

水文地貌关系正确 DEM 的建立方法

杨勤科¹, 师维娟¹, Tim R. McVicar², Tom G. Van Niel², Lingtao Li²

(11 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌;

21 澳大利亚联邦科工组织水土资源研究所, 2601, 堪培拉, 澳大利亚)

摘要 水文地貌关系正确 DEM(hydrologically correct DEMs, H₂DEM), 是指符合水文地貌学基本原理, 正确反映水文要素(水流方向、水流路径、水系网络、流域界线等)与地貌特征发生和位置关系的 DEM。区域尺度水文和土壤侵蚀等研究中, 地形因子参数只能利用 DEM 来提取, 为了准确反映地面形态, 有效提取地貌和水文特征因子, 建立 H₂DEM 是必需的。笔者对 H₂DEM 的概念、建立方法进行了讨论和介绍; 以黄土高原为例, 提出了利用多种比例尺数字地形图和 ANUDEM 软件建立 DEM 的关键参数; 通过与 TIN 方法建立的 DEM 的比较, 对所建立的 DEM 进行了简要评价。研究表明, 利用我国已有的数字地形图和 ANUDEM 软件, 可以建立 H₂DEM, 为流域水文和区域尺度水土流失定量分析模拟、区域尺度植被适宜性评价等研究提供更加直接的数据支持。

关键词 数字高程模型; 水文地貌; 黄土高原

On constructing methods of hydrologically correct DEMs

Yang Qinke¹, Shi Weijuan¹, Tim R. McVicar², Tom G. Van Niel², Lingtao Li²

(11 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
21 CSIRO Land and Water, GPO Box 1666, Canberra, 2601, ACT, Australia)

Abstract Hydrologically correct DEMs (H₂DEM) is one of DEMs which correctly and sufficiently represents genesis and locational relationship between hydrologic parameters, including direction and pathway of overland runoff, stream networks, and boundary of watershed, and landform, etc. As the only way to extract terrain parameters based on DEMs for the studies of watershed hydrology, and soil erosion modeling of regional scale, therefore it is necessary to constructing H₂DEMs for representing terrain shape, extracting terrain and hydrology parameters. In this paper, the concept, constructing method of H₂DEMs were introduced and discussed, then taking Loess Plateau as an example, key parameters for H₂DEMs constructing based on digital topographic maps and ANUDEM software package were identified by series tests; the quality of resultant DEMs have been assessed by comparing them to DEMs from TIN approach which is widely applied in China. The results show that varied resolution H₂DEMs can be generated based on available digital topographic maps, including features of contour, spot heights, stream lines, etc, and ANUDEM software, and provide solid support for hydrology and soil erosion modeling at the watershed/ regional scales, and mapping of vegetation suitability.

Key words DEMs; hydrogeomorphology; Loess Plateau

作为基本的地理数据, DEM 在地学等相关科学研究中具有十分广泛的用途^[12]。在区域尺度水文和土壤侵蚀定量评价、植被适宜性评价等研究中, 考虑到数据量和计算工作量等方面的限制, 地形和水

收稿日期: 20060529 修回日期: 20070412

项目名称: 国家重点基础研究发展计划(2007CB407203); / 十一五国家科技支撑计划项目(2006BAD09B05); 黄河水利委员会项目(2004SZ0204)

第一作者简介: 杨勤科(1962), 男, 研究员。主要研究方向: 区域水土流失、遥感与 GIS 应用。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文地貌等参数,只能基于中低分辨率 DEM 提取^[24]。这些参数包括坡度、坡向、汇流面积、沟道网络、流域边界等。正确地表现地形的形态及其与水文特征的关系,是水文和土壤侵蚀分析过程中对 DEM 的最基本的要求^[26]。

根据 DEM 对水文特征和地貌关系的表现能力,可将 DEM 分为 2 类:水文增强的 DEM(hydrologically enhanced DEMs/ drainage enforced DEMs)^[28] 和非水文增强的 DEM。前者充分考虑或专门处理地形与水文特征的关系,后者则对此未做处理。第 1 类 DEM 也称为水文地貌关系正确 DEM(hydrologically correct DEMs, H₂DEM)^[211]。

国外对 H₂DEM 已进行了一系列的研究^[7],提出了专门的算法并开发出相应的专业软件^[210, 12],建立了水文地貌关系正确 DEM 数据集,如 USGS 建立的 Hydro1k^[11] 和澳大利亚的 DEM^[13] 等。研究表明,较之普通 DEM,基于 H₂DEM 派生的河流网络、流域边界、坡度等参数,其准确性和精度都更高^[14]。

在我国,已经利用 1B25 万、1B5 万和 1B1 万地形图建成了 100、25 和 10 m 分辨率的 DEM^[12, 17],并在国土资源管理和地理学等学科研究中发挥了积极和重要的作用;但由于这些 DEM 是利用多要素构 TIN 的方法建立的,还不属于水文地貌关系的 DEM,因而不能完全满足水文和土壤侵蚀等定量模拟研究的需求。近年来,国内研究者对 H₂DEM 虽然有所涉及^[18, 20],但是从总体上讲,该问题的研究还没有引起学术界和管理部门的重视。笔者拟在已有研究^[2, 225]的基础上,以黄土高原为例,介绍并讨论 H₂DEM 的基本概念和建立方法,以期促进我国 DEM 的研究和数据资源的开发利用。

1 水文地貌关系正确 DEM 建立方法简介

1.1 H₂DEM 的概念

关于水文地貌关系正确 DEM,尚未见到明确的定义。综述有关研究,H₂DEM 是具有以下特征的 DEM,这些特征包括:1) 如实表现地面形态,如坡度和坡向等,能够正确表现地面高程的连续和突变特征;2) 表面没有或很少有伪下陷点(sink),使地表径流能连续汇集,也就是说,任一单元的水流可沿着坡度最陡的方向到达沟道以至于沟口(或 DEM 边界)^[26];3) 符合水文地貌学基本原理^[27],正确反映水文要素(水流方向、水流路径、沟道网络、流域界线等)与地貌特征的发生和位置关系,保证提取的河流网络能相互连通。水文地貌关系正确 DEM 所具有

的这些特征,是流域水文模型和土壤侵蚀模型的基本要求^[7, 26]。对于诸多相关研究,也是十分重要的,例如,支持气象数据插值与表面分析、地表辐射计算和作为植被适宜性评价的基础等^[21]。

1.1.2 H₂DEM 的建立方法))) ANUDEM 简介

建立水文地貌正确 DEM,通常有 2 种方法:一种方法是对现有非地形强化 DEM 进行平滑、填洼与水文增强处理,生成 H₂DEM^[28],Hydro1k^[11]就是用这种方法建立 H₂DEM 的;另外一种方法是在建立 DEM 过程中,特别是在利用测绘资料插值生成 DEM 过程中,利用专门设计的算法,有时也利用河流专题层参与插值,直接生成水文地貌关系正确 DEM。澳大利亚国立大学 Hutchinson 教授开发的 ANUDEM 软件^[210, 12, 28],就是建立水文地貌关系正确 DEM 的专用软件工具。下面只对 ANUDEM 的基本算法和用法做一简单介绍^[10, 28]。

1.1.2.1 ANUDEM 的算法 ANUDEM 的主要算法包括 3 个方面,即插值算法(interpolation algorithm)、数据平滑算法(roughness penalty algorithms)和地形强化算法(drainage enforcement algorithm)。插值算法指由已知高程测点推求未知点高程值的计算方法;数据平滑算法目的在于使预测值接近测量值,同时使拟合表面平滑;地形强化算法则是通过辨识高程数据中的地形特征点(凹陷、鞍部)和特征线(山脊、沟道),使地表的特征及其与水文特征的关系能在拟合表面上得到准确、真实的表现。

1.1.2.2 ANUDEM 的输入和输出 支持 ANUDEM 系统进行插值的源数据(输入数据),包括高程数据(等高线、高程点)和独立变量信息(河流、陡坎等)2 个方面。经过插值运算,ANUDEM 系统将输出 3 类信息,包括 DEM、系统运行记录(log file)和有关错误信息。

1.1.2.3 ANUDEM 的运行环境和运行方式 ANUDEM 是一视窗界面系统,用户可以在其界面中输入所需要的各类参数,设置需要输出文件的路径和文件名。就数据格式而言,ANUDEM 与 ARC/INFO、IDRIZI 兼容,同时,ANUDEM 的算法已经集成于 ARC/INFO 系统中,分别为 Topogrid(workstation 下)和 Topo to Raster(toolbox 中)。

1.1.2.4 ANUDEM 的特点 与有关插值软件相比较,ANUDEM 的特点是,采用嵌套式多分辨率迭代计算方法进行插值计算,因而计算效率高。可以对一个比较大的区域进行插值计算,避免了边际效应。插值过程中,自动去除高程容限以内的所有伪下陷点,

从而减少了去除伪下陷点的编辑或 DEM 的后处理过程。另外,系统也可去除所有与水流方向相冲突的高程点,以确保所有河道都位于沟谷的底部。最终输出的插值结果是 Hc2DEM。

2 实例分析

2.1 研究区域与数据处理

研究区域位于黄土高原延河流域(图 1),该区为典型的黄土丘陵地貌。长期水土流失使地面被切割变得十分破碎,坡度 23 以上土地面积超过全区总面积的 50%^[29]。

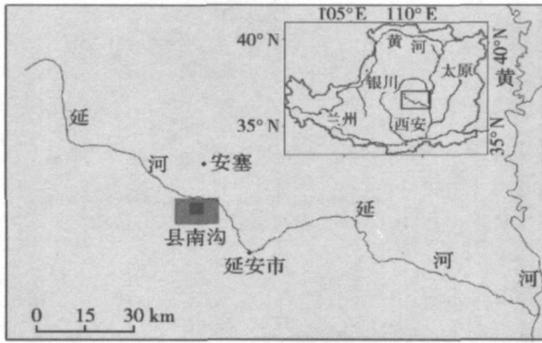


图 1 研究区域位置图

Fig. 1 Location of research area

研究选用 1B25 万(延河流域,浅灰方框,2 万 169 km²)、1B5 万(县南沟流域,浅灰方框,120 km²)和 1B1 万(位于县南沟流域内,2118 km²)数字地形图中的高程信息,包括等高线(间距分别为 100、20 和 10 m)、高程点和河流,在 ARC/INFO 环境下利用 ungenerate 命令,将上述数据层转换成 ANUDEM 可以读取的文件格式。

2.1.2 ANUDEM 关键参数的确定与 DEM 建立

运行 ANUDEM,建立水文地貌关系正确 DEM,首先必须对 3 个关键参数进行率定,包括分辨率、计算迭代次数和糙度系数。

2.1.2.1 分辨率 在一定地理区域、一定比例尺条件下,能最大限度反映其地形特征的 DEM 栅格尺寸称为 DEM 分辨率^[30]。笔者利用 Hutchinson 推荐的信息含量法(information content analysis)^[31]确定分辨率。具体做法是,用较小的栅格尺寸运行 ANUDEM(针对 1B25 万、1B5 万和 1B1 万 3 种比例尺地形图,分别为 1215、1125 和 013125 m),在 ANUDEM 系统输出的 log 文件中读取各分辨率下的坡度均方差值(RMS slope),点绘/分辨率)坡度均方差值 0 曲线(图 2),曲线上由陡变缓的拐点对应的栅格尺寸就是分辨率,上述 3 个比例尺的分辨率分别为 50、10 和 5 m。

2.1.2.2 计算迭代次数 由于 ANUDEM 采用嵌套式多分辨率迭代计算方法进行插值,所以必须根据插值区的地形特征设置合适的迭代次数。在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 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。随计算迭代次数增加,运行时间呈直线快速增加,最终剩余新数据行数则急剧下降,地形强化数量急剧增加。根据这种关系,3 种比例尺情况下的迭代次数分别为 40、45 和 40^[22,25]。

2.1.2.3 糙度系数 设置第 1 和第 2 糙度系数(first roughness 和 second roughness,简称为 R₁ 和 R₂)的目的,是实现粗糙度罚函数的作用。ANUDEM 手册^[10]规定,如果以等高线为主进行插值,则 R₁ 取 0,为此只需确定 R₂ 即可。通过 3 种方法确定的第 2 糙度系数包括:1)统计 R₂ 值变化对 DEM 的地形强化数量、下陷点数量、坡度特征值、最新数据行和派生河流总长度等的影响(统计分析);2)分析 DEM 上的地貌特征点,包括梁峁顶、鞍部、沟头、沟口和特征线,如梁脊线、梁峁顶到峁边线等随 R₂ 的变化(地貌分析);3)DEM 高程)独立点高程值比较(误差分析)^[23,25]。最终确定的第 2 糙度系数分别为 018、

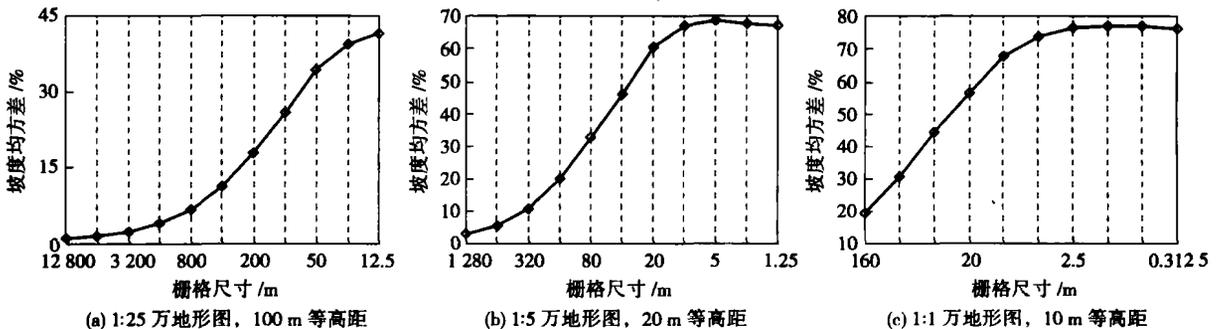


图 2 坡度均方差与栅格尺寸曲线

Fig. 2 Curve of RMS slope and grid cellsize

017 和 017^[2223, 25]。

213 H₂DEM 的应用与评价

利用多种比例尺数字地形图和上述确定的几个参数, 运行 ANUDEM 系统, 在典型地区建立了一组水文地貌关系正确 DEM, 其中, 基于 1B25 万地形图的低分辨率 DEM, 其上所提取的水系网络流域边界, 与水文手册上的图基本一致^[25], 该 DEM 已经应用于气候数据的插值处理^[32,33]、植被适宜性评价^[34]

等研究中。下面仅以低分辨率的 DEM 为例, 从 DEM 与输入数据的关系, DEM 对地貌形状和水文特征的反映能力等方面, 对其进行评价。

21311 派生等高线与输入等高线的对比 目测表明, 用该方法生成 DEM 再转化成等高线与输入的等高线基本一致(图 3)。说明在将等高线转换成 DEM 过程中, 没有十分明显的信息损失, 同时也说明, 所提出的分辨率指标是合适的。

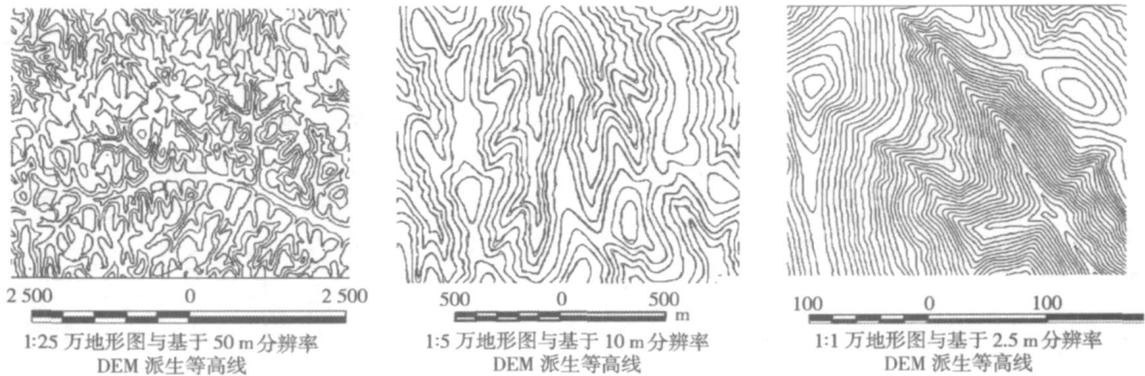


图 3 派生等高线与输入等高线的比较

Fig. 3 Comparing of DEM derived contours and input contours

21312 DEM 对地形的表现能力 利用所建立的 50 m 分辨率 DEM 与相同数据用 TIN 方法建立的 DEM(分别标记为 H₂DEM 和 TIN₂DEM), 分别做光照模拟图像和坡度图(图 4 和图 5)。从图 4 可以看出, TIN₂DEM 有比较多的平顶(梁峁顶)存在, 而 H₂DEM 则是圆滑的, 基本无平顶存在, 真实反映了地形的形

状。从图 5 可以看出, 基于 TIN₂DEM 的坡度表面边缘呈明显的带状, 而基于 H₂DEM 的坡度图边缘不明显, 两者频率分布也有比较大的差异。H₂DEM 的坡度范围大, 总体上坡度也比较大, 而 TIN₂DEM 则在 5b~ 20b 之间十分集中(图 6)。

21313 水系网络分析 能否准确提取沟道信息, 是

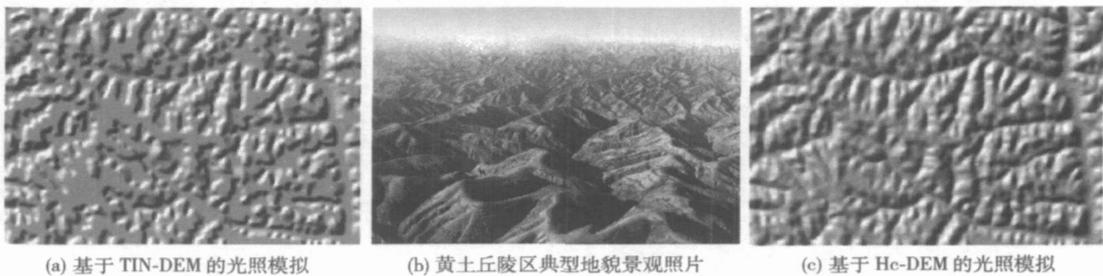
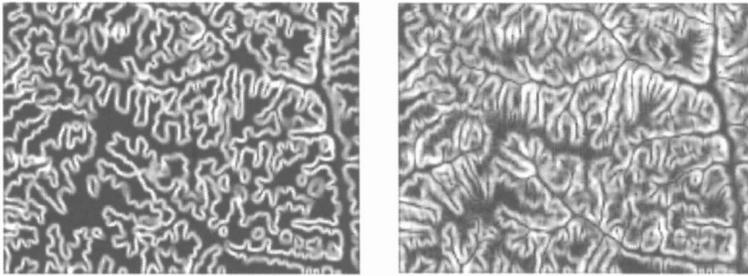


图 4 不同类型 DEM 生成光照模拟

Fig. 4 Hillshade in derived from TIN₂DEM and H₂DEM

DEM 是否实用的关键因素之一, 也是 H₂DEM 的重要指标。在研究区选典型样区, 利用 ANUDEM(仅用等高线和高程点)和 TIN 方法建立 DEM 提取的水系如图 7 所示, 可见基于 H₂DEM 提取的流水线基本是连续的, 而基于 TIN₂DEM 提取的流水线不完全连

续, 多处出现多重平行线状河流。对多沙粗沙区进行了流域划分, 经过整理后与水文手册所附结果基本一致^[33]。可见利用 ANUDEM 可以建立水文地貌关系正确 DEM, 可直接用以支持区域水文和水土流失模拟分析。



(a) 基于 TIN-DEM 的坡度 (b) 基于 Hc-DEM 的坡度

图 5 不同类型 DEM 的坡度

Fig.5 Slope derived from TIN-DEM and Hc-DEM

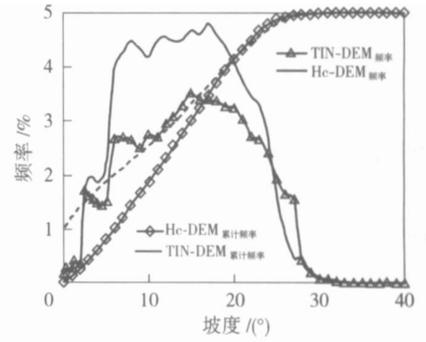
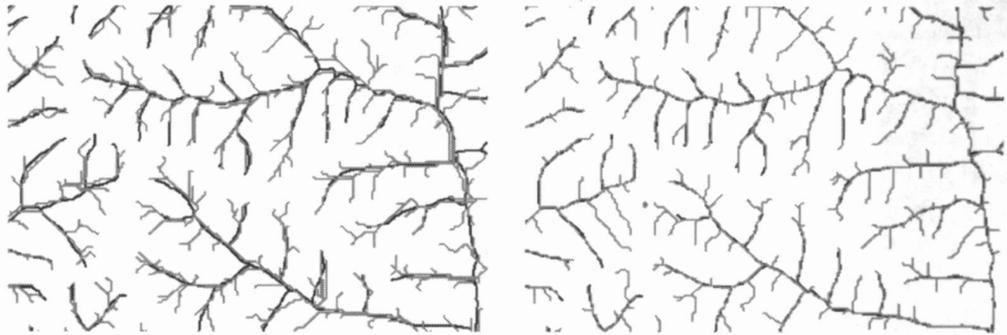


图 6 坡度频率分布

Fig.6 Slope frequency



(a) 基于 TIN-DEM 提取的流水线 (b) 基于 Hc-DEM 提取的流水线

图 7 DEM 对流水线的提取结果

Fig. 7 DEM derived stream network

3 结论与讨论

由于 H₂DEM 能够反映水文和地貌的关系, 能够正确反映地面的基本形态特征, 相对于常见的非水文增强 DEM, 从理论到实践都是一种进步。考虑到大流域水文模型和区域尺度土壤侵蚀评价、区域尺度植被评价和水土保持措施宏观布设等研究。在我国已有数字地形图的基础上, 对其开展全面的研究, 改进我国 DEM 的质量, 提高 DEM 的应用效率, 十分必要。

在黄土高原典型地区的研究表明, 利用我国基础数据库中的数字地形图(包括等高线、高程点和河流 3 个基本专题层), 在 ANUDEM 软件的支持下, 可以生成水文地貌关系正确 DEM, 使其精度较现有基于 TIN 方法建立的 DEM 有所提高, 能更好地描述地面的起伏和水文地貌关系, 并能为相关研究提供更加直接的数据支持。

基于本文的试验, 在黄土高原地区, 利用比例尺为 1:25 万(等高距 100 m)、1:5 万(等高距 20 m) 和 1:1 万(等高距 10 m) 地形图建立 H₂DEM 的关键参

数分别为: 分辨率 50、10 和 5 m, 迭代次数 40、45 和 40, 第 2 糙度系数 0.18、0.17 和 0.17, 其中, 分辨率指标是据 Hutchinson^[31] 推荐的信息含量法估计的, 与我国目前使用的 100 m、25 m 和 1215 m 有所不同^{[15][17]}, 但对于 1:1 万地形图建立的 DEM, 分辨率指标与汤国安等^[35] 建议的指标基本一致。分辨率问题是 DEM 建立的最主要问题之一, 应该予以进一步的研究。

本研究只是在黄土丘陵区的一个初步尝试, 虽然研究结果已在气候数据的插值处理、植被适宜性评价等研究中得到初步应用, 但是还有待在更多实际应用中, 对其科学性和实用性进行检验。同时, 有必要在全国更多地貌类型区, 展开 H₂DEM 的研究, 并将其与 TIN 方法所建立的 DEM 进行对比分析。

4 参考文献

[1] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2004, 286: 112-134
 [2] 李志林, 朱庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉大学出版社

- 社, 2000
- [3] Armstrong R N, Martz L W. Topographic parameterization in continental hydrology: a study in scale. *Hydrological Processes*, 2003, 17(18): 3763-3781
- [4] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 168-173
- [5] Moore I D, Grayson R B, Landson A R. Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1): 3-30
- [6] Hutchinson M F, Gallant J C. Representation of terrain M Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. *Geographical Information Systems: Principles, Technical Issues, Management Issues and Applications: Second Edition*. New York: Wiley, 1999: 102-124
- [7] Underwood J, Crystal R E. Hydrologically enhanced, high resolution DEMs. *Geospatial Solutions and GPS World*, 2002 (Supplement): 8-14
- [8] USGS. SRTM Data Processing Methodology [EB/OL]. [2006-03-20]. <http://Msrtm.csi.cgiar.org/SRTMdataProcessingMethodology.asp>
- [9] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 1989, 106: 21-232
- [10] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5.1. Canberra: The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, 2004
- [11] Verdin K L, Greenlee S K. HYDRO1k documentation. EROS Data Center, USGS, 1998
- [12] Hutchinson M F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models in Third International Symposium on Spatial Data Handling. Columbus, Ohio: International Geographical Union, 1988
- [13] Hutchinson M F, Stein J A, Stein J L. Upgrade of the 9 Second Digital Elevation Model for Australia. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, 2001
- [14] Sharon C, Kelly B. Comparison of Digital Elevation Models for Aquatic Data Development. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(12): 1362-1375
- [15] 王东华, 刘建军, 商瑶玲, 等. 全国 1B25 万数字高程模型数据库的设计与建库. *测绘通报*, 2001(10): 27-29
- [16] 王东华, 吉建培, 刘建军, 等. 论国家 1B50, 000 数字高程模型数据库建设. *地理信息世界*, 2003, 1(2): 12-15, 20
- [17] 唐新明, 李莉, 季小燕, 等. 全国七大江河流域重点防范区 1B1 万数字高程模型 (DEM) 数据库的建立. *测绘通报*, 2002, 6: 19-22
- [18] 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. *水利学报*, 2002, 21(2): 71-74, 78
- [19] 林桂兰, 庄翠蓉, 孙飒梅, 等. 水源保护区划界的遥感与 GIS 技术研究. *中国用户通讯*, 2003, 21(2): 15
- [20] 王库, 于东升, 史学正. 建立省级数字高程模型 (DEM) 的关键技术: 以江苏省为例. *地理科学*, 2004, 24(2): 188-192
- [21] Yang Q K, McVicar T R, Van 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. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007 (出版中)
- [22] 师维娟, 杨勤科, 赵东波, 等. 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. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(2): 143-148
- [23] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型构建方法. *水利学报*, 2006, 37(8): 1002-1014
- [24] 杨勤科, McVicar T R, Van Niel T G, et al. 用 ANUDEM 建立水文地貌关系正确 DEM 的方法研究. *测绘科学*, 2006, 31(6): 152-157
- [25] Yang Q K, Van Niel 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. CSIRO Land and Water Technical Report, 7/05. Canberra, Australia: 2005
- [26] Kiss R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. *Journal of Hungarian Geomathematics*, 2004, 2: 16-29
- [27] Roy C, Sidle Y O. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological Processes*, 2004, 18(4): 597-602
- [28] 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. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 36-41
- [29] 赵存兴. 中国黄土高原地面坡度分级数据集. 北京: 海洋出版社, 1989
- [30] 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. *长江科学院院报*, 2006, 23(5): 22-23, 28
- [31] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models in Third Conference. Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Barbara: NCGIA, University of California, 1996

(下转第 21 页)

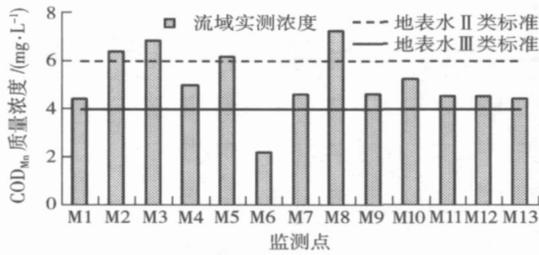


图 3 蛇鱼川小流域地表水 COD_{Mn}质量浓度

Fig. 3 Concentration of COD_{Mn} in surface water of Sheyuchuan Watershed

表 1 流域内各塘坝水质监测结果

Tab. 1 Water quality of ponds in Sheyuchuan Watershed

位置	总磷/(mg#L ⁻¹)	叶绿素 a/(Lg#L ⁻¹)	透明度/m
黄峪口塘坝	0.04	4.11	2.2
群英塘坝	0.03	5.07	1.6
小塘坝	0.04	2.46)
高家岭塘坝	0.02	2.86	2.1

41313 人居环境改善 蛇鱼川小流域治理工作还包含了农路建设、公厕建设、村庄美化等村容村貌整治和健身、娱乐等基础设施建设等，目前流域内已呈现出干净、整洁和便利的景象。同时，在流域治理过程中注重培养了村民的环保意识和公众参与意识。各行政村成立了村民水源保护协会，自觉参与保护

流域水土资源活动，营造良好的社会氛围，形成人人知晓、人人参与水土保持和水源保护的局面。

综上所述，蛇鱼川小流域综合治理使得流域生态环境得到明显改善，流域呈现山川秀美、人水和谐的良好局面，有力促进了密云水库的水源保护和流域资源、环境与经济社会的协调发展。

5 结语

建设生态清洁小流域是在新形势下，针对北京市水资源紧缺问题和山区生态环境现状，以小流域为单元，以三道防线为主线，以节水、净水、调水、循环用水的水资源保护为目的，开展小流域综合治理的新理念。推广这一治理理念，将有利于加快北京生态建设步伐，促进全市生态环境的改善。

6 参考文献

[1] 王礼先. 流域管理学. 北京: 中国林业出版社, 1999
 [2] 夏江宝, 陈仲杰, 刘信儒, 等. 山地水土保持林改良土壤效应的研究. 水土保持研究, 2005, 19(1): 170-172
 [3] 毕小刚, 杨进怀, 李永贵, 等. 北京市建设生态清洁型小流域的思路与实践. 中国水土保持, 2005(1): 18-20
 [4] 黄忠臣. 北京市水资源状况调查分析. 北京建筑工业学院学报, 2003, 19(4): 38-41

(责任编辑: 程云)

(上接第 6 页)

[32] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, et al. Spatially Disaggregating 21 Years of Monthly Hydrometeorological Data in China: Spatio-Temporal Analysis of FAO's 56 Crop Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation in the Context of Climate Change. CSIRO Land and Water Technical Report 8/05. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water, 2005
 [33] Li L T, McVicar T R, Van Niel T G, et al. Quality Control of 21 Years of Monthly Meteorological and Hydrological Data in the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau,

China. CSIRO Land and Water Technical Report 6/05, Canberra, Australia: CSIRO Land and Water, 2005
 [34] McVicar T R, Wen Z M, Li L T, et al. Mapping Perennial Vegetation Suitability and Identifying Targeting Areas for Implementing the R2 Vegetation Program in the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China. CSIRO Land and Water Technical Report, 18/05. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water, 2005
 [35] 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. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830

(责任编辑: 宋如华)