

用 ANUDEM 建立水文地貌关系正确 DEM 的方法研究

杨勤科^①, Tim R McVicar^②, Tom G Van Niel^③, Mike Hutchinson^④, 李领涛^②

(①中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ② 澳大利亚联邦科工组织水土资源研究所(堪培拉),

③ 澳大利亚联邦科工组织水土资源研究所(珀斯); ④ 澳大利亚国立大学资源环境研究中心)

【摘要】 针对区域尺度的径流、水土流失定量评价和植被适宜性评价等研究工作需要, 利用 1:25 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 建立方法进行了研究。结果表明该方法所建立的 DEM, 可以正确反映地貌梁、沟结构及其与流水网络的关系, 对地形描述的能力优于 TIN 方法建立的 DEM; 利用 ANUDEM 和 1:25 万地形图插值建立黄土丘陵区 DEM 的三个主要参数分别为分辨率 50 或 100, 计算迭代次数 40, 第二糙率系数 0.8。

【关键词】 黄土高原; 数字高程模型; ANUDEM; DEM 分辨率

【中图分类号】 P282

【文献标识码】 A

【文章编号】 1009-2307(2006)06-0155-04

1 引言

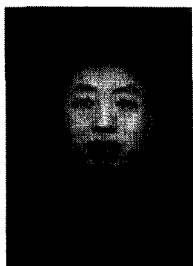
数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是利用一组有序数据阵列对地表高度空间变化的定量表现^[1]。DEM 在地貌定量分析、流域水文和土壤侵蚀模拟分析、军民用工程设计、遥感图像辅助分类等方面具有重要用途^[1,2]。在黄土高原, 地形对地表径流和土壤侵蚀、植被分布和土地利用、水土保持措施布设等具有重要影响^[3], 因而 DEM 已经在侵蚀地貌分析^[4]、水文模型^[5]、土壤侵蚀定量遥感^[6]等方面得到了广泛应用。

生成 DEM 的方法, 根据数据基础不同可以分为两类, 一是利用遥感数据(或图像)提取高程数据直接生成 DEM^[7], 二是根据现有测绘资料经过插值生成 DEM。前者代表了近年来 DEM 生产的新技术和发展趋势, 后者则是迄今为止最为成熟可行的方法, 即将现有地形图数字化, 通过内插方法生成 DEM。就第二类方法而言, 目前最流行的方法是利用多种高程信息(等高线、高程点, 或骨架点), 通过构建不规则三角网(Triangle Irregular Network, TIN)生成 DEM^[8,9]。国外比较流行的一种方法是 Hutchinson 于 20 世纪 80 年代提出的, 利用地形测量所得高程信息生成水文地貌关系正确 DEM 的算法^[10]和基于该算法的 DEM 生产软件 ANUDEM^[11]。ANUDEM 在全球范围内得到广泛应用^[12,13], 并被集成于 ARC/INFO 地理信息系统软件。本文利用我国 1:25 万数字地形图和 ANUDEM, 进行了 DEM 建立方法的研究, 力图建立黄土高原地区中等分辨率 DEM, 为区域水土流失评价及其相关研究提供支持, 并将 ANUDEM 这一专业软件介绍给国内的读者。

2 研究方法

2.1 研究区域

研究区域位于黄土高原延河流域, 试验区面积为



作者简介: 杨勤科(1962-), 男, 研究员, 主要从事基于遥感和地理信息系统的区域水土流失评价研究。
E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

收稿日期: 2006-01-12

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目: 黄土高原水土保持的区域环境效应研究(KZCX3-SW-421); 中澳合作项目——黄土高原植被恢复重建设水环境效应研究(LWR1/2002/018)

20 169 km²。该区为典型的黄土丘陵地貌, 地面被长期水土流失切割, 地面破碎, 坡度 25 度以上土地面积占 50% 以上。数字高程模型(DEMs)是该区诸多科学研究的基础, 包括地表径流和侵蚀模拟、水文地貌分析(坡度坡向计算、流域划分、沟网提取等), 植被和水保措施优化配置^[5]。

2.2 数据基础

本研究选用 1:25 万数字地形图中的高程信息, 包括等高线, 高程点和河流。典型试验研究区等高线间距 100m, 输入数据基本信息如表 1。

表 1 输入数据基本特征统计

数据集	数量	长度(m)	密度*
等高线	11, 684	78, 947, 458	3.914
高程点	461	n/a	0.023
河流	3, 267	8, 720, 177	0.432

* m/km²(等高线、河流)、点//km²(高程点)

2.3 数据处理

根据 ANUDEM 的要求和数据特点, 对数据做如下预处理, 包括: ①地图接边与投影换算: 将以标准分幅为单元存储的有关信息拼接成一个数据单元, 将以地理坐标存储的数据转换成 Albers 投影; ②查错和修改: 运行 ANUDEM, 利用其输出的误差信息, 结合对输出 DEM 坡度图的目视检查, 查找和修改输入数据的错误; ③格式转换: 在 ARC/INFO 环境下利用 ungenerate 命令, 将等高线、高程点和河流三层转换成 ANUDEM 可以读取的文件格式。

3 对 ANUDEM 参数的率定

根据 ANUDEM 手册, 运行 ANUDEM 前, 用户需要设置 10 多个参数^[11], 其中与数据和插值地区地形特征有关的有三个, 包括分辨率、运算迭代次数和糙率系数等。

3.1 分辨率的确定

在一定地理区域, 与作为插值基础的地形图信息量相适应的、能反映其该区地形特征的 DEM 栅格尺寸称为 DEM 分辨率。分辨率是建立 DEM 的关键问题。在 ANUDEM 系统输出的插值表面上, 包含了两种类型的栅格点, 即有对应观测点的栅格(从基础数据中读取高程)和无对应观测点的栅格(经插值计算取得高程)。以有观测点的栅格为基础, 计算多种栅格尺寸 DEM 的表面坡度均方根(该值记录在系统运行日志文件中), 点绘“坡度均方根——栅格尺寸”关系曲线, 该曲线上明显转折的点对应的栅格值就是 DEM 分辨率。本试验中点绘的 RMS 坡度分布曲线可见, 曲线上变化比较明显的点出现在栅格为 50m 和 25m 处(图 2)。由

此可以认为分辨率可能是 50m 或者 25m。研究表明对于一定精度的地形图而言, 插值生成 DEM 并不是分辨率越高越好。如果栅格太小, 将使拟合表面引入误差, 出现一些在实际地面上并不存在的、沿着等高线分布的线状纹理^[14]。在本文的试验研究区域, 当栅格尺寸等于 25m 时, 在曲率表面上出现了沿着等高线分布的线状纹理(图 3b), 说明栅格尺寸不能小于 50m。考虑到我国利用 1:25 万地形图和 TIN 方法建立的 DEM 分辨率为 100m, 我们认为分辨率可以为 50m 或 100m。

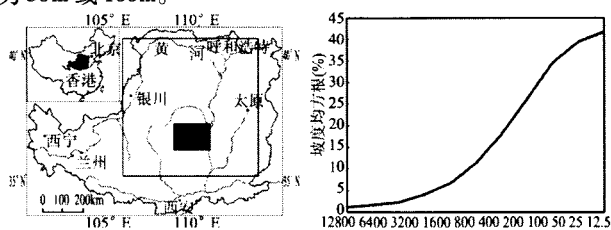


图 1 研究区位置图 图 2 坡度均方差与栅格尺寸关系

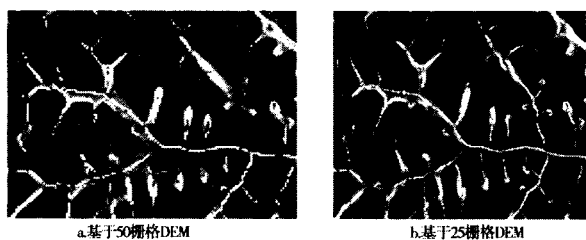


图 3 不同栅格 DEM 上提取的剖面曲率

3.2 系统计算叠代次数

ANUDEM 采用了多分辨率插值算法, 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 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。每个分辨率的插值通过有限差分方式用高斯-塞德尔迭代法(Gauss-Seidel iteration)实现, 用户可根据插值区的地形特征设置合适的迭代次数。试验和统计表明随计算叠代次数增加, 运行时间呈直线快速增加, 最终剩余新数据行数急剧下降, 地形强化数量急剧增加(图 4)。大约在迭代次数为 40 时下陷点的减少和地形强化数量的增加趋于平缓。所以可以用 40 作为最佳迭代次数。在系统默认值(20), 剩余数据行数为 400, 说明增加迭代次数, 输出 DEM 还可得到改善, 这主要是由于试验区地形复杂所致。

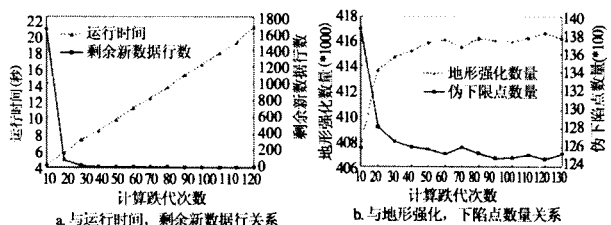


图 4 最大迭代次数优化

3.3 糙度系数

ANUDEM 引入了粗糙度罚函数(roughness penalty)来减少基础数据错误和系统不稳定性对插值表面的影响。这一功能通过设置第一和第二糙度系数(first roughness, second roughness, 简称为 Rn_1 和 Rn_2)来实现。ANUDEM 手册规定如果以等高线为主进行插值则 Rn_1 取 0, 为此只需确定 Rn_2 即可。本研究中采用统计学分析和地貌学分析, 确定了第二糙率系数的值

统计学分析: 用多种 Rn_2 值(0, 0.1, 0.2, ..., 0.9)生成 DEM, 对各 DEM 的地形强化和下陷点数量、坡度特征值、最新剩余数据行(no of last new lines)和派生河流总长度分别进行统计分析。结果表明, 随着 Rn_2 增加, 伪下陷点减少而地形强化数量增加(图 5a), 平均坡度增加, 坡度变差系数减少(图 5b)。这说明增加 Rn_2 将使 DEM 反映的地形总体趋于光滑, 使局地高差和起伏(坡度)增加。同时随 Rn_2 增加最新数据行数量呈现总体减少趋势, 在 0.8 处最小, 0.8 到 0.9 增加(图 5c)。DEM 上提取的河流总长度, 先随 Rn_2 增加而减少并在 Rn_2 为 0.4 以后再增加。 Rn_2 从 0.8 到 0.9, 河流总长度急剧增加(图 5d)。图 4c 和图 4d 表明 Rn_2 取 0.9 将可能引入了误差或致使系统不稳定。

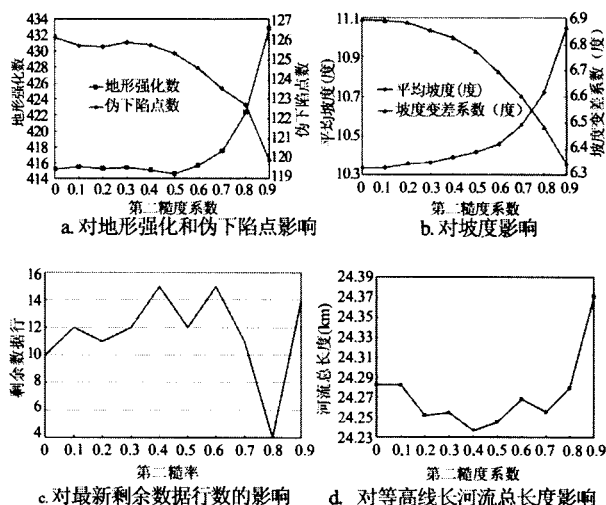


图 5 第二糙度系数的统计学分析

地貌学分析: 在上述多个 DEM 上选择地貌特征点(包括梁峯顶、鞍部、沟头、沟口)和特征线(梁脊线, 梁峯顶到峯边线), 分析 DEM 高程随 Rn_2 的变化。结果表明随 Rn_2 增加梁峯顶、沿梁脊线相对高程增加, 沟头和鞍部高程降低(图 6)。说明 Rn_2 值越大, 生成的表面上地形起伏越大。而沟口高程随 Rn_2 增加而升高, 可以解释为 Rn_2 增加使插值结果表面在整体趋于光滑的; 其在 Rn_2 为 0.8 后的减少说明算法开始不稳定。

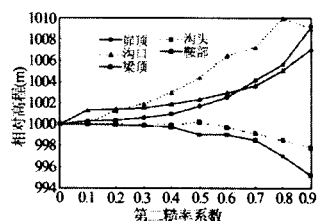


图 6 Rn_2 对地貌特征点高程影响

基于上述两点分析, 认为在黄土丘陵区, 用 ANUDEM 和 1:25 万数字地形图生成 DEM, 第二糙度系数取 0.8。

4 DEM 的质量评价与应用

利用上述优化的参数, 包括水平分辨率(100m)、叠代计算次数(40)和第二糙率系数(0.8)和经过质量校改的 1:25 万地形图(包括等高线、高程点和河流), 建立了上述黄土高原 100m 分辨率 DEM(范围如图 1 主图的矩形框)。考虑到 DEM 质量评价是一个十分复杂的问题, 本文仅就建立的 DEM 与基础数据的吻合程度, 提取的河流和流域特征, 数据质量和参数优化对 DEM 质量影响等三个方面做一简要分析。

4.1 DEM 与基础数据比较

利用上面确定的两个可选栅格尺寸生成 DEM, 再转换为等高线, 典型地区对照如图 7 示意。可见用 100m 和 50m 作为栅格尺寸, 均能基本保证生成的 DEM 如实反映作为插

值基础的地形图所能反映的地貌状况,特别是 50m 栅格 DEM 派生的等高线,与基础等高线更加吻合。

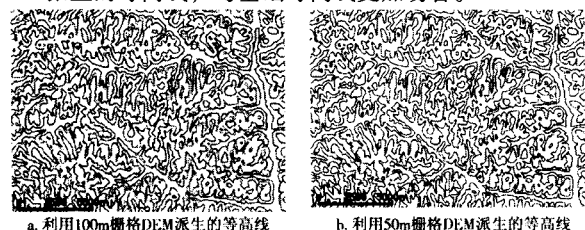


图 7 DEM 派生等高线与输入等高线的比较

4.2 水系网络分析

从实用而言,能否准确提取沟道信息,是 DEM 能否应用于黄土高原的关键因素之一。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(分别标记为 DEMa, DEMt)提取的河流见图 8。可见基于 DEMa 的河流基本是连续的,而基于 DEMt 的河流,流水线不完全连续,多处出现平行梳状河流。澳大利亚土壤侵蚀模型的流域划分工具^[15]对多沙粗沙区进行了流域划分,结果经过整理后与水文手册所附结果基本一致^[25]。可见利用 ANUDEM 可以建立水文地貌关系正确的 DEM,直接用以支持区域水文和水土流失模拟分析。

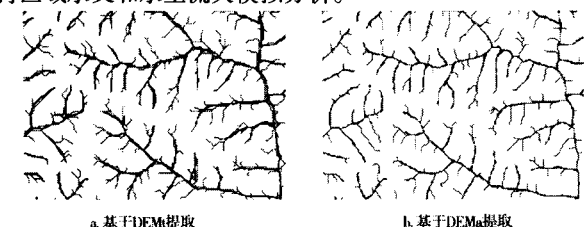


图 8 DEM 对流水线的提取结果

4.3 数据质量和参数优化对 DEM 质量影响

数据的质量和插值方法是保证建立高质量 DEM 的基本要素。以 ANUDEM 系统输出的伪下陷点数量及其深度(与周围 8 栅格之间最小高差)为指标,分析数据质量和 ANUDEM 参数优化对输出 DEM 质量影响(表 2)。一个 DEM 上伪下陷点数量越少说明 DEM 质量越好。可见是否有水系层(包括河流、湖泊、水库、灌溉渠道)的参与,对输出 DEM 影响最大;由于使用的数据已经过了严格质量控制,但河流流向不在控制之列,所以输入数据质量中河流流向影响比较明显;随着参数的优化,输出 DEM 质量也不断得到改善。将双线河改单线河后,由于在一定程度上减少了河流对地形的强化作用,特别是对伪下陷点的清除作用,所以表 2#6 数量有所增加。

表 2 输入数据类型和质量对 DEM 质量的影响

编号	伪下陷点总数(个)	最大深度(m)	平均深度(m)	深度变差系数(m)	>10m 下陷点数(个)
#1	17775	16.112	1.034	1.17	12
#2	12940	16.148	1.053	1.223	11
#3	12909	16.145	1.051	1.222	11
#4	12729	16.142	1.057	1.225	11
#5	12732	16.143	1.058	1.221	10
#6	12817	16.141	1.056	1.224	12
#7	12604	18.208	1.061	1.234	12
#8	12268	19.544	1.925	2.118	92

说明:伪下陷点深度指该点与周围 8 个栅格最小高差。#1:仅等高线、高程点插值;#2:水系整体参与插值;#3:水系层区分为河流(线)、湖泊水库(面)和灌渠(被删除)参与插值;#4:河流方

向已校改(使自高到低流动);#5:部分高程错误(等高线和高程点)得到改正;#6:双线河改成单线河,即所有数据准确无误,使用默认参数,栅格尺寸 100,最大叠代次数 20;第二糙率系数($Rn_2=0$);#7:优化的最大叠代次数(40);#8 优化的第二糙率系数($Rn_2=0.8$)

5 结论与讨论

利用我国 1:25 万地形图数据和 ANUDEM 软件可以生成水文地貌关系正确的 DEM,经过优化的基本参数分别为,分辨率 50m 或 100m,第二糙率系数 0.8,计算迭代次数 40。初步比较认为所建立的 DEM 比现有基于 TIN 方法建立的 DEM 能更好地描述地面的起伏和水文地貌关系。用该方法建立的 DEM 已经应用于气候数据的插值处理、植被适宜性评价等研究^[16]。在更多地貌类型区,应用 ANUDEM 软件和多种比例尺地形图建立相应分辨率水文地貌关系正确 DEM,并在应用中将其与 TIN 方法所建 DEM 进行对比分析,是今后研究的两个主要方面。

致谢:澳大利亚联邦科工组织水资源研究所 John Gallant 博士和 Trevor Dowling 先生参与讨论并给予支持,中国科学院水利部水土保持研究所梁伟助理研究员给予协助,一并致谢。

参考文献

- [1] Moore I D, Grayson R B and Landson A R Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications [J]. Hydrological Processes 1991, 5(1) 3-30.
- [2] 李志林,朱庆.数字高程模型[M].武汉:武汉大学出版社,2000.
- [3] 朱显谟.中国黄土高原土地资源(图片集)[M].西安:陕西科学技术出版社,1986.
- [4] 阎国年,钱亚东,陈钟明.基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J].地理学报,1998,53(6):562-569.
- [5] 王中根,郑红星,刘昌明,吴险峰,赵卫民.黄河典型流域分布式水文模型及其应用研究[J].中国科学 E 辑 技术科学,2004,34(增刊):49-59.
- [6] 卜兆宏,唐万龙,杨林章,席承藩,等.水土流失定量遥感方法新进展及其在太湖流域的应用[J].土壤学报,2003,40(1):1-9.
- [7] Ian J Tapley. Advances in Digital Elevation Datasets for Exploration, Topographic Mapping and Disaster Management [A]. In: Proc. 21st Asian Conference on Remote Sensing [C], Taipei: 2000, 4-8.
- [8] 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.
- [9] 唐新明,李莉,季小燕,王东华,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.
- [10] 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.
- [11] Hutchinson M F. ANUDEM version 5.1 User Guide [M]. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, 2004.
- [12] Hutchinson M F, Nix HA, McMahon JP and Ord KD. The development of a topographic and climate database for Africa [A]. In: Proceedings of (下转第 148 页)

4 基于 GIS 和信息融合技术的矿井底板突水预测

4.1 离散点的安全状态预测

4.1.1 点信息与关系矩阵的第一次融合

首先, 预测区内离散点的信息与关系矩阵进行一次合成运算, 合成公式采用模糊近似推论公式:

$$B_i = A_i \cdot R \quad (7)$$

式中, R 为正规化的信息分配矩阵, A_i 的求取采用北京师范大学黄崇福教授提出的经验公式^[6]。

当 $a \leq a_{\min}$, $a_{\min} \in A_i$ 时, $A_i = [1, 0 \dots, 0]$

当 $a \geq a_{\max}$, $a_{\max} \in A_i$ 时, $A_i = [1, 0 \dots, 0]$

分别将预测区内点的水压值、有效隔水层厚度、岩溶发育等级和断层密度, 与相应的信息分配矩阵进行第一次合成得到四个一维数组, $\{b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}\}$, $i=1, 2, 3, 4$ 。每个影响因素与相应关系矩阵一次融合后的数组, 反应了该点在这方面的安全状况。

4.1.2 点信息的第二次融合

利用 D-S 证据推理组合独立证据的能力合成来自不同特征的信息, 可以把一次融合得到的四个数组看作分别来自四个传感器的四方面的特征信息进行点信息的二次融合(特征级融合)。利用证据理论的 Dempster 合成法则, 将不同证据体的基本可信度分配合并产生一个总体基本可信度分配, 即一个新的证据体, 根据置信度得出最后的识别结果^[5]。

近似的把每个突水因素特征看作一个证据体。基本概率分配函数的辨识框架由 3 种类别构成: {危险 临界 安全}, 故 $\Theta = [1, 2, 3]$ 。表 2 是某一点上的四种突水因素的特征值及突水危险等级预测。从表中可以看出其安全置信度为 0.7051, 高于危险和临界的置信度。因此判断此点的安全状况为安全。

表 2 证据理论的模式识别

特征量	特征值	危险(1)	临界(2)	安全(3)
水压 P	5.92	0.1900	0.2081	0.6019
有效隔水层厚度 L	19.26	0.6304	0.1720	0.1976
溶岩发育 R	1	0.2357	0.2424	0.5219
断裂构造 D	10240	0.2951	0.3509	0.3540
基本概率分配		0.2771	0.0179	0.7051

4.2 预测结果 DTM 分析图形化

预测区内的离散点信息经过两次融合后, 就可以得到这些点的安全状况。这时, 我们通过 GIS 的 DTM 分析功能, 将预测结果图形化, 从而得到整个预测区的安全评价成果图(见图 2)。

5 结论

本项目应用实例表明, 应用 GIS 支持下的多源信息方

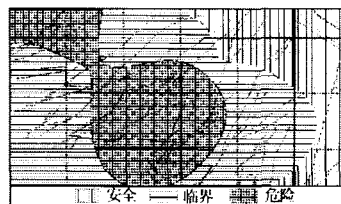


图 2 协庄煤矿某区域 11 层煤预测安全等级图

法进行矿井突水预测思路正确、方法可行。相信它必将对矿井突水预测问题研究乃至煤矿生产管理等产生积极的影响。主要结论如下:

GIS 技术能够以一种全新、综合的方法, 分析解决众多领域中的各种空间信息问题^[6]。而信息融合技术充分利用了多源数据的互补性和计算机的高速运算与智能来提高结果信息的质量。本系统将这两种技术引入到底板突水预测预报中, 两者结合, 优势互补。为矿井水害预测提供了一种新的思路和方法。

在信息分配的过程中, 针对二次型扩散的自适应过程计算量大、涉及函数图像复杂、步长求取繁琐等特点, 本文提出的 MatLab 仿真模拟方法, 得出的结果准确, 适合精确计算。

突水预测利用信息融合技术对突水因素信息进行两次融合, 得出预测区内离散点预测结果, 再利用 GIS 的空间分析技术将预测结果由点扩展到面, 从而可以得到全区的突水危险等级。本课题将 GIS 和信息融合技术相结合引入到底板承压水害的预测预报中, 具有一定的创新性和现实意义。

参考文献

- [1] 涂小强. 信息融合的原理与方法概述 [J]. 电讯技术, 1999, (3): 1-6.
- [2] 王延福, 靳德武, 曾艳京, 等. 矿井煤层底板突水预测新方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 1999, (4): 33-34.
- [3] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用 [J]. 山东矿业学院学报(自然科学版) [J]. 1999, (12): 11-17.
- [4] 黄崇福, 王家鼎. 模糊信息优化处理技术及其应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [5] 马国清, 赵亮, 李鹏. 基于 Dempster-Shafer 证据推理的多传感器信息融合技术及应用 [J]. 现代电子技术, 2003, 19: 41-44.
- [6] 马洪超, 胡光道. 地质科技情报 [J]. 1999, 18(1): 98.

(上接第 157) the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, CD ROM [C], Santa Fe, New Mexico, USA. Jan 21 25, 1996. National Center for Geographic Information Analysis (NCGIA), Santa Barbara, California. 1996.

[13] 周买春, 黎子浩, A W Jayawardena. 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.

[14] Michael F Hutchinson. Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape [A]. In: Wilson, J P and Gallant J C (eds), Terrain Analysis, Principles and Applications [C], New York: John Wiley & Sons, Inc.

2000, 29-50.

[15] Wilkinson S, Henderson A, Chen Y. SedNet User Guide; Client Report for the Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology [M]. Canberra: CSIRO Land and Water, Canberra, Australia, 2004.

[16] WEN Zhongming, McVicar T R, LI Lingtao, Van Niel T G and JIAO Feng. Mapping Perennial Vegetation Suitability and Identifying Priority Areas for Implementing the Re-Vegetation Program in the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau China. [M]. Canberra: CSIRO Land and Water Technical Report, 18/05, 2005.