

# 基于 DEM 与实测河网的流域编码方法

罗翔宇, 贾仰文, 王建华, 王 浩, 秦大庸, 周祖昊

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

**摘要:** 借助于 GIS 技术对大流域进行划分与编码。修正实测河道上部分栅格单元的高程, 以避免大面积“伪洼地”的出现, 从修正后的栅格型数字高程模型(DEM)提取出与实测河网比较一致的模拟河网。提取出模拟河网后, 再进行河网的编码, 以及流域的划分与编码。提出了一种对 Pfafstetter 规则的改进方法, 并且按照改进后的 Pfafstetter 规则来对河网与流域进行编码。所有编码工作是由本次研究中专门编制的程序来自动完成。将提出的方法应用于黄河流域, 将整个黄河流域划分为 8 255 个子流域并赋予了 Pfafstetter 编码。

**关键词:** 流域编码; Pfafstetter 规则; 河网; GIS; DEM; 黄河流域

中图分类号: P343.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)02-0259-06

在流域规划与管理工作中, 通常需要对流域进行划分和编码。另外, 在较大的流域上应用分布式水文模型时, 一般也需要将流域划分为更小的子流域。比如在对黄河流域这样的大流域进行分布式水文模拟时, 如果选择规则的方形格子作为计算单元, 则考虑到计算机的计算能力及存贮量等因素的限制, 只能选用较大的格子(比如 10 km × 10 km)。然而, 选用较大的格子作为计算单元具有明显的弊端, 它使得更难于模拟地形对产汇流的影响, 而且很可能严重地歪曲了水流的流向与流量, 特别是在山区。较好的方法是采用相对较小的子流域作为计算单元。所以在流域水文模拟中, 流域的划分和编码也是一项重要的基础工作。

本文的流域编码方法, 是先结合实测河网的信息, 从栅格型数字高程模型(Digital Elevation Model DEM)提取出模拟河网, 然后再进行流域划分与编码。Otto Pfafstetter 于 1989 年第一次明确地提出了 Pfafstetter 流域编码规则<sup>[1]</sup>。本文对 Pfafstetter 规则作了改进, 并且依据改进后的 Pfafstetter 规则进行流域编码, 并将该法应用于黄河流域。

## 1 模拟河网的提取

### 1.1 提取步骤

采用的黄河流域 DEM 来自于美国地质调查局(USGS)的 EROS 数据中心建立的分辨率为 30 弧秒的全球陆地 DEM(也称 GTOPO30)。在提取模拟河网前, 先将 DEM 转换为等面积投影, 栅格的边长设定为 1 km。然后利用 GIS 软件对 DEM 数据进行填洼、生成流向、计算流入累计数及提取河道等一系列计算, 可得到栅格形式的模拟河网。原始 DEM 上常常存在洼地, 首先要对 DEM 进行填洼处理。填洼后, 按照 O' Callaghan 与 Mark 提出的 8 向法<sup>[2]</sup>确定每一栅格单元的水流流向, 在此基础上, 计算每一栅格单元的流入单元累积数, 即流入该单元的上游单元总数。定义流入单元累积数超过某一阈值的单元为河道单元, 则设定好阈值后, 可得到基于 DEM 的模拟河网。河道单元的阈值与地形、地质、土壤、植被及气候等多种因素有关, 它在不同地方的差异很大。本

收稿日期: 2004-10-22; 修订日期: 2005-03-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(G1999043602)

作者简介: 罗翔宇(1975-), 男, 重庆人, 中国水利水电科学研究院工程师, 硕士, 主要从事水文及水资源研究。

次研究是对大流域进行划分和编码, 所划分子流域的平均面积相对较大, 只要提取出较主要的河道就可以满足划分子流域的要求, 所以河道单元的阈值选得较大, 定为  $50 \text{ km}^2$ 。在河网中, 河道之间的交汇点把河网分为许多条河链, 同一条河链上的栅格单元具有相同的河链值。

## 1.2 利用实测河网修正 DEM

由于 DEM 上洼地或平坦区域等因素的影响, 按照上述步骤直接利用 DEM 提取出的模拟河网往往与实测河网不能完全一致, 有的甚至差别较大。许多已有的处理方法都是对 DEM 进行修正后再提取模拟河网<sup>[3]</sup>。Saunders 曾比较了几种在提取模拟河网前修正 DEM 高程(特别是实测河网上栅格单元的高程)的方法<sup>[4]</sup>, 基本思路是降低实测河网上所有单元的高程, 使模拟河网与实测河网保持一致。其中, Tribburn 方法效果较好, 且对 DEM 高程值的修正最小。但是 Tribburn 方法需要逐河段地检查实测河网上所有单元的高程, 比较费时间。另外, 它还要将实测河网上所有单元的高程降低相同的数值, 所以高程被修正的单元也较多。本文采取了一种较简便的方法, 只对实测河网上某些栅格单元的高程进行修正, 然后可提取出与实测河网比较一致的模拟河网。这种方法花费的时间不多, 且高程被修正的单元相对较少。

本文直接从原始 DEM 提取的黄河流域模拟河网中, 较大的问题是不少地方存在平行河道(图 1 中圆圈标出的部分), 特别是在河套地区和关中平原地区。根据经验, 在 DEM 中较平缓的地带或填洼生成的平地上常常会产生平行河道。研究中通过比较填洼前后的 DEM, 可知道产生平行河道的地带都是在填洼过程中生成的平地, 即这些地带实际上是原始 DEM 中的洼地。对照实测水系图, 可以判断这些洼地属于“伪洼地”。

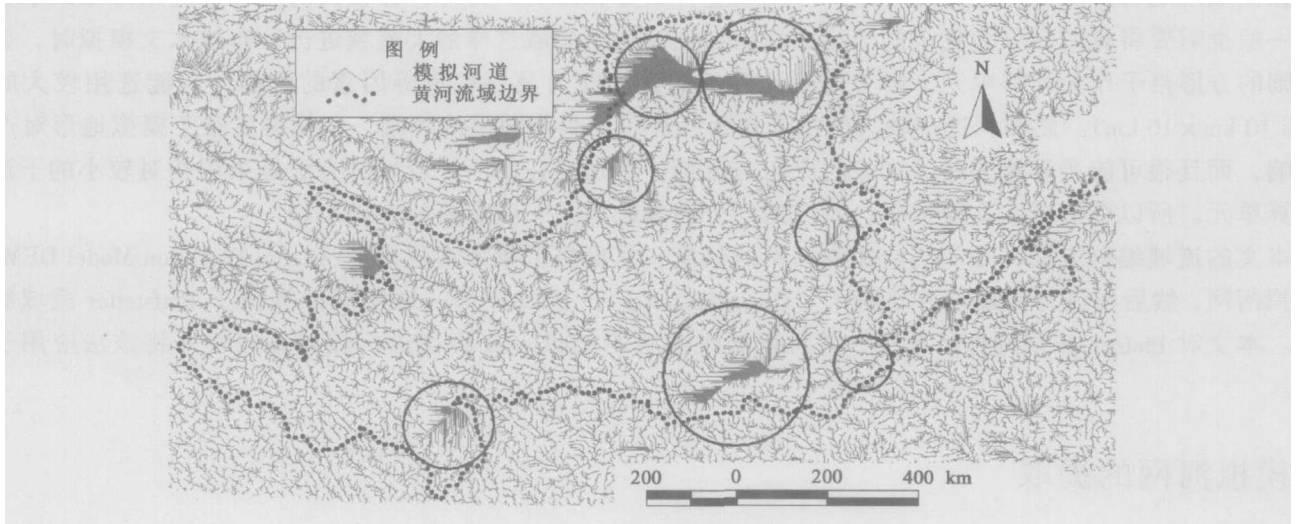


图 1 从原始 DEM 提取的模拟河网

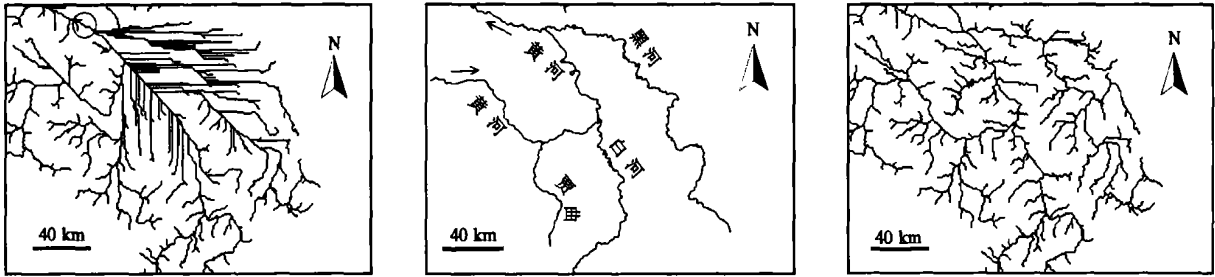
Fig. 1 Modelled river network directly extracted from the primary DEM

通过查看填洼前的 DEM, 可以了解形成伪洼地的原因。把实测河网图叠放到填洼前的 DEM 上, 然后在伪洼地出口的附近, 沿着河道从上游到下游查看高程数据。比如在图 2(a) 中, 查看圆圈范围内河道上单元的高程, 可以发现出口处有一个或数个单元的高程大于出口上游的高程, 这些凸起来的单元位于河道上, 阻塞了河道, 因而在其上游形成了伪洼地。河道上出现这些凸起来的单元, 一种原因是 DEM 的水平分辨率较低。河道上的单元, 可能还覆盖了部分两岸坡地, 如果正好选择了坡地的某个高程代表此单元的高程, 则就造成了此单元的高程偏大。在狭窄的河谷地带, 河道两岸高程变化大, 这种情况更容易出现。

为处理河道上单元的高程偏大的问题, 本文采用的方法分以下几个步骤: ①直接在原始 DEM 上进行填洼、提取模拟河网等步骤, 然后找出伪洼地; ②根据伪洼地和实测河网来确定高程偏大单元所在的河流。比如依据图 2(a) 和图 2(b), 推断高程偏大单元位于黄河干流上; ③在步骤 ②确定的每一条河流上, 从上游往下

游 沿着水流行进的方向查看填注前 DEM 上的高程数据, 如果发现下游单元的高程大于上游单元的高程, 则认为下游单元的高程偏大, 要把下游单元的高程降低到与紧邻上游单元的高程相同, 使水流能够顺利通过。

用这种方法对原始 DEM 作修正后, 再进行填注、提取模拟河网等步骤。提取出的模拟河网与实测河网(比例尺 1: 25 万)较为一致, 不再存在平行河道的问题, 参见图 2(c)。从修正后 DEM 提取出的黄河流域模拟河网如图 3 所示。



(a) 从原始 DEM 提取的模拟河网

(b) 实测河网

(c) 从修正后 DEM 提取的模拟河网

图 2 实测河网与模拟河网

Fig 2 Examples of surveyed river network and modelled river network

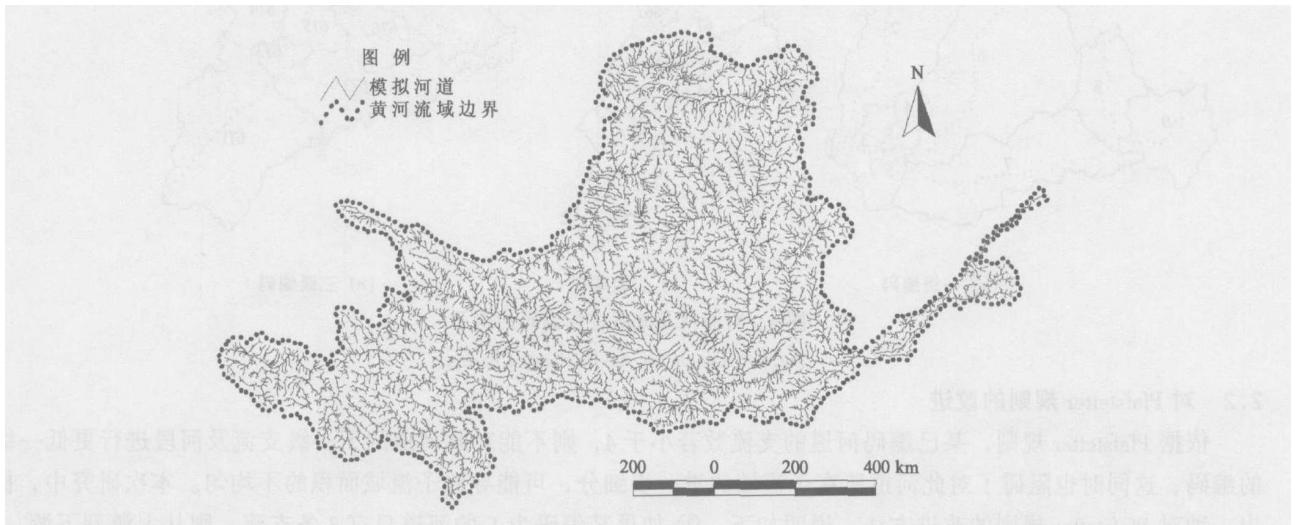


图 3 从修正后 DEM 提取的黄河流域模拟河网

Fig 3 Modelled river network extracted from the modified DEM in the Yellow River basin

## 2 流域编码

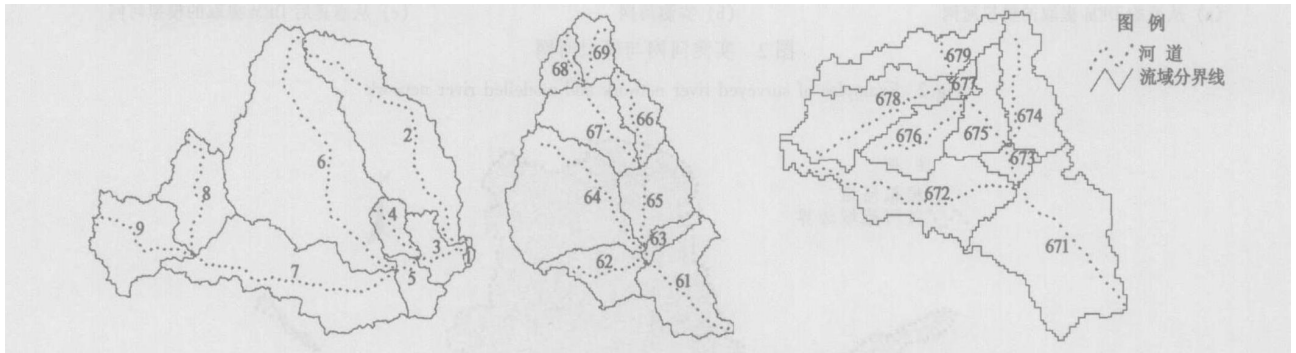
提取出模拟河网后, 再利用相关的计算结果进行流域编码工作。流域编码工作包括两部分内容, 一是对河网的编码, 二是对流域进行子流域划分与编码。为叙述简洁, 也将这两部分工作统称为流域编码。本文按照改进的 Pfafstetter 规则进行流域编码。

### 2.1 Pfafstetter 规则

Pfafstetter 规则是基于河网的拓扑关系及河道的集水面积, 对流域进行从大到小的逐级划分和编码。在此规则下, 很大的流域也可以被划分为很多较小的子流域, 并且每个子流域都被赋给唯一的 Pfafstetter 编码。K. L. Verdin 和 J. P. Verdin 曾将 Pfafstetter 编码规则扩展, 对北美大陆进行了流域划分及编码<sup>[1]</sup>。实际上, Pfafstetter 规则也是对河网中的河道进行编码的一套规则。Pfafstetter 编码规则具有诸多优点, 比如: 编码中包含有拓扑信息; 编码规则很有规律, 利于计算机的自动处理; 可将大流域划分为面积很小的子流域; 编码所需要的数字较

少; 适用范围广。

具体来讲, 此规则按照以下几个步骤给河网编码, 以及对流域进行划分与编码: ① 依据集水面积较大原则确定流域的干流。具体方法是, 从流域出口开始逆流而上, 如果遇到河道分岔, 则比较两条河流的集水面积, 并认为集水面积较大的河流是属于干流, 按此方法一直上溯到干流的源头, 即是确定出了流域的干流; ② 找出流域中集水面积最大的 4 条一级支流, 从下游到上游依次给 4 条支流赋上编码 2、4、6 和 8, (图 4(a)); ③ 4 条支流与干流的交汇点把干流分为 5 个河段, 从下游到上游依次给 5 个河段赋上编码 1、3、5、7 和 9, 至此完成对河网的第一级编码; ④ 已编码的河道如果有 4 条或 4 条以上的下一级支流, 则可对此河道的下一级支流及河段应用上述规则进行第二级编码(图 4(b)), 在支流 6 上进行第二级编码。二级编码包括两位数字, 左边一个数字即一级编码, 右边一个数字是本级编码(注: 在对某一河道编码时, 此河道具有 4 条最大的下一级支流, 此河道本身又被分为 5 个河段; 支流与河段统称为河道); ⑤ 应用相同的规则, 继续进行第三级编码。例如图 4(c) 中, 在河段 67 上进行第三级编码。依此类推, 对河网进行逐级编码; ⑥ 然后对流域进行划分与编码。把各个已编码河道的集水区域分别作为子流域, 各子流域的编码与对应河道的河道编码相同。子流域与河道一一对应, 两者具有相同编码(图 4)。



(a) 一级编码 (b) 二级编码 (c) 三级编码

图 4 对河网及流域进行编码的例子

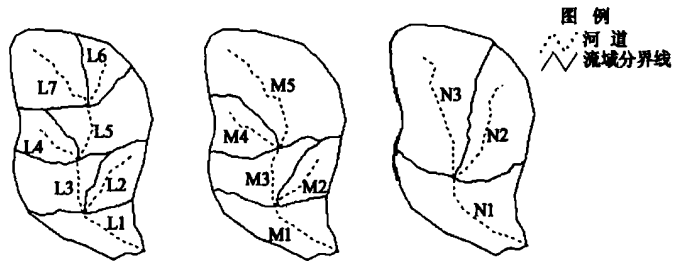
Fig. 4 Example for subdivisions of basins

### 2.2 对 Pfafstetter 规则的改进

依据 Pfafstetter 规则, 某已编码河道的支流数若小于 4, 则不能对此河道的下一级支流及河段进行更低一级的编码, 这同时也阻碍了对此河道所在子流域的进一步细分, 可能导致子流域面积的不均匀。本次研究中, 提出一种对 Pfafstetter 规则的改进方法, 说明如下: ① 如果某编码为 L 的河道只有 3 条支流, 则从上游到下游, 3 条支流的低一级编码依次为 6、4、2; 3 条支流与河道 L 的交汇点把河道 L 分为 4 个河段, 从上游到下游, 4 个河段的低一级编码依次为 7、5、3、1, 见图 5(a); ② 如果某编码为 M 的河道只有 2 条支流, 则同理, 2 条支流的低一级编码为 4、2; 3 个河段的低一级编码为 5、3、1, 见图 5(b); ③ 如果某编码为 N 的河道只有 1 条支流, 则支流的低一级编码为 2, 2 个河段的低一级编码为 3、1, 见图 5(c)。

### 2.3 流域编码程序简介

Pfafstetter 规则很有规律, 有利于计算机自动完成流域编码过程, 研究中编制了程序来完成流域编码工作。编码过程分为两个步骤: 首先对河网上的河道编码, 然后进行流域编码。编码遵循 Pfafstetter 规则, 只是当某个已编码河道



(a) 河道 L 只有 3 条支流时 (b) 河道 M 只有 2 条支流时 (c) 河道 N 只有 1 条支流时

图 5 对 Pfafstetter 规则进行改进的示意图

Fig 5 Improvement of Pfafstetter coding rule

的支流数小于 4 时, 则按照改进后的 Pfafstetter 规则来进行更低一级的编码。

对河网编码时, 首先进行第一级编码, 接着是第二级编码, 这样逐级往下编码。编码的级数可以有几种选择: ① 逐级往下编码, 直到所有河道都被赋予了编码; ② 设定一个河道集水面积阈值, 如果某编码河道的集水面积小于此阈值, 则不再对此河道的下一级支流及河段进行更低一级编码; ③ 设定编码的级数, 即到某一级后, 不再进行更低级的编码。河网编码完成后, 已编码河道上的每一个栅格单元都被赋予一个河网编码值。然后再进行子流域划分及编码, 具体方法是界定出每一编码河道(包括支流与河段)的集水区域, 把每一集水区域作为一个子流域, 子流域的编码与其对应河道的河道编码相同。流域编码完成后, 流域范围内的每一个栅格单元都被赋予一个流域编码值。

### 3 黄河流域的划分及编码

应用上述方法, 对整个黄河流域作了细致的划分和编码, 最低到了六级编码, 全流域被划分为 8 255 个子流域, 子流域平均面积约为 96 km<sup>2</sup>。9 个一级子流域内部各自的子流域数目及子流域平均面积见表 1。

表 1 子流域数目及平均面积

Table 1 Number and average area of sub-basins within nine level-one sub-basins

一级子流域编号	一级子流域面积/km <sup>2</sup>	子流域数目	子流域平均面积/km <sup>2</sup>	一级子流域编号	一级子流域面积/km <sup>2</sup>	子流域数目	子流域平均面积/km <sup>2</sup>
1	72136	731	98.7	6	53308	587	90.8
2	135086	1371	98.5	7	242345	2497	97.1
3	9263	95	97.5	8	32922	347	94.9
4	39694	411	96.6	9	181395	1935	93.7
5	27515	281	97.9	全流域	793664	8255	96.1

图 6(a) 是对黄河流域进行一级划分及编码的结果。与实测水系图对照可知, 编码为 2、4、6 和 8 的 4 个子流域分别对应于黄河的 4 条一级支流渭河、汾河、无定河与湟水。图 6(b) 至图 6(f) 是二级、三级、四级、五级和

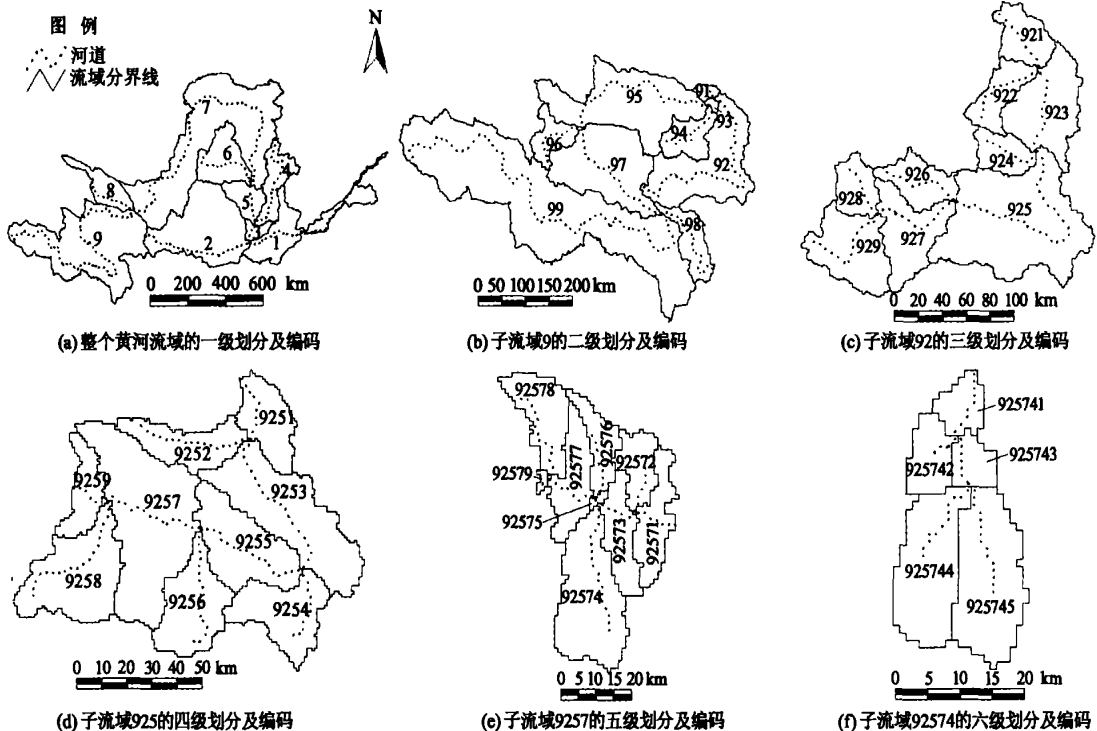


图 6 对黄河流域进行划分与编码的例子

Fig 6 Example for subdivisions and codification of the Yellow River basin

六级编码的举例。从图 6(a) 至图 6(f) 6 个图可看出不同级别子流域之间从上到下的嵌套关系。从图 6(f) 可看出, 在对子流域 92 574 作六级划分及编码时, 是应用了改进的 Pfafstetter 规则。

通过对照模拟河网与实测河网, 可确定模拟河网中的河道所代表河流的名称。图 6(b) 中, 编号为 92、94、96 与 98 的子流域所对应的河流分别是洮河、大夏河、曲什安河与黑河; 图 6(c) 中, 子流域 922、924、926 与 928 分别对应广通河、冶木河、博拉河与科才河; 图 6(d) 中, 子流域 9 252、9 254、9 256 与 9 258 分别对应羊沙河、迭藏河、大峪沟河与车巴河; 图 6(e) 中, 子流域 92574 与 92578 分别对应日久库河与克木尔塔河。

## 4 结 论

本文借助于 GIS 技术和专门编制的计算机程序, 能够比较高效地实现对大流域的划分和编码。首先是采取了比较简捷而有效的方法, 完成对原始 DEM 的修正, 并从修正后 DEM 提取与实测河网比较一致的模拟河网。然后是对河网编码, 以及对流域进行划分和编码。本文提出一种对 Pfafstetter 规划的改进方案, 改善了依据此规则划分出的子流域面积不匀的问题, 并按照改进后的 Pfafstetter 规则进行流域编码。所有编码工作由专门编制的程序自动完成, 效率较高。本文的方法被应用于黄河流域, 对整个黄河流域进行了划分和编码, 取得的研究成果在全黄河流域分布式水文模拟研究中发挥了重要作用<sup>[5]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Verdin K L, Verdin J P. A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 218: 1- 12.
- [2] 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.
- [3] 孔凡哲, 芮孝芳. 处理 DEM 中闭合洼地和平坦区域的一种新方法[J]. *水科学进展*, 2003, 14(3): 290- 294.
- [4] Saunders W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis[A]. 1999 ESRI User Conference[C]. 1999, 7: 24- 30. San Diego, California. <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>
- [5] 贾仰文, 王 浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发与验证[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 300- 308.

## Method for delineation and codification of a large basin based on DEM and surveyed river network\*

LUO Xiang-yu, JIA Yang-wen, WANG Jian-hua, WANG Hao, QIN Da-yong, ZHOU Zi-hao

(*Department of Water Resources, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

**Abstract:** This paper presents a method to subdivide and code a large river basin with the aid of GIS techniques. By overlapping the surveyed watercourses on the DEM, the elevation values of some convex cells in rivers are modified to remove the large-size falsely-closed depressions. Then a river network consistent with the surveyed river network is extracted from the modified DEM. The extracted river network is coded prior to subdivision and codification of the river basin. This paper also brings forward the improvement to the Pfafstetter coding rule because the area sizes of sub-basins at the lowest level may be quite uneven if the rule is directly adopted. The river network and the basin are coded according to the improved Pfafstetter coding rule. All tasks of codification are automatically accomplished by using a program developed in this study. The suggested method is applied to the Yellow River basin and the whole drainage basin is divided into 8255 sub-basins, of which each is assigned with a Pfafstetter code.

**Key words:** basin codification; Pfafstetter coding rule; river network; geographical information system; digital elevation model; the Yellow River basin

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (G19990436).