

基于尺度转换的数字水系提取方法及应用^{*}

杨 邦, 任立良, 王贵作, 刘晓帆, 李国芳
(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 低分辨率 DEM 提取数字水系精度不高, 不能满足水文模型建模需要。在 Mark 和 O'Callaghan 提出的坡面径流模拟算法提取水系的基础上, 将高分辨率栅格的流向分配至低分辨率栅格内, 采用向量运算法则和栅格最大集水面积法, 通过流向的聚集过程判断低分辨率栅格的流向, 进而将高分辨率 DEM 提取的数字水系转换成低分辨率栅格水系, 并在沭水等 5 个不同流域加以应用。研究分别采用水系密度和流域宽度分布两项指标对尺度转换后水系与提取的各种尺度水系进行比较, 结果表明, 该方法简单有效, 对于平原区水系提取及山区水系提取都有较好的适应性, 转换后水系与实际相符, 满足水文模型建模要求。

关键词: 尺度; 数字高程模型; 数字水系; 向量

中图分类号: P333.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 04-0101-07

Identification of Drainage Networks from DEMs Considering Scale Transform

YANG Bang, REN Liliang, WANG Guizuo, LIU Xiaofan, LI Guofang
(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic
Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The digital drainage network extracted by the low resolution DEM data is not reasonable enough to satisfy the requirement of hydrological modeling. Based on the drainage networks extracted by overland flow simulation algorithm developed by Mark and O'Callaghan, the flow direction of high resolution grids was distributed to low resolution ones in five different watersheds, including the Zhaolanxin watershed, the Laohahe Watershed, the Dusitu watershed, the Qingliuhe watershed and the Mishui watershed. Then the digital networks extracted by high resolution DEM data were transformed into those on low resolution grids, by using the vector algorithm considering the maximal contributing area and identifying the flow direction of low resolution grids by the flow direction aggregation. Moreover, upscaled drainage networks were compared with drainage networks extracted from DEM data at different scales based on drainage networks' density and width-function distribution. The results showed that this method was simple and effective either in flat area or in rough region. The digital drainage networks after transforming were up to the requirement of hydrological modeling.

Key words: scale; digital elevation model; digital drainage networks; vector

尺度, 是指过程及其观测或模拟的特征时间或特征长度^[1], 是广泛存在于水文科学、地理学、生态学等学科中的一个重要概念。通常所说的信息都是建立在一定尺度之上的, 受观测手段和技术等

^{*} 收稿日期: 2008-08-22

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目 (2008AA12Z202); 水利公益性行业科研专项项目 (2007SHZ1-1); 教育部和国家外专局“111 计划”项目 (B08048)

作者简介: 杨邦 (1982 年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 任立良; E-mail: njrl9999@126.com

条件的限制,建立在一定尺度之上信息将带有一定的局限性。为了弥补这种局限性,需要将信息在不同尺度之间进行转换。例如,有时需要将较短的时间尺度或小流域尺度上过程的观测结果应用到长时间和大流域尺度上,而大尺度范围上的信息或模型(如 GCM 大气环流模式结果)应用到小尺度地区时就需要进行解集,这种信息在不同尺度之间的转换就叫做尺度转换(Scaling)。与尺度转换相关的问题就称尺度问题(Scale Issues)^[2],尺度问题在众多学科领域都具有非常重要的地位。

随着遥感技术的发展、成熟及其与水文领域的密切结合,水文科学领域发生了前所未有的革新,人们可以通过数字地形分析技术提取流域河网和分水线两大地貌特征,而这两大地貌特征是流域水文模型的主要参量,是实现流域空间离散化的有效途径^[3]。DEM 数据反映了一定分辨率的局部地形特征,因此根据地形的局部特征,借助于一定的算法,就可以自动提取一定地理空间范围内的自然水系及流域要素,从而为构建以数字地形为基础的水文模型奠定基础。目前,基于 DEM 提取流域河网的算法主要有移动窗口算法、坡面径流模拟算法和谷线搜索算法三种。移动窗口算法由于提取的河网存在不连续,已经很少应用;谷线搜索算法虽然能提取连续河网,但其适用范围局限于小尺度 DEM,且不具备水文意义^[4],很难与分布式水文模型进行耦合,所以 Mark 和 O'Callaghan^[5-6]于 1984 年提出的坡面径流模拟算法是目前比较流行的一种算法。坡面径流模拟算法的实现分 4 步:① 确定 DEM 中每一栅格的水流方向;② 计算每一栅格的上游集水面积;③ 给定一个集水面积阈值;④ 提取水系及流域边界。

1 问题的提出

DEM 的分辨率对提取的流域特征参数具有明显的影响,数字流域及水系的提取都是建立在某种分辨率的 DEM 基础之上的。对于大尺度水文模型或中尺度水文模型而言,必须要有与之尺度相匹配的数字河网及数字流域。然而,粗网格 DEM 数据通常分辨率较低,在提取河网水系时,常因 DEM 所能提供的信息不足而导致生成的河网与实际河网相差较大;相比粗网格 DEM 数据,细网格 DEM 数据分辨率相对较高,能够提取比较合理的河网。在此情况下,可以考虑通过尺度转换技术将高分辨率 DEM 提取的数字流域水系转换成低分辨率的数字流域及河网。通常,尺度转换包括向上尺度化

(Up-scaling)和向下尺度化(Down-scaling)。向上尺度化是把给定尺度信息向更大尺度转换的过程;反之,向下尺度化即向较小尺度转换^[7]。显然,通过尺度转换技术将高分辨率 DEM 提取的数字流域及河网转换成低分辨率的数字流域及河网属于向上尺度化的范畴。

基于坡面径流模拟算法,以湖南省湘江支流洙水所在流域甘溪站以上集水区为例(该区域地处 112.9° - 114.2°E, 25.9° - 27.4°N, 控制面积 9972 km²),分别采用 3"分辨率数据 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) 和 3 种 30"分辨率数据提取流域数字水系,包括美国国家航空航天局(NASA)的 SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission) 数据、美国地质调查局(USGS)的 GTOPO30 (Global 30 Arc-Second Elevation Data Set) 数据和美国国家海洋和大气局(NOAA)的 GLOBE (Global Land One-kilometer Base Elevation) 数据。结果, SRTM3 数据能获取比较合理的数字水系,而 SRTM30 数据、GTOPO30 数据和 GLOBE 数据均因数据分辨率低而不能提取满意的数字水系(如图 1, 图中各方块代表实际流域出口)。

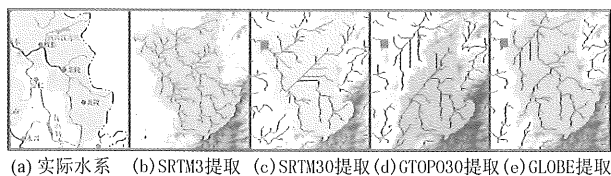


图 1 洙水流域实际水系及各种 DEM 提取水系
Fig. 1 Actual drainage network and drainage networks extracted by different DEMs in the Mishui watershed

洙水流域地处山区,极易发生暴雨性山洪。采用拥有良好空间差异性描述能力的分布式水文模型实施全流域洪水预报是十分必要的防汛措施。水文建模若采用 3"栅格数据($1801 \times 1561 = 2\,811\,361$ 个栅格数据采样点),数据冗长,计算量巨大;而流域地形复杂,山洪流急,极短时间就可到达预测断面,过长的计算耗时势必不能满足预见期的需要,模型宜采用大尺度栅格(30"水平分辨率)。鉴于大尺度栅格数据提取的数字水系无法满足水文建模的要求,向上尺度化技术则能较好地实现数字水系的尺度转换,将 3"DEM 提取的数字流域及水系转换成 30"数字流域及水系,从而满足水文建模需求。

2 数字水系的向上尺度化

向上尺度化是信息分配(Distributing)和聚集

(Aggregating)的过程^[2]。

水系向上尺度化通常有两种思路^[8]:一是将高分辨率DEM数据向上尺度化成合理的低分辨率DEM数据(最简单的方法便是取平均高程^[9]),通过重采样后的DEM数据提取流域水系。该方法在大尺度水文模型与GCM大气环流模式耦合过程中最常见,但受DEM精度影响较大,因为径流总是发生在较低高程处,在尺度转换较大情况下(几十公里甚至上百公里),高程信息的表达就不够充分,尤其是在较低高程处,前面提及的各种低分辨率的DEM数据对于水系提取效果不佳便是如此。另一种方法则考虑大尺度栅格内“小栅格”的差异性及高分辨率DEM数据中的各种地形信息,将大尺度栅格内的具有相同水文响应而不同位置的小栅格水流进行“聚类”,类似于大气模型下的“马赛克”方法^[10]。Shaw等^[11]运用此类方法,基于TOPAZ^[12]软件,为大尺度水文模型WAT-FLOOD^[13]确定了水系,精度较DEM重采样方法提取的水系有所提高。

将3"DEM提取的数字水系转换成30"数字水系的关键在于如何获取30"栅格的流向,从而获取30"栅格的集水面积来最终确定水系。流向的分配过程考虑将每10×10个3"流向栅格分配至同一栅格内,该栅格尺度恰好与30"栅格尺度匹配,由这10×10个流向的聚集过程来判断一个大栅格(30")的流向。

2.1 河网水流与向量

向量是一个物理概念,通常把既有大小又有方向的量叫做向量,亦称矢量。现实世界中,这种量是很多的,如力、速度、加速度等。河网内的水流位移也是既有大小又有方向的量,其方向由河段流向决定,大小由来水量决定;对于栅格化数字河网,栅格内水流同样可视为向量,其方向由栅格流向决定,大小由集水面积决定。2003年,Shaw^[8]等人基于河网水流的向量特点,运用向量加法原则将小尺度河网转化化为大尺度河网。数学中,通常用点表示位置,用射线表示方向,向量表现为解析几何中的有向线段。向量相加遵循平行四边形法则首尾相接(如图2c)。河网水流具有向量特性,同样可以进行相加。在数字水系的向上尺度化过程中,通过对每个河网小栅格内水流向量相加可以获得大栅格的水流向量,进而确定大栅格流向,最终实现河网向上尺度的转换。

2.2 最大集水面积出流小栅格

出流小栅格定义为水流直接流出大栅格边缘的

小栅格,大栅格内的水最终都是通过这些小栅格流出。大栅格的流向很大程度上受其出流方向影响,因为基于坡面径流模拟算法提取水系的前提假设即为任何栅格内的水都能流出(任何栅格都应具备出流,即使是在DEM矩阵的边缘),该算法中栅格流向即由出流方向决定;而出流小栅格的集水面积代表其所汇集的上游来水面积,其同时表现为这些出流小栅格的出流权重,拥有较大集水面积的出流小栅格将拥有更大的出流权重,在大栅格的出流过程中占据主导因素。因而,确定最大集水面积出流小栅格对流向聚集尤显重要。

2.3 河网栅格流向聚集

若大栅格包含有河网小栅格(小栅格集水面积大于等于临界集水面积),该大栅格被定义为河网栅格。Shaw等^[8]人经过研究发现向量算法在河网栅格中比在全流域栅格中更适用,但Dean Shaw忽略了这样一个事实,即一个大栅格可能包含多条相互独立的河网(如图2a),其在计算河网向量时考虑了大栅格内所有的河网小栅格向量。事实上,对流向聚集起主导作用的是最大集水面积出流小栅格所在的河网,考虑所有的河网向量会对流向聚集的判断产生干扰。因而,河网流向聚集过程中只考虑最大集水面积出流小栅格所在的河网流向,该河网水量包含了大栅格内汇入其的坡地集水量,也反映了坡地栅格对于大栅格水流向量的影响。

具体做法为,在大栅格边缘遍历出流小栅格,依次记录其流向和集水面积,找寻拥有最大集水面积的出流小栅格(在拥有多个相同的最大集水面积的出流小栅格的情况下,将会随机选择一个出流小栅格,通常可以考虑第一次找寻到的那个出流小栅格),沿着该出流小栅格向上游遍历,找寻大栅格内流经该小栅格的所有河网栅格(如图2b),记录这些河网栅格流向和集水面积,建立河网向量集,遵循平行四边形法则对河网向量相加,得到聚集向量,其方向即为聚集流向。

流向根据向量方向确定,如图2d,方向被划分为a至h共8个度带,依次代表8个流向,河网向量以其方向归属度带来判断最终流向。图2d中聚集向量归属于c度带,聚集流向即为c方向。

2.4 坡地栅格流向聚集

假如转换后水系要使用到大尺度模型中,河网尺度向上化幅度较大,其大栅格中可能都包含有河网栅格,通过向量判断河网流向就可以判断全流域栅格流向,Dean Shaw所转换的水系便是如此^[8]。但沱水流域尺度向上化幅度较小,有些大栅格并未

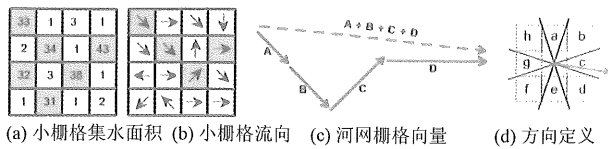
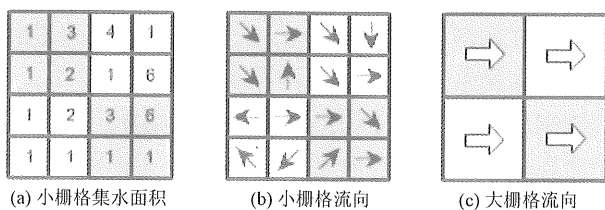


图 2 河网栅格流向的分配和聚集

Fig. 2 Flow direction distribution and aggregation of channel grids

包含河网小栅格, 仅通过向量方法无法获取合理的全流域流向, 需单独考虑坡地栅格的流向。

若大栅格内所包含的小栅格均为坡地栅格 (小栅格集水面积小于临界集水面积), 该大栅格将被定义为坡地栅格, 其流向判断依据最大集水面积原则, 即拥有最大集水面积的出流栅格的流向将被优先考虑, 沿着该小栅格的出流方向, 中心大栅格内水流最终到达某个与之相邻的大栅格, 中心大栅格的流向便指向该相邻大栅格 (图 3)。

图 3 坡地栅格流向的分配和聚集 (以 2×2 矩阵为例)Fig. 3 Flow direction distribution and aggregation of hillslope grids (A case in 2×2 matrix)

2.5 栅格流向修正

流向聚集后, 计算大栅格集水面积, 往往存在空洞点 (图 4c, 空洞使水系产生断裂), 原因是这些栅格与相邻的栅格流向恰好相对, 需进一步进行流向纠错。纠错仍按最大集水面积原则: 依次扫描这两个错误栅格周围的 8 个栅格, 判断其已有的入流集水面积, 拥有较小入流集水面积的栅格流向依照拥有较大入流集水面积的栅格流向进行修正。已修正的栅格流向仍可能与其他栅格存在对立, 需依照上述原则, 反复进行扫描; 在此过程中有些栅格始终存在对立流向的情况, 这是因为这些栅格周围存在两个对立方向的栅格, 该栅格最初方向与其中一个方向对立, 依据最大集水面积原则, 无论如何改变栅格流向都只能在二者之间游走。如图 4a 所示, A 栅格和 B 栅格依据最大集水面积原则改变方向仍存对立流向 (图 4b)。

图中, AB 区域类似于 DEM 数据中的洼地区域, 若能在此“洼地”中开一个口子, 水流便能流出, 一个简单的处理方法是在 AB 中任选其一,

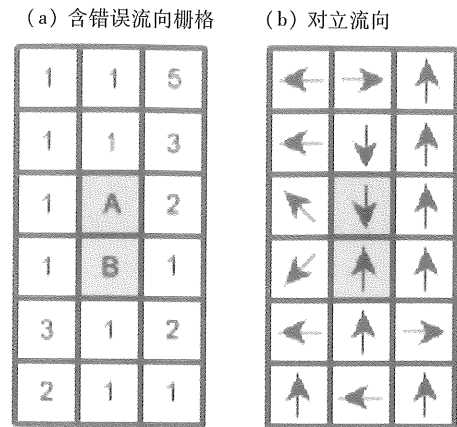


图 4 含错误流向栅格

Fig. 4 Grids containing incorrect direction

用除两对立流向外的任意一个方向给其标注流向, 然后继续判断是否存在对立流向, 反复进行扫描, 直至所有栅格都被标上合理流向。该方法通常不会对主干河网产生较大影响, 只会局部改变坡地流向, 因为出现这种情况的栅格一般分布在坡地上, 而主河道上栅格集水面积都比较大, 依据最大集水面积原则通常能获取合理流向。

通过流向的修正得到尺度转换后的流向, 并修正原始 DEM 数据, 使其与流向保持一致性; 以流向为基础推求栅格集水面积, 最终可以获取大尺度水系, 涿水流域水系提取后流域面积 ($9\,973.57\text{ km}^2$) 与水文年间刊布流域实际控制面积 ($9\,972\text{ km}^2$) 误差仅 0.02% , 满足水文建模要求。图 5 展示了因流向错误而存在空洞的水系及修正后的水系。

转换后水系存在非单宽化水系 (图 6a), 需进行单宽化处理 (图 6b), 尽可能舍弃“L”形河道。从流域出口向上搜索进行河网遍历, 根据拓扑学原理, 从“最左边”进行搜索, 遇到源头折反, 直至返回流域出口, 一边搜索一边进行河网单宽化处理, 修正栅格流向并实现水系单宽化。

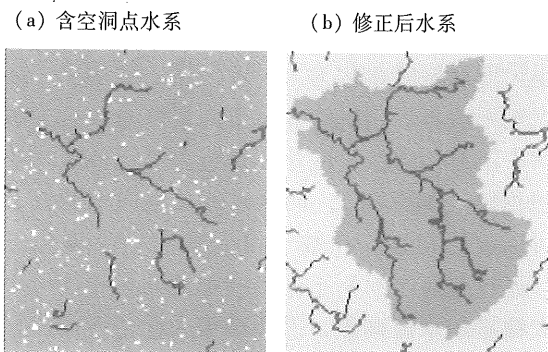


图 5 含空洞点水系及修正后水系

Fig. 5 Drainage network containing voids and drainage network after correction

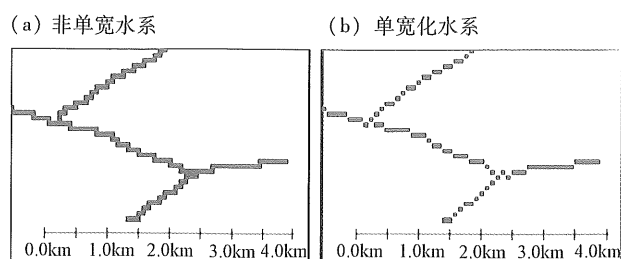


图6 栅格水系单宽化

Fig. 6 “Unit-width” transformation of raster drainage network

3 应用实例与分析

为了验证水系尺度转换算法的有效性与适应性,本文选择了五个流域进行水系尺度转换,分别是肇兰新河流域(黑龙江松嫩平原, 125.3125° – 126.3125°E, 45.8125° – 47.125°N)、老哈河流域(辽宁, 117.25° – 119.9375°E, 41.0625° – 43.3125°N)、都思兔河流域(内蒙古鄂尔多斯, 106.875° – 108.5°E, 38.1875° – 39.6875°N)、清流河流域(四川盆地, 105.125° – 105.625°E, 29.375° – 30.125°N)以及洮水流域(湖南, 112.9° – 114.2°E, 25.9° – 27.4°N)。分别采用 SRTM3 数据及 GTOP30 数据提取水系、并将 SRTM3 提取水系向上尺度化(转换至与 GTOP30 数据提取水系相同尺度)。最后,采用水系密度和流域宽度分布两个指标对三种水系进行比较评价。

流域的宽度函数定义如下^[14]:

$$W(x) = \sum_{i=1}^N n_i(x, d_{i_{\min}}, d_{i_{\max}}) \quad (1)$$

$$n_i(x, d_{i_{\min}}, d_{i_{\max}}) = \begin{cases} 1, & d_{i_{\min}} < x \leq d_{i_{\max}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中 x 为河网中任意一点流至流域出口的距离,例如, $x = 0$ 代表流域出口; $W(x)$ 是位于同一流动距离上的河网连接(link or segment)的数目; N 是全流域河网的连接数; $d_{i_{\min}}$ 和 $d_{i_{\max}}$ 分别代表河网中任意

一段连接 i (link i or segment i) 的下游接点和上游接点的流动距离。图7展示了洮水流域各尺度下的流域宽度分布(3"水系阈值取4000栅格,相应地,30"水系阈值取40栅格),相比直接用GTOP30数据提取水系的宽度分布,尺度转换后水系的宽度分布与高精度提取水系的宽度分布更加接近。为了进一步量化比较,可采用类似于Nash-Sutcliffe确定性系数的方法进行检验^[15],公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (W_i(x) - \hat{W}_i(x))^2}{\sum_i (W_i(x) - \bar{W}_i(x))^2} \quad (3)$$

式中 $W_i(x)$ 是高精度水系(SRTM3提取)的流域宽度分布值; $\hat{W}_i(x)$ 是低精度水系(GTOP30提取水系或尺度转换后水系)的流域宽度分布值; $\bar{W}_i(x)$ 是高精度水系的宽度分布值的均值。值得注意的是,必须将3"水系的宽度分布值每间隔10个栅格取1值与30"水系的宽度分布值进行计算。

各流域不同尺度水系密度与宽度分布拟合确定系数如表1所示。通过表1中宽度分布及密度指标可以发现,相比直接用GTOP30数据(低分辨率DEM)提取的水系,通过向上尺度化转换后的水系更加接近SRTM3数据(高分辨率DEM)提取的水系。图8展示了各个流域提取的不同尺度的水系。对于平原区水系,直接用低精度的DEM提取水系常常会因为高程信息不充分而提取不出正确水系(肇兰新河、清流河、洮水存在平原区,采用GTOP30数据都提取不出正确水系),相比之下,高分辨率DEM在平原区提取水系则有着明显优势,并且,从高分辨率水系通过尺度向上化转换后的水系能有效保留高精度水系信息,使得尺度转换后水系在细节上更接近于高精度水系。通过以上五个各种类型流域的检验,尺度转换算法均具有较好的适应性,其在平原区水系的提取中是有效的,能够满足水文建模的需要。

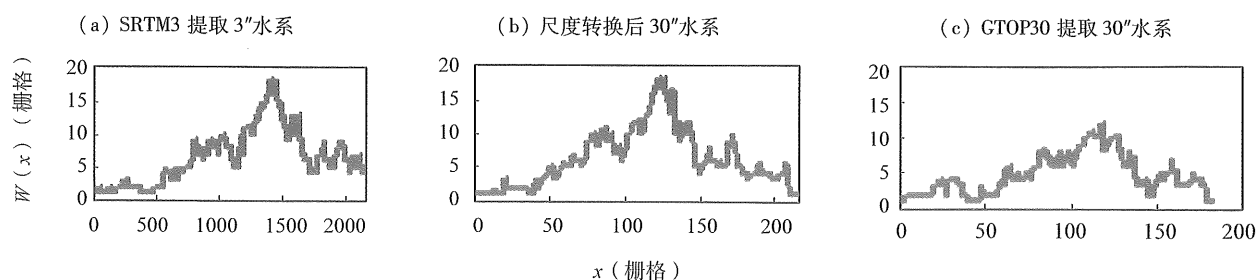


图7 洮水流域各种尺度水系流域宽度分布

Fig. 7 Width-function distribution of drainage networks extracted at different scales in the Mishui watershed

表 1 不同尺度水系比较结果

Table 1 Comparison of drainage networks extracted in different scales

流域	类型	3"水系	尺度转换后 30"水系		30"水系	
		密度/ $(1 \cdot \text{km}^{-1})$	宽度分布确定系数	密度/ $(1 \cdot \text{km}^{-1})$	宽度分布确定系数	密度/ $(1 \cdot \text{km}^{-1})$
肇兰新河	平原	0.189626	0.677938	0.192119	0.621978	0.157184
老哈河	山区	0.176099	0.279186	0.176498	0.060500	0.147440
都思兔河	高原	0.173188	0.408404	0.175598	0.330953	0.143237
清流河	平原	0.154145	-0.977270	0.136361	-2.222160	0.127638
洮水	平原 + 山区	0.155316	0.316091	0.143441	-0.130780	0.136810

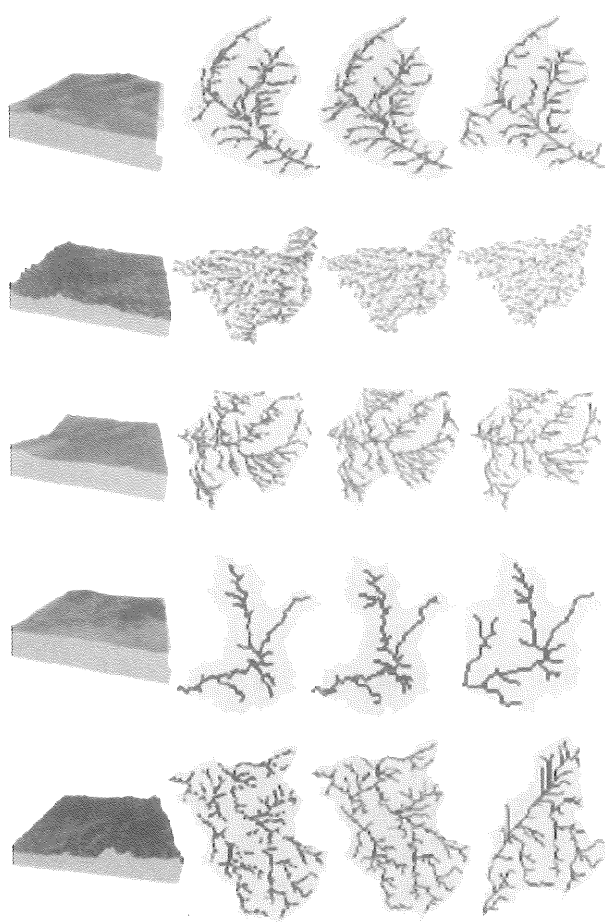


图 8 提取的各种尺度水系（自上而下各行依次为肇兰新河流域、老哈河流域、都思兔河流域、清流河流域、洮水流域，自左至右各列依次为 DEM 三维图、SRTM3 DEM 提取水系、尺度向上化后水系、GTOPO30 DEM 提取水系）

Fig. 8 3D-view of DEM, drainage networks extracted by SRTM3 DEM, upscaled drainage networks and drainage networks extracted by GTOPO30 DEM of drainage networks extracted at different scales. From the top down: the Zhaolanxin watershed, the Laohahe watershed, the Dusitu watershed, the Qingliuhe watershed and the Mishui watershed

4 结 语

低分辨率 DEM 提取数字水系精度不够，无法满足水文模型建模需要，利用尺度转换方法将高分辨率水系转换成低分辨率水系，使得问题迎刃而解。洮水流域应用结果表明，该方法简单有效，对于平原区水系提取及山区水系提取都有较好的适应性，转换后水系与实际相符，且精度满足水文模型建模要求。

参考文献：

[1] BAND L E, MOORE I D. Scale: Landscape attributes and geographical information systems [J]. Hydrol Process, 1995(9):401 - 422.

[2] 刘建梅, 裴铁璠. 水文尺度转换研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2305 - 2310.

LIU Jianmei, PEI Tiefan. Research progress on hydrological scaling [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2305 - 2310.

[3] 闫国年, 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.

LU Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(6): 562 - 569.

[4] 唐从国, 刘丛强. 基于 DEM 提取流域河网研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25: 313 - 315.

TANG Congguo, LIU Congqiang. Research on extraction of stream network based on digital elevation models [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25: 313 - 315.

[5] MARK D M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models [J]. Cartographica, 1984 (21): 168 - 178.

- BX1 adsorption [J]. Environmental Science, 2004, 25 (1): 87 - 90.
- [3] KIRBY N, MARCHANT R, McMULLAN G. Decolourisation of synthetic textile dyes by *phlebia tremellosa* [J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, 188 (1): 93 - 96.
- [4] YESILADA O, CING S, ASMA D. Decolourisation of the textile dye Astrazon Red FBL by *Funalia troglia* pellets [J]. Bioresource Technology, 2002, 81 (2): 155 - 157.
- [5] 薛锐, 赵美玲. 印染废水脱色的研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2005, 30(3): 30 - 33.
- XUE Rui, ZHAO Meiling. Research of color removal of printed wastewater [J]. Environmental Science and Management, 2005, 30(3): 30 - 33.
- [6] 辛宝平, 杨敏, 庄源益. 降解菌和吸附菌的联合作用对混合染料的脱色研究 [J]. 环境科学, 2002, 23: 6 - 10.
- XIN Baoping, YANG Min, ZHUANG Yuanyi. Decolorization of mixed dyes by mixed culture of GX2 and BX26 [J]. Environmental Science, 2002, 23: 6 - 10.
- [7] 吴赞敏, 瓮亮, 魏乃福, 等. 印染废水脱色菌的培育及脱色工艺的研究 [J]. 染料与染色, 2005, 42(1): 60 - 62.
- WU Zanmin, WENG Liang, WEI Naifu, et al. A study on sieving decolorizing germ of dyeing wastewater and Decolorizing Technics [J]. Dyestuffs and coloration, 2005, 42 (1): 60 - 62.
- [8] 张世敏, 徐淑霞, 张跃灵, 等. 黄孢原毛平革菌对印染废水脱色条件研究 [J]. 安全与环境学报, 2005, 5(3): 9 - 11.
- ZHANG Shimin, XU Shuxia, ZHANG Yaoling, et al. Decolorization of dyeing wastewater by *Phanerochaete Hrysosporium* [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(3): 9 - 11.
- [9] 满悦芝, 庄源益, 辛宝平, 等. 染料生物吸附影响因素与解吸条件研究 [J]. 化工环保, 2003, 23(4): 187 - 190.
- MAN Yuezhi, ZHUANG Yuanyi, XIN Baoping, et al. Study on affecting factors of biological adsorption of dyes and desorption conditions [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2003, 23(4): 187 - 190.
- [10] 辛宝平, 庄源益, 邹其猛, 等. 青霉菌 GX2 对蒽醌染料的吸附作用 [J]. 环境科学, 2001, 22(1): 14 - 18.
- XIN Baoping, ZHUANG Yuanyi, ZOU Qimeng, et al. Adsorption of anthraquinone dyes by biosorbent GX2 [J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 14 - 18.
- [11] MAHONY T O, GUIBAL E, TOBIN J M. Reactive dye biosorption by *Rhizopus arrhizus* biomass [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 31 (4): 456 - 463.
- [12] 朱宏飞, 李定龙, 朱传为. 印染废水的危害及源头治理举措 [J]. 环境科学与管理, 2007, 32(11): 90 - 94.
- ZHU Hongfei, LI Dinglong, ZHU Chuanwei. Harm of the printing and dyeing wastewater and the emission source treatment [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(11): 90 - 94.

(上接第 106 页)

- [6] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The Extraction of Drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323 - 344.
- [7] BLÖSCHL G, SIVAPALAN M. Scale issues in hydrological modeling: A review. Hydrol Process [J]. 1995, 9: 251 - 290.
- [8] SHAW D, MARTZ L W, PIETRONIRO A. Flow routing in large-scale models using vector addition [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 38 - 47.
- [9] ARORA V K, BOER G J. A variable velocity flow routing algorithm for GCMs [J]. Journal of Geophysical research, 1999, 104 (D24): 30965 - 30979.
- [10] ARORA V K, CHIEW F H S, GRAYSON R B. Effect of sub-grid variability of soil moisture and precipitation intensity on surface runoff and streamflow [J]. Journal of Geophysical research, 2001, 106 (D15): 17073 - 17091.
- [11] SHAW D, MARTZ L W, PIETRONIRO A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models [J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 149 - 168.
- [12] GARBRECHT J, MARTZ L W. TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and sub-catchment parameterization [EB/OL]. <http://duke.usask.ca/wmartzl/topaz/overview.html>.
- [13] KOUWEN N. "WATFLOOD: A Micro-Computer based Flood Forecasting System based on Real-Time Weather Radar" [J]. Canadian Water Resources Journal, 1988, 13 (1): 62-77.
- [14] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [15] 杨邦. 集水面积阈值确定及其水文响应研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.