

流域流水网推导方法

张行南¹, 齐 晶², 张 丽³

(1. 河海大学水资源开发利用国家专业实验室, 江苏南京 210098; 2. 水利部海委海河下游管理局, 天津 300061;
3. 河海大学水资源开发利用国家专业实验室, 江苏南京 210098)

摘要:采用数字高程模型的网格高程直接确定网格上的径流流向(网格方向), 平地网格的方向由权重法确定, 坑网格的方向由沟渠法确定, 由此导出的流域排水网的合理性和实用性, 在四个流域上得到了验证。

关键词:数字高程模型; 网格方向; 流域; 流水网

中图分类号: TV21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2000)01-0026-06

用长方形网格去划分一个流域, 则各网格单元上的高程构成了数字高程模型 (DEM)。DEM 是详细描述地形和流域坡面上径流过程的一种有效方法。根据高程可确定各网格上径流的流向(网格方向), 连接网格方向即为流域流水网。Beven 和 Kirkby^[1], Depraetere^① 和 Wharton^[2] 都对流水网作了完整的定义。流水网是详细描述和研究流域水文过程的重要参数, 已被广泛地应用于各种地理信息系统中, 如 Depraetere^①, Squidant^② 和著名的 ARC/INFO 软件^③, 都开发了相应的模块。

网格方向有单方向模型和多方向模型之分。前者假定某一网格上产生的径流都流向一个最低的相邻网格, 后者认为径流按一定的比例流向若干个相对较低的相邻网格^④。Wolock 和 McCabe^[3] 在计算 TOPMODEL 的地形参数时, 对两种模型进行了比较。Holmgren^[4] 在模拟地下径流时使用了多方向模型。这些研究结果表明, 多方向模型对坡面径流描述相对来说较客观, 但它的数据结构复杂, 应用于相关的研究较困难。单方向模型是对径流过程的一种概化, 数据结构简单, 便于作进一步的深入研究。本文研究的是单方向模型中确定网格方向的方法。

在单方向模型中, 极大部分网格方向可由 DEM 直接确定, 即网格方向指向其相邻网格中的最低的一个。但下述两种情况下必须由特殊的方法来确定。

一是平地, 即某个被考察网格的 8 个相邻网格中, 最低的网格高程等于被考察的网格高程, 或者最低的网格数多于一个。Soille^[5] 采用了 Semi-Complectude Inferieure 方法解决这一问题, 基本原理是被考察的平地网格到该平地出口的距离最短。但出口如何确定, 以及出口是一条线时如何选定出口等问题没有很好地解决。Depraetere^① 是将平地显示在计算机屏幕上, 用人工的方法来确定网格方向。这种方法不但工作量大, 而且任意性大。

二是坑, 即一个或一组被考察的网格的所有相邻网格均高于被考察的网格。坑可分成两种, 湖泊、大的水塘等真正蓄水的是真坑; 而由于测量和计算误差引起的, 或微地貌造成的并不蓄水的坑, 不是通常意义上的坑, 必须剔除, 否则由 DEM 导出的流水网中将出现不合理的断点。Hutchinson^[6] 利用已知的地理信息, 如地形

收稿日期: 1999-01-04

基金项目: 国家教委 1997 年资助优秀年轻教师基金项目(人教司[1998] 9 号)。

作者简介: 张行南(1960—), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士, 水资源水文专业, 主要从事水文水资源、遥感及地理信息系统的研究。

① Depraetere C. IAMONT—Logiciel application des modèles numériques de terrain. Technical Report of Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération—Notice OVNlh du laboratoire d'hydrologie #4, 1991.

② Squidant H. Mntsurf; logiciel de traitement des modèles numériques de terrain. Technical report, Doc E. N. S. A. R. 1994. 36.

③ Environmental Systems Research Institute INC. Cell-based Modeling With GRID 6. I. ARC/INFO User's Guide, 1992. 1~8.

④ Arousseau B, Squidant H. Role environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds—cas du bassin versant de la rade de Brest. Le programme rade—3^e rencontres scientifiques internationales. 1995. 110~123.

图, 来修正数字高程模型中各网格高程. 这显然是一种非常费时的工作. Squividant^①采用寻找坑网格到该坑的集水区域边缘的距离最近的方法, 将汇集于坑内的径流按此路径引出坑. 该方法中没有考虑高程, 导出的路径有可能跨越该坑的集水区域中相对较高的部分. 著名的 ARC/INFO 软件, 是将平地 and 坑的问题捆绑在一起解决的. 当某个被考察网格的方向不能由相邻的 8 个网格高程来确定的时候, 考察范围扩大到更外一层的 16 个网格, 以此类推, 直至可直接确定为止. 这样一来, 计算结果会生成许多方向相对的网格方向, 软件中将其定义为坑. 然后将该坑内网格的高程, 都修改成坑边缘最低点的高程, 由此来消除坑. 网格高程修改后有可能出现新的坑, 为此需作多次高程修改. 显然, 此法因对高程的大面积修正, 会带来较大的误差.

解决平地与坑的方法, 远不止上述几种. 各种方法虽然都有各自的长处, 但还没有达到完善的程度, 主要表现在导出的流网有明显的不可理. 本文提出了网格方向权重法(MDWM), 解决了平地的问题, 又用沟渠法(MDM)解决了坑的问题, 在此基础上提出了一套流域排水网的推导方法.

1 由网格高程直接确定网格方向

本文采用坐标对 (i, j) 表示各网格的空间位置, 单方向模型中网格方向应指向 8 个相邻网格中最低的一个. 由高程可直接确定如图 1 所示的研究区域的网格方向(图 2).

1	12	15	27	45	55	55	58	83	160	305	475	625	750	873	900
2	20	33	48	55	55	48	50	68	112	215	360	495	625	750	873
3	50	68	75	75	65	48	45	65	100	162	277	392	495	625	750
4	90	112	125	125	118	87	70	87	123	152	200	300	398	485	583
5	250	262	273	260	225	168	133	130	145	160	170	215	290	352	418
6	540	525	523	485	418	360	283	210	185	175	175	180	200	242	300
7	710	685	670	635	602	585	502	392	298	215	185	175	170	183	215
8	737	710	680	660	660	670	660	608	480	312	215	175	158	160	183
9	768	705	670	660	670	698	730	730	660	495	312	208	162	150	170
10	755	665	640	660	698	735	777	800	785	687	485	300	202	170	180
11	695	625	620	650	715	780	837	870	860	810	670	465	320	248	248
12	650	620	620	640	730	845	927	983	965	915	827	660	523	415	383
13	635	627	625	655	780	960	988	995	990	985	970	827	698	598	545
(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15(j)

图 1 研究区域内的网格点高程

Fig. 1 Pixel elevations $E(i, j)$ in a region under study

本文用 $P(i, j)$ 表示网格, $E(i, j)$ 表示网格高程, $D(i, j)$ 表示网格方向, $A(i, j)$ 表示 $P(i, j)$ 的 8 个相邻网格. 图 1 中 $E(6, 10)$ 和 $E(6, 11)$ 同是 $A(7, 10)$ 中的最低网格, 但 $P(6, 10)$ 比 $P(6, 11)$ 离 $P(7, 10)$ 更近, 即坡度更陡, 所以 $D(7, 10)$ 指向 $P(6, 10)$. 在 $A(6, 12)$ 中, $P(5, 11)$ 和 $P(7, 13)$ 同为最低网格, 且与 $P(6, 12)$ 距离相同, 无法直接确定方向 $D(6, 12)$, 在图 2 中用“○”表示, 记为 $Z(6, 12)$. 类似的网格还有 $P(7, 11)$, $P(8, 2)$, $P(9, 5)$ 和 $P(9, 6)$. 由图 1 还可以看出, $P(3, 7)$, $P(9, 14)$ 和区域 $[P(11, 2), P(11, 3), P(12, 2), P(12, 3)]$ 所有相邻网格都高于该网格, 所以它们是坑, 在图 2 中也用“○”表示, 记为 $S(i, j)$.

1	↑	↖	↖	↖	↖	↓	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙
2	↖	↖	↖	↖	↖	↘	↓	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙
3	↖	↖	↖	↖	→	→	○	←	←	←	←	↙	↙	↙	↙
4	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
5	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
6	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	○	↓	↙	↙
7	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
8	↖	○	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
9	↘	↘	↓	↙	○	○	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
10	↘	↘	↓	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙
11	↘	○	○	←	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
12	→	○	○	←	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
13	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15(j)

图 2 由高程直接确定的网格方向(“○”表示平地或坑)
Fig. 2 Pixel directions $D(i, j)$ derived according to the elevations directly in the region corresponding to Fig. 1. The zeros indicate plane areas or sinks

2 方向权重法确定平地网格方向

从一个平地网格 $Z(6, 12)$ 引 8 条法向矢量(图 3 中的细线), 则 $A(6, 12)$ 的网格方向与法向矢量间就有如图

① Squividant H. Mntsurf: logiciel de traitement des modèles numériques de terrain. Technical report, Doc E.N.S. A. R. 1994, 36
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3所示的8个夹角.图中*i, j*表示行列.*Z*(7, 11)也是一个平地网格,对应的夹角定义为无穷大.*A*(6, 12)中夹角大于90°的称为向内网格(*P*(5, 13)和*P*(7, 11)),其余夹角小于或等于90°的称为向外网格.

为了表达方便,我们记8个方向↑, ↗, ↘, ←, ↓, ↖, →, ↙分别为*d*-1, *d*-2, *d*-3, *d*-4, *d*-5, *d*-6, *d*-7, *d*-8.本文提出的方向权重法(MDWM)认为,*Z*(*i, j*)的方向是*A*(*i, j*)中向外网格方向中的某一个.上例中向外网格方向有*d*-2, *d*-3, *d*-5和*d*-6,所以*D*(6, 12)为其中的一个.对上述四个可能的方向,分别计算出一个*V*值.*V*值是以*A*(*i, j*)的网格方向和法向矢量间的夹角为权重的权重和.夹角为0°时权重取1.5, 45°时取0.7, 90°时取0.4. *A*(*i, j*)中*D*(5, 11)和*D*(6, 11)都为*d*-2, 夹角分别为0°和45°, 权重分别为1.5和0.7, 故

$$V_{d-2} = 1.5[D(5, 11)] + 0.7[D(6, 11)] = 2.2$$

类似地,

$$V_{d-3} = 0.4[D(5, 12)] = 0.4$$

$$V_{d-5} = 0.7[D(7, 13)] + 0.4[P(6, 13)] = 1.1$$

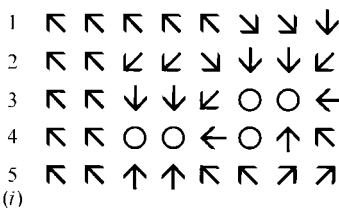
$$V_{d-6} = 0.7[D(7, 12)] = 0.7$$

其中*V*_{*d*-2}最大,所以选择*d*-2作为*D*(6, 12).上述权重系数,是在分析了各种可能方向组合的情况下精心设计,并在实际应用中不断调整后确定的,以保证所求得的*D*(*i, j*)结果是*A*(*i, j*)的网格方向的主流.对于一个比较大的平地,确定过程将从边缘开始,逐个向中间搜索.图4中的黑体箭头表示由此方法确定的平地网格的网格方向,“○”表示坑,实线表示坑所对应的集水区域的分水线.

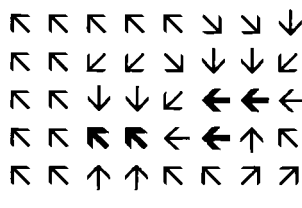
下例(图5)揭示了单纯的权重法的缺陷,*D*(3, 6), *D*(4, 3)和*D*(4, 4)并不是指向相邻网格中最低的网格,所以需修正,使之指向最低的网格.*E*(4, 2)与*E*(3, 3)和*E*(3, 2)相比是最低的,所以将*D*(4, 3)由*d*-2修正成*d*-3.同理,*D*(4, 4)和*D*(3, 6)也作如图5(d)所示的修正.经修改后的网格方向确定方法即为本文提出的完整的方向权重法(MDWM).

1	538	705	818	855	855	848	838	835
2	540	715	830	860	860	848	832	830
3	562	700	812	585	860	694	694	695
4	603	693	693	693	694	858	848	838
5	643	730	805	853	862	865	865	862

(a) 研究区域的高程



(b) 由高程直接确定的网格方向



(c) 黑体箭头为由单纯的方向权重法求得的平地网格方向

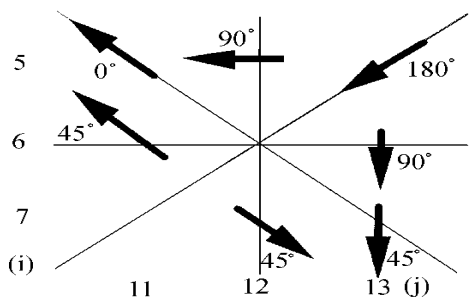


图3 研究区域中*Z*(6, 12)的方向权重法示意图
Fig. 3 An example of MDWM for pixel *Z*(6, 12)

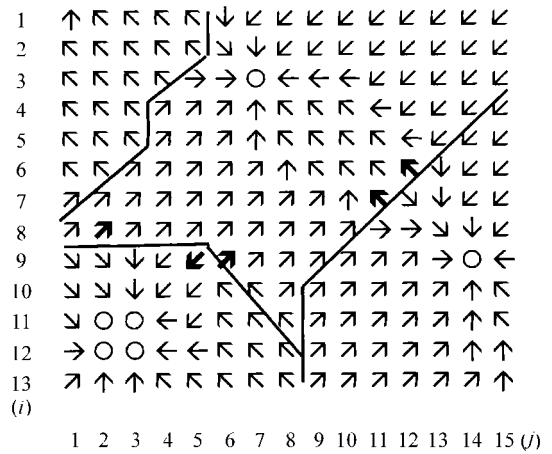
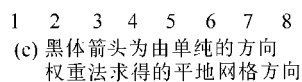
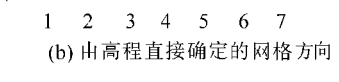


图4 研究区域网格方向示意图

Fig. 4 A sketch of *D*(*i, j*) in the region under study



(d) 黑体箭头为修正过的网格方向,即完整的MDWM确定的平地网格方向

图5 MDWM的例子

Fig. 5 An example of MDWM

3 沟渠法去除坑

图 4 所示的研究区域中有 3 个坑, 其中一个坑有 4 个坑网格, 对应的集水区域由黑线所表示. 本文提出的沟渠法 (MDM) 是从坑到其对应的集水区域边缘, 找出一条合理的沟渠, 将径流从坑内引出到相对应的集水区域的边缘.

首先, 我们为每一个坑网格 $P(i, j)$ 到每一个集水区域的边缘网格 $P(m, n)$ 找出一条可能的沟渠. 以 $P(i, j)$ 和 $P(m, n)$ 为顶点, 划出一个长方形区域, 在区域内的 $A(i, j)$ 中找出一个高程最低的网格 $P(i_1, j_1)$. 以 $P(m, n)$ 和 $P(i_1, j_1)$ 为新的长方形顶点, 用相同的方法找出 $P(i_2, j_2)$, 以此类推, 直至找出 $P(m, n)$. $P(i, j) - P(i_1, j_1) - P(i_2, j_2) - \dots - P(m, n)$ 即为 $P(i, j)$ 到 $P(m, n)$ 之间的一条可能的沟渠. 如图 4 中的坑网格 $S(9, 14)$ 到其一边缘网格 $P(6, 12)$, 从 $S(9, 14)$ 开始, 在以 $S(9, 14)$ 和 $P(6, 12)$ 为顶点的长方形区域内, $A(9, 14)$ 中最低的网格是 $P(8, 13)$. 所以, $D(9, 14)$ 为 $d-2$. 相似地, 在以 $P(8, 13)$ 和 $P(6, 12)$ 为顶点的长方形区域内, $A(8, 13)$ 中最低的网格是 $P(7, 13)$, 所以 $D(8, 13)$ 为 $d-1$. 类似地, $D(7, 13)$ 为 $d-2$. $S(9, 14) - P(8, 13) - P(7, 13) - P(6, 12)$ 为 $S(9, 14)$ 的一条可能的沟渠. 长方形限制区域可避免沟渠路线过长.

如果一个坑有 K 个坑网格及 L 个集水区域的边缘网格, 则可求得 $K \times L$ 条可能的沟渠. 每条沟渠所经过的网格中, 有一个最高的高程, 在这 $K \times L$ 个最高高程中, 搜寻出一个最低值, 所对应的沟渠即为所求的解. 若最低值对应若干条沟渠, 则取最短的一条. 沟渠所经过的网格方向, 修正为沿沟渠、从坑到边缘的方向. 如坑有若干个网格, 当其中一个网格方向 $D(i, j)$ 作为沟渠的端点已被确定后, 其在坑中的相邻网格指向该网格, 其余坑网格的方向由 MDM 推求. 如图 4 中左下角的坑有 4 个网格, $S(11, 3)$ 是沟渠的端点, 其余三个坑网格方向指向 $S(11, 3)$. 由此求得的沟渠在图 6 中由黑粗箭头表示 (黑线表示对应于坑的集水区域的分界线).

由图 6 可看出, 当沟渠经过的网格方向修改过以后, 其两侧的网格方向明显地不和谐, 如 $D(8, 14)$, $D(9, 13)$, $D(9, 3)$ 和 $D(10, 4)$ 等. 应根据沟渠方向作如图 7 所示的修正, 图中黑粗箭头为 MDM 所确定的网格方向. 修正的原理是使沟渠边上的网格方向指向其相邻的沟渠网格中最前面的一个. 修正完后的网格方向确定方法即为本文提出的完整的 MDM.

由网格高程确定的网格方向, 经 MDWM 和 MDM 修正后即可导出一个流域的天然状况下的模拟流水网.

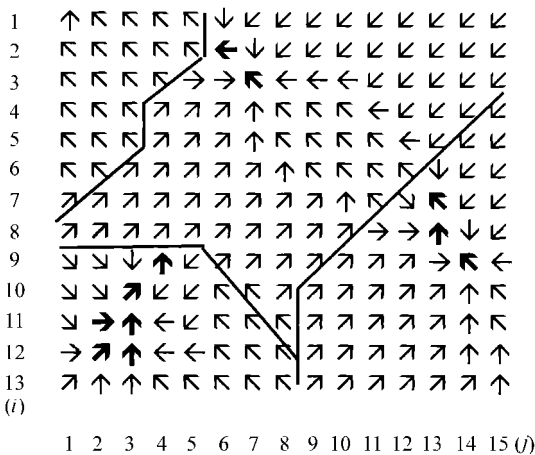


图 6 网格方向示意图

Fig. 6 A sketch of $D(i, j)$ in the region under study

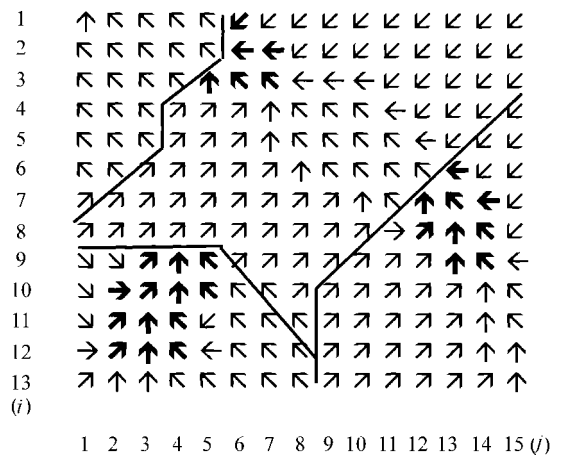


图 7 网格方向示意图

Fig. 7 A sketch of $D(i, j)$ in the region under study

4 流水网推导方法的应用

本文提出的流水网推导方法, 已试用于法国布列塔尼地区的 4 个流域. 布列塔尼位于法国的西部, 属海洋性气候, 丘陵地带, 流域坡度较缓.

表 1 研究流域基本特征数据

Table 1 Basic features of the catchments under study

流域名	面积/m ²	最高点/m	最低点/m	平均高程/m	网格数
A	3.6	113.56	75.15	96.99	9111
B	6.2	102.42	7.48	34.79	15529
C	5.7	76.40	12.70	34.78	14320
D	12.4	138.00	71.57	111.52	30906

Brun^[7] 等对该地区的气候、水文及自然地理特征作了较详细的阐述. 表1列出了本文研究的4个流域的基本特征数据.

流域D有两种精度的DEM,一种是 $20\text{m}\times 20\text{m}$,高程值精度为厘米,另一种为 $30\text{m}\times 30\text{m}$,但高程值精度为米.

本文利用MDWM和MDM,推导出了上述4个流域的流水网.经与网格高程分布图对比分析,导出的流水网是合理可靠的.图8是流域D上由 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 的DEM所推导出的流水网的一部分,黑点表示平地网格或坑网格,粗线表示由MDWM确定的平地网格方向.由于高程值的精度为米,所以平地网格较多.图9中有两个坑,由MDM确定的坑网格方向如图9所示,图中黑点表示坑网格,粗线表示由MDM确定的沟渠网格方向.由ARC/INFO导出的对应于图8所示区域的流水网如图10所示.对比图10与图9,可看出ARC/INFO确定的流水网的流线有许多不合理的弯曲和锐角.由本文提出的方法所导出的流水网,与网格高程分布的趋势较吻合,流线形状较合理.

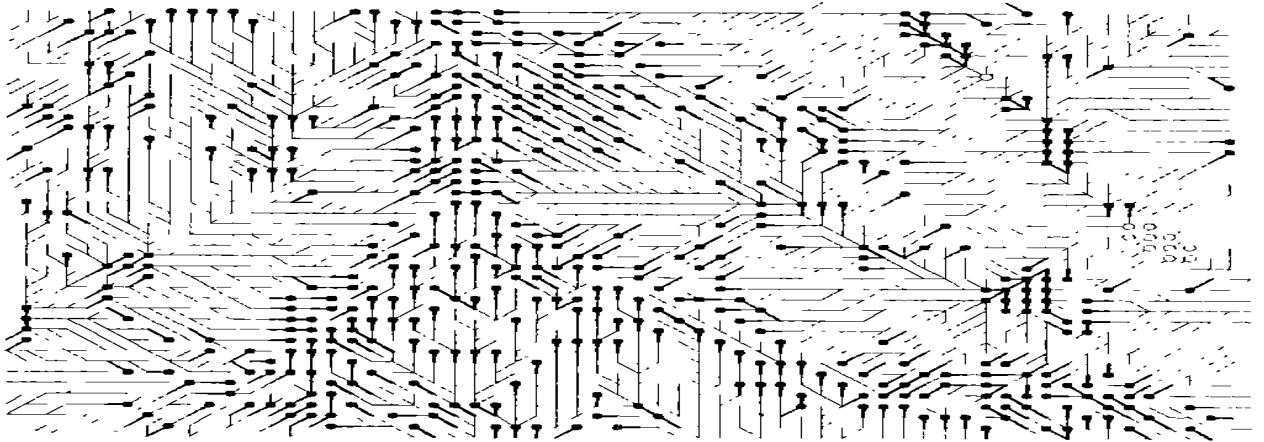


图8 流域D上由 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 的DEM导出的部分流水网

Fig. 8 Part of drainage network derived according to the DEM of $30\text{m}\times 30\text{m}$ in catchment D

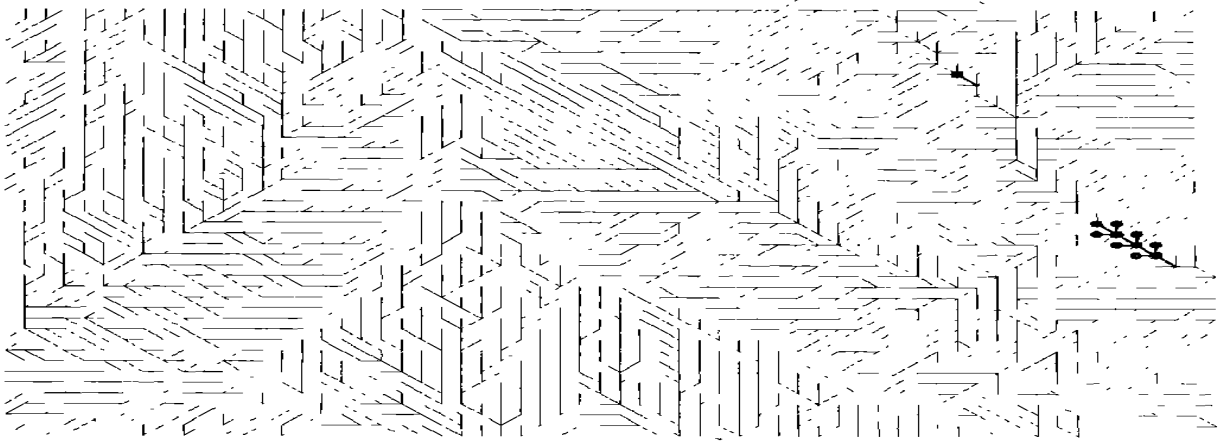


图9 流域D上由 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 的DEM导出的部分流水网(所示区域同图8)

Fig. 9 A part of drainage network derived according to the DEM of $30\text{m}\times 30\text{m}$ in catchment D

(The display area is the same as that of Fig. 8)

5 结 语

流域流水网的推求方法很多,但各有利弊.本文提出的MDWM中用向外网格方向的权重和来确定平地网格方向,用长方形区域限制MDM中的沟渠的长度等,在流水网推导方法研究领域是一种创新.经布列塔尼地区4个流域上的试用表明,由其导出的流水网是合理可靠的,符合整个流域的高程分布趋势.尤其是流域D上的 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 的DEM,由于网格高程的精度比较低,造成了许多平地 and 坑,但用本文提出的方法,导出了令人满意的流水网.

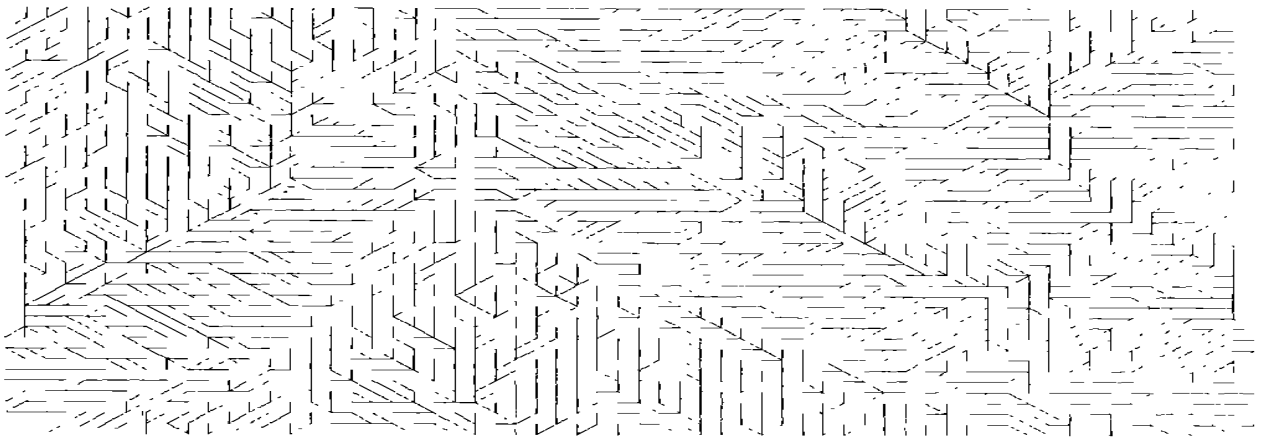


图 10 流域 D 上由 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的 DEM 用 ARC/INFO 导出的部分流水网(所示区域同图 8)

Fig. 10 Part of drainage network derived according to the DEM of $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ in catchment D

(The display area is the same as that of Fig. 8)

参考文献:

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physical based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrol Sci Bull, 1979, 24: 43~69.
- [2] Wharton G. Progress in the use of drainage network indices for rainfall-runoff modeling and runoff prediction[J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18: 539~557.
- [3] Wolock D M, McCabe Jr G J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL[J]. Water Resour Res, 1995, 31: 945~955.
- [4] Holmgren P. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation[J]. Hydrol Process, 1994, 8: 327~334.
- [5] Soille P. Morphologie mathématique: du relief à la dimensionalité—algorithmes et méthodes[D]: [Ph D thesis]. Paris: Université Catholique de Louvain & Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1992. 74~79.
- [6] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. J of Hydro, 1989, 106: 211~232.
- [7] Brun C, Bernard R, Vidal-Madjar D, et al. Mapping saturated areas with an helicopter-borne C-band scatterometer[J]. Water Resour Res, 1990, 26: 945~955.

Method of Deriving Drainage Network

ZHANG Xing-nan¹, QI Jing², ZHANG Li³

- (1. *Water Resources Development and Utilization Laboratory of Hohai Univ., Nanjing 210098, China;*
- 2. *The Administration for Lower Reaches of Haihe River Committee, Tianjin 300061, China;*
- 3. *Water Resources Development and Utilization Laboratory of Hohai Univ., Nanjing 210098, China*)

Abstract: The grid elevations of the digital elevation model (DEM) are used to determine the runoff flow direction on each grid. The directions for the plain area are determined by the Modified Direction Weight Method and those for the sink area are determined by the Modified Ditch Methods. The rationality and practicality of the drainage networks thus derived have been validated in four catchments.

Key words: digital elevation model; pixel direction; catchment; drainage network