为基本数据源。在 ARC/INFO 系统中对等高线、高程点和河流进行了查错和编辑处理。最终使等高线、高程点无错误,河流方向由高到低且与等高线关系正确。研究区域位于典型的黄土丘陵区域,地形起伏大,相对高差 100~200 m,是我国乃至世界上水土流失最严重的地区。试验样区面积 266 km<sup>2</sup>,高程范围 1 300~1 700 m,等高距 100 m。

为了更好地表现地形的起伏,仿效 1:1 万和 1:5 万 DEM 建立方法,利用 DeMix 软件生成了骨架点(地形特征点)并参与构 TIN。

(2) DEM 建立。利用 TIN 和 ANUDEM 方法建立了 2 组 100 m 分辨率 DEM(表 1)。前者通过多要素构 TIN,再内插的方法建立,在 ARC/INFO 系统中用 createtin 和 tinlattice 两个操作完成(weed 设为 1,proximal 设为 0.5)。后者利用 ANUDEM<sup>[9-10]</sup>方法完成。

这 2 种方法均使用了 100 m 作为栅格尺寸,ANUDEM 的运行利用了文献[11]的参数值,即迭代次数取 40,第二糙率系数取 0.8,分辨率取 100 m。分辨率的确定同时也考虑了与国家基础地理信息中心建立的 DEM 相协调。

(3) 不同方法建立的 DEM 对比分析。在 ARC/INFO 环境下,生成坡度、光照模拟、河流和派生等高线等,同时与输入等高线和河流层对比,分析其对地形形态和起伏表现能力的差异。

表 1 不同方法建立的 DEM 及其数据

方法	No	DEM 名称	输入数据	插值方法
第 1 组	11	DEM <sub>t1</sub>	等高线、高程点	TIN
	22	DEM <sub>t2</sub>	等高线、高程点和地形特征点	TIN
第 2 组	11	DEM <sub>a1</sub>	等高线、高程点	ANUDEM
	12	DEM <sub>a2</sub>	等高线、高程点和河流	ANUDEM

注:第 1 组为用 TIN 方法插值生成 DEM(DEM<sub>tx</sub>);第 2 组为用 ANUDEM 方法插值生成 DEM(DEM<sub>ax</sub>)。

3 结果与分析

3.1 对地形起伏的描述

尽可能如实反映地表的起伏及其结构特征,是对 DEM 的基本要求。这 2 组 DEM 高程信息(包括输入数据的高程信息)统计分析表明(表 2),DEM<sub>tx</sub>高程最小值与输入数据一致,其余统计特征值有所降低。DEM<sub>ax</sub>由于地形强化处理的影响,高程最小值降低 16~70 m(沟道更低),高程最大值降低 3.6 m(山顶稍有降低)。DEM<sub>ax</sub>高程标准差略大于 DEM<sub>tx</sub>,说明相比之下 DEM<sub>ax</sub>表面高差较大。这种差别在两种 DEM 差值表面上具有清晰的显示(图 1),DEM<sub>t1</sub>(无骨架点构 TIN 的 DEM)沟道部分较高,而在梁峁顶部高程较低(图 1a)。添加骨架点后,沟道部位普遍降低,但是梁峁部位变化不大。从光照模拟图像(图 2)可见,DEM<sub>tx</sub>有比较多的平顶(梁峁顶)存在,加入地形特征点可以减少这种平顶但是不能完全避免。基于 ANUDEM 插值得到的 DEM,则是圆滑的,基本无平顶存在,而是否有河流参与插值对其影响并不明显。

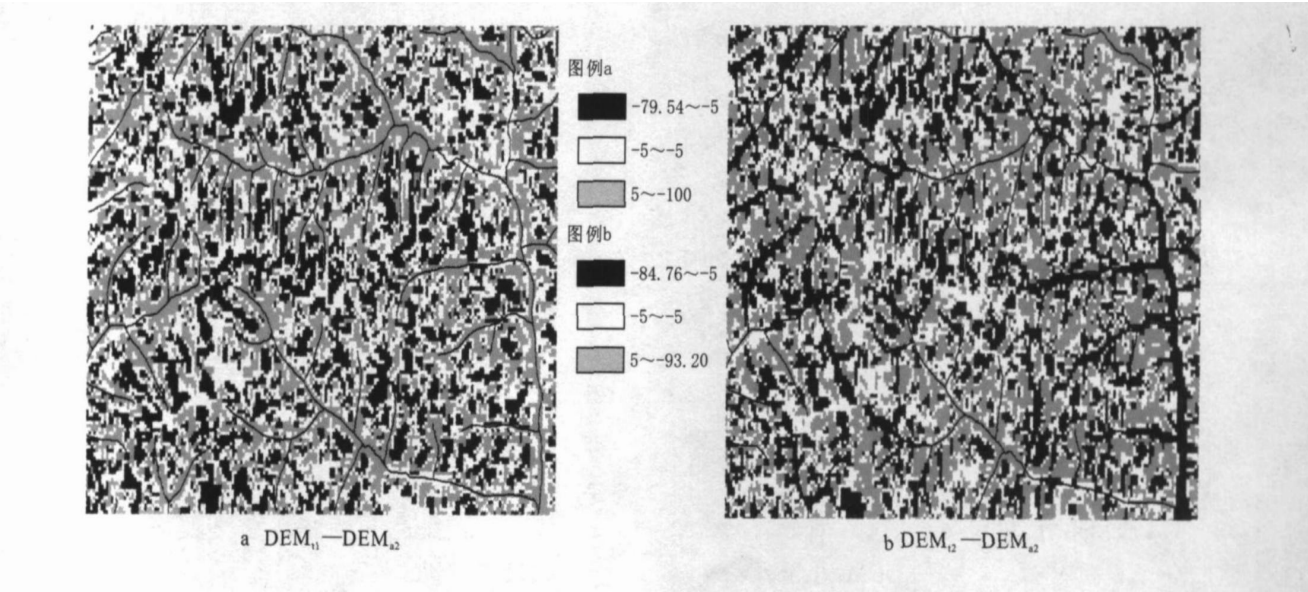


图 1 TINDEM 与 ANUDEM 比较

表 2 不同方式建立的 DEM 对高程的反映

统计值	DEM <sub>a1</sub>	DEM <sub>a2</sub>	DEM <sub>t1</sub>	DEM <sub>t2</sub>	输入信息
最小值	1238.083	1268.479	1300.000	1209.324	1300.000
最大值	1748.313	1748.361	1749.442	1751.273	1752.000
平均值	1496.670	1496.733	1498.402	1496.801	1534.632
标准差	99.350	99.068	94.908	101.295	105.217

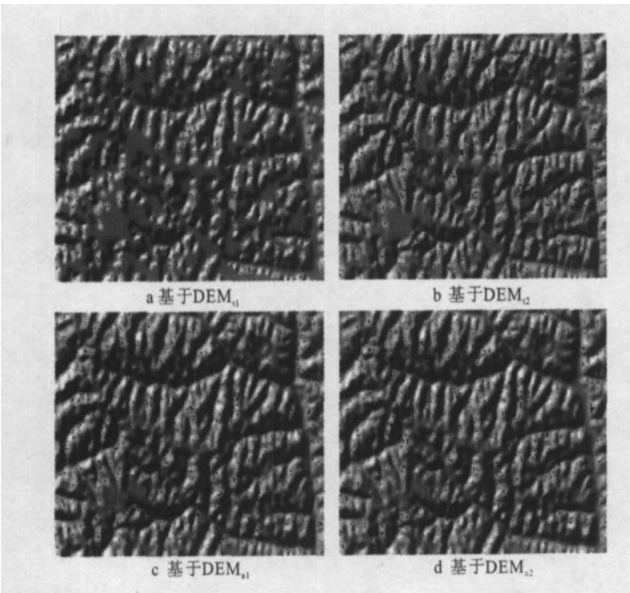


图 2 两种 DEM 对地形的反映

派生等高线与输入等高线的比较可见(图 3),基于 TIN 的 DEM 所派生的等高线,与原始等高线差异比较大,一些较小的侵蚀沟被忽略,因而等高线总体

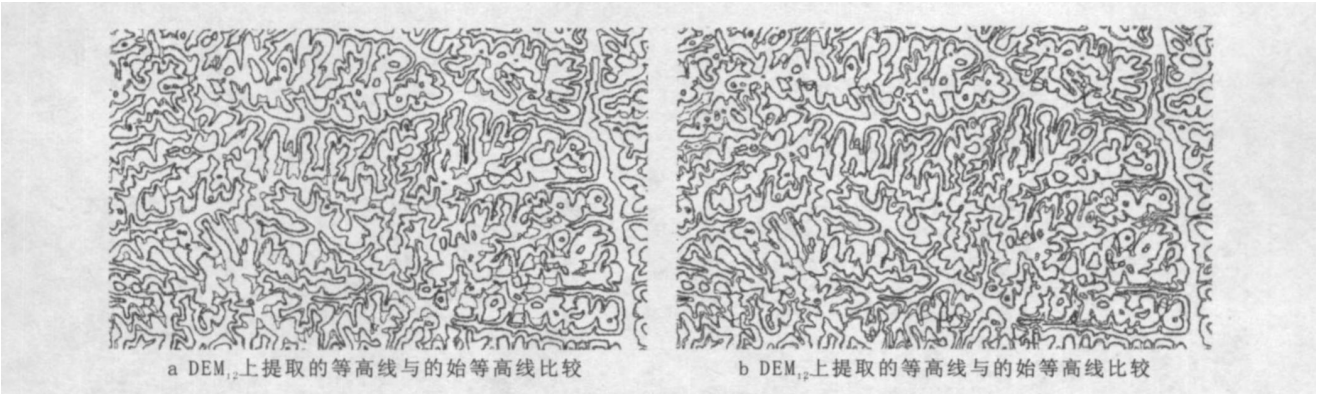


图 3 从 DEM 上派生的等高线的比较

从坡度分布频率看(表 4),在很缓和很陡坡度段( $<3^{\circ}$ 和 $>33^{\circ}$ )ANUDEM 占比例比较小,而中间部分占比例较大,分布更加集中。而在 DEM<sub>tx</sub>上, $0^{\circ}$ 坡度面积比较大,无骨架点和有骨架点建立的 DEM 分别为 19.93 %和 1.28 %。

从累计频率看,坡度在  $5^{\circ}$  以内的面积,DEM<sub>tx</sub>大于 DME<sub>ax</sub>,而在  $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  以内则 DEM<sub>tx</sub>小于 DME<sub>ax</sub>(详见图 4 及表 4)。

趋势有所圆滑。而基于 ANUDEM 的 DEM 表面派生的等高线,则比较好地保留了等高线的基本形状,与原始等高线具有良好的吻合,说明这一 DEM 较好地表现了地形的起伏。

3.2 对坡度的反映

如实反映坡度的陡缓,是 DEM 的又一基本要求。由各种方法 DEM 的坡度统计特征值(表 3)可见,DEM<sub>ax</sub>的坡度平均值略大于 DEM<sub>tx</sub>的坡度平均值,但是坡度最大值、标准差则小于 DEM<sub>tx</sub>。说明 DEM<sub>ax</sub>更加连续和光滑。DEM<sub>tx</sub>坡度的变化具有更大的突变性(图 4)。因为这一原因,坡度表面边沿呈明显的带状,而 DEM<sub>ax</sub>坡度图边沿不明显。

表 3 不同方式建立的 DEM 对坡度的反映

特征值	slp- <sub>a1</sub>	slp- <sub>a2</sub>	slp- <sub>t1</sub>	slp- <sub>t1</sub>
最小值	0	0	0	0
最大值	43.460	43.219	46.074	46.668
平均值	15.407	15.263	10.606	11.709
标准差	8.627	8.826	11.117	10.544

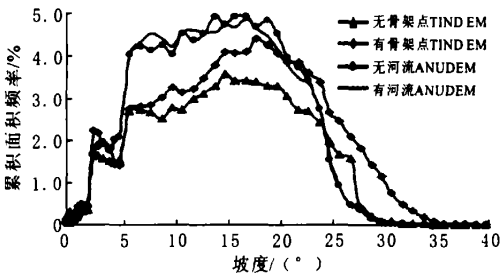


图 4 不同方式 DEM 对坡度的反映

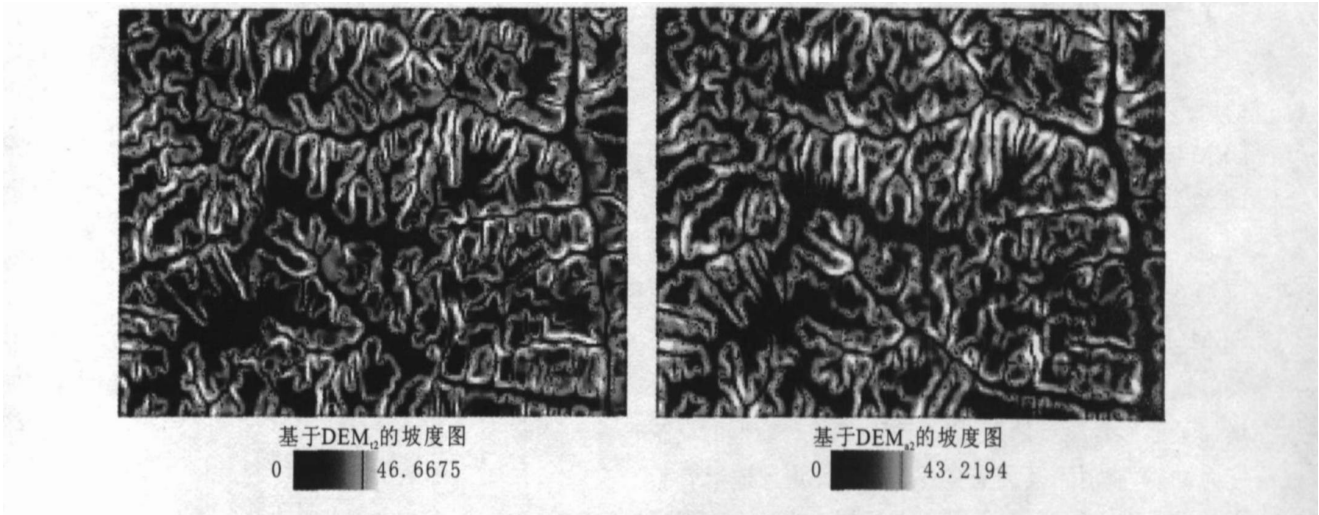


图 5 不同方法 DEM 坡度的比较

表 4 不同方式 DEM 对坡度特征的反映

坡度分级/(°)	频率				累计频率			
	DEM <sub>a1</sub>	DEM <sub>a2</sub>	DEM <sub>t1</sub>	DEM <sub>t2</sub>	DEM <sub>a1</sub>	DEM <sub>a2</sub>	DEM <sub>t1</sub>	DEM <sub>t2</sub>
0	0.00	0.07	19.93	1.28	0.00	0.07	19.93	1.28
0.0~0.5	0.65	0.78	2.25	1.08	0.65	0.85	22.19	2.36
0.5~1.0	1.03	1.03	2.33	1.72	1.69	1.88	24.52	4.08
1.0~2.5	4.69	4.68	5.52	6.63	6.37	6.55	30.04	10.71
2.5~5.0	9.60	9.81	7.60	8.70	15.97	16.37	37.65	19.41
5.0~10.0	20.39	21.25	13.26	14.53	36.36	37.62	50.91	33.93
10.0~15.0	22.76	22.67	15.55	17.55	59.12	60.29	66.46	51.49
15.0~25.0	38.80	37.33	29.40	37.77	97.92	97.62	95.86	89.26
25.0~35.0	2.08	2.38	4.12	10.63	100.00	100.00	99.98	99.88
35.0	0.00	0.00	0.02	0.12	100.00	100.00	100.00	100.00

3.3 对沟道特征的反映

沟壑密集是所有流水侵蚀地区的重要地理特征。准确提取流水线或者沟道信息,是 DEM 在流域水文和土壤侵蚀模拟分析中应用的基本要求。为此基于已经生成的 4 个 DEM,提取了流水线信息(图 6)。可见,利用 DEM<sub>tx</sub>提取的流水线出现了 3 个问题,一是流水线不完全连续;二是多处出现多重线条的流水线(平行梳状);三是流水线与等高线关系不好。这是

由于通过构建 TIN 生成的 DEM,在流水线部分没有一个明显的坡向转折,纵使在地形骨架点层沿流水线增加了一系列的高程点,也不能保证有一个局地最低点沿河道生成。因而也就不能提取一个令人满意的流水线信息。而在基于 ANUDEM 生成的 DEM 产品上,由于河流参与下的地形强化作用,DEM 上高程在河流所经过之处,会形成一个坡向的明显转折,即存在局地最低点,因此保证了流水线的连续性。

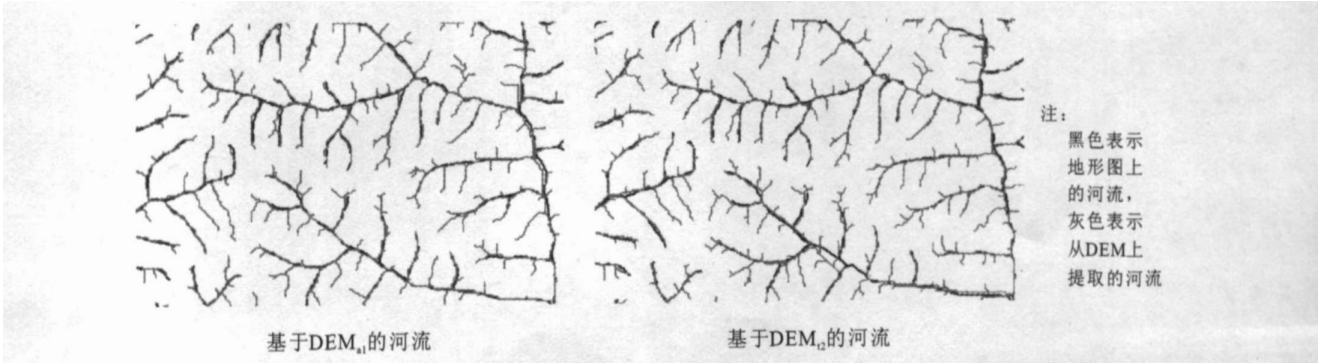


图 6 DEM 对流水线的提取结果

## 4 结论与讨论

利用 1:25 万数字地形图的高程信息(包括派生的地形骨架点信息),通过多要素构 TIN 和 ANUDEM 方法建立了两组 DEM。对比分析表明:(1) DEM<sub>tx</sub>由于其固有的小三角形的存在,不能如实地反映地形起伏的细部特征;在生成 DEM 过程中,一些较细小的侵蚀沟被忽略,使 DEM 趋于平缓。而 DEM<sub>ax</sub>则因为插值过程中使用了地形强化处理方法,较好地表现了地形的起伏。(2) DEM<sub>tx</sub>在构 TIN 时增加了地形骨架点信息,因而改善了其对地形的反映能力,但不能消除其固有的平顶现象,并且地形骨架点的提取较为麻烦,大量骨架点的加入也大大降低了工作效率。因而相比之下 DEM<sub>ax</sub>建立方法简单,对地形形态和起伏的反映更加真实和有效。(3) 由于 TIN 方法不能直接利用河流信息建模,因而 DEM<sub>tx</sub>虽可提取流水线信息,但河流不完全连续,多处出现梳状多重线条河流,与等高线关系也不十分协调;而 ANUDEM 地形强化算法的应用,则使基于 DEM<sub>ax</sub>提取的河流信息基本与地形图上的河流一致。

通过本研究我们认为,基于现有数字地形图,利用 ANUDEM 方法,可以显著改善 DEM 的质量,使之能更加准确地反映地形的基本特征,为水文和土壤侵蚀模拟研究提供更有力的支持。但本研究只是对黄土丘陵区中等分辨率 DEM 进行了初步分析对比,而对其它地区、大比例尺地形图基础上的高分辨率 DEM,两种方法的差异尚待研究。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Moore, I D, Grayson, R B, Lanson A R. Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1) 3—30.
- [2] Burrough P A. and Rachael A. McDonnell. Principles of Geographical Information Systems[M]. Oxford University Press, 1998.
- [3] Wilson J P, Gallant J C. Terrain Analysis, Principles and Applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [4] 李志林,朱庆著.数字高程模型[M].武汉:武汉大学出版社,2000.
- [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—29.
- [6] 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—15,20.
- [7] 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)数据库的建立[J].测绘通报,2002(6):19—22.
- [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]. Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, 2004.
- [10] 杨勤科,McVicar T R, 李 V N T G,张彩霞. 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] Yang Q K, Van Niel T G, McVicar T R, Hutchinson M F, Li L T. 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.
- [12] 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.