

## ArcGIS Hydrology 水文分析功能介绍

**摘要：**DEM 是数字高程模型的英文简称(Digital Elevation Mode)，是流域地形、地物识别的重要原始资料。自 20 世纪 60 年代以来,在利用数字高程模型 DEM 提取流域水文特征,模拟地表水文过程方面,国内外都开展了大量的研究。

### 1.基本原理

DEM 是数字高程模型的英文简称(Digital Elevation Mode)，是流域地形、地物识别的重要原始资料。自 20 世纪 60 年代以来,在利用数字高程模型 DEM 提取流域水文特征,模拟地表水文过程方面,国内外都开展了大量的研究。

#### 1.1 基于 DEM 进行流域分析的原理

从 DEM 提取流域特征，一个好的流域结构模式是确定算法的前提和关键。1967 年 Shreve<sup>[1]</sup>描述的流域结构模式一直被后来的水文学者所引用，并设计了一些成熟的算法。Shreve 使用一个具有一个根的树状图来描述流域结构(如图 1 流域结构模式图所示)。在这个结构中，主要包括两个部分，一部分是结点集，一部分是界线集。沟谷结合点和沟谷源点共同组成一个沟谷结点集。所有的沟谷段组成沟谷段集，形成一个沟谷网络；所有的分水分段组成分水分段集，形成一个分水分段网络；沟谷段集和分水分段集共同组成界线集。



沟谷网络中的每一段沟谷都有一个汇流区域，这些区域由流域分水分线集来控制。外部沟谷段有一个外部汇流区，而内部沟谷段有两个内部汇水区，分布在内部沟谷段的两侧。整个流域被分割成一个个子流域，每个子流域好像是树状图上的一片“叶子”。

Shreve 的树状图流域结构模型是简单明确的，虽然沟谷网络的结点模型和线模型与在栅格 DEM 中用于表示沟谷结点和沟谷线的栅格点和栅格链之间存在着拓扑不一致性。但它给出了沟谷网络、分水分线网络和子汇流区的定义，明确表达了它们之间的相关关系，成为设计流域特征提取技术的基础。

#### 1.2 常用算法

流向判定建立在  $3 \times 3$  的 DEM 栅格网的基础上，其方法有单流向法和多流向法之分，但单流向法因其确定简单、应用方便而应用广泛。

##### 1.2.1 单流向法

单流向法假定一个栅格中的水流只从一个方向流出栅格，然后根据栅格高程判断水流方向。目前应用的单流向法是 D8 法。此外，还有 Rho8 方法、DEMON 法、Lea 法和 D $\infty$  法等。最常用的是 D8 法：假设单个栅格中的水流只能流入与之相邻的 8 个栅格中。它用最陡坡度法来确定水流的方向，即在  $3 \times 3$  的 DEM 栅格上，计算中心栅格与各相邻栅格间的距离权落差（即栅格中心点落差除以栅格中心点之间的距离），取距离权落差最大的栅格为中心栅格的流出栅格。

所谓最陡坡度法的原理是假设地表不透水，降雨均匀，那么流域单元上的水流总是流向最低的地方“窗口滑动指以计算单元为中心，组合其相邻的若干个单元形成一个窗口”，以“窗口”

为计算基本元素，推及整个 DEM，求取最终结果。

目前应用最广泛的是基于流向分析和汇流分析的流域特征提取技术。Jenson and Domingue (1988)设计了应用该技术的典型算法，该算法包括 3 个过程：流向分析，汇流分析和流域特征提取。

1) 流向分析：以数值表示每个单元的流向。数字变化范围是 1~255。其中 1：东；2：东南；4 南；8：西南；16：西；32：西北；64：北；128：东北。除上述数值之外的其它值代表流向不确定，这是由 DEM 中“洼地”和“平地”现象所造成的。所谓“洼地”即某个单元的高程值小于任何其所有相邻单元的高程。这种现象是由于当河谷的宽度小于单元的宽度时，由于单元的高程值是其所覆盖地区的平均高程，较低的河谷高度拉低了该单元的高程。这种现象往往出现在流域的上游。“平地”指相邻的 8 个单元具有相同的高程，与测量精度、DEM 单元尺寸或该地区地形有关。这两种现象在 DEM 中相当普遍，Jenson and Domingue 在流向分析之前，将 DEM 进行填充；将“洼地”变成“平地”，再通过一套复杂的迭代算法确定“平地”流向。流向分析过程如图所示。

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

=

2	2	2	2	4	8
2	2	2	4	8	8
1	1	2	4	8	4
128	128	2	2	4	8
2	2	2	2	4	8
1	1	1	1	5	4

2) 汇流分析：汇流分析的主要目的是确定流路。在流向栅格图的基础上生成汇流栅格图。汇流栅格上每个单元的值代表上游汇流区内流入该单元的栅格点的总数，既汇入该单元的流入路径数(NIP)，NIP 较大者，可视为河谷，NIP 等于 0，则是较高的地方，可能为流域的分水岭。

2	2	2	2	4	8
2	2	2	4	8	8
1	1	2	4	8	4
128	128	2	2	4	8
2	2	2	2	4	8
1	1	1	1	5	4

=

0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	2

3) 提取流域特征：有了流域汇流栅格图就可以很方便地提取流域的各种特征参数。例如模拟流域水系，可以设置一个 NIP 阈值，大于该值的格点为沟谷线上的点，连接各个沟谷线上的点就形成了河网。在汇流矩阵(汇流栅格)上求子流域的方法如下：从河谷单元或孤立的洼单元开始，向上游搜索所有流向该单元的单元，这些单元构成以开始单元为流域出口的子

流域。模拟出水系及流域边界后，利用 GIS 的相关函数，就可以很方便地得到流域的各项特征参数，如河流的长度、坡癖、流域面积等。

### 1.2.2 多流向法

多流向法的提出比较晚，由 Quinn 等 1991 年提出，但它的应用比较少。这种方法所考虑的仍然是中心栅格与其周围的 8 个栅格之间的关系，其产流仍然是点源，水流路径也是一维的线，由中心栅格中心点指向相邻栅格中心点；惟一的不同就是将水流按坡度的比例分散地分配给高程较低的相邻栅格。同时 Freeman 提出将水流按指数方法分配。

[ArcGIS](#) 提供的[水文分析](#)模块主要用来建立地表水的运动模型，辅助分析地表水流从哪里产生以及要流向何处，再现水流的流动过程。同时，通过水文分析工具的[应用](#)，也可以有助于了解排水系统和地表水流过程的一些基本的概念和关键的过程，以及怎样通过 ArcGIS 水文分析工具从 [DEM 数据](#)上获取更多的水文信息。

1) Flow Direction: 水流方向提取，ArcGIS 中采用 D8 单流向法来进行水流方向分析。

2) Sink: 洼地计算。洼地区域是水流方向不合理的地方，可以通过水流方向来判断那些地方是洼地，然后再对洼地进行填充。有一点必须清楚的是，并不是所有的洼地区域都是由于数据的误差造成的，有很多洼地区域也是地表形态的真实反映，因此，在进行洼地填充之前，必须计算洼地深度，判断哪些地区是由于数据误差造成的洼地而哪些地区又是真实的地表形态，然后在进行洼地填充的过程中，设置合理的填充阈值。

3) Fill: 洼地填充。

4) Flow Accumulation: 汇流分析。在地表径流模拟过程中，汇流累积量是基于水流方向数据计算而来的。对每一个栅格来说，其汇流累积量的大小代表着其上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格，汇流累积的数值越大，该区域越易形成地表径流。

5) Flow Length: 水流长度。水流长度通常是指在地面上一点沿水流方向到其流向起点（终点）间的最大地面距离在水平面上的投影长度。

水流长度是水土保持上的重要因子之一，当其他条件相同时，水力侵蚀的强度依据坡的长度来决定，坡面越长，汇聚的流量越大，其侵蚀力就越强，水流长度直接影响地面径流的速度，从而影响对地面土壤的侵蚀力。因此，对于水流长度的提取和分析，在水土保持工作中有很重要的作用。

目前水流长度的提取方式主要有两种，一种是顺流计算（DOWNSTREAM），一种是溯流（UPSTREAM）计算。顺流计算是计算地面上每一点沿水流方向到该点所在流域出水口最大地面距离的水平投影；溯流计算者是计算地面上每一点沿水流方向到其流向起点间的最大地面距离的水平投影。

6) Map Algebra: 利用[地图](#)代数来进行河网提取。

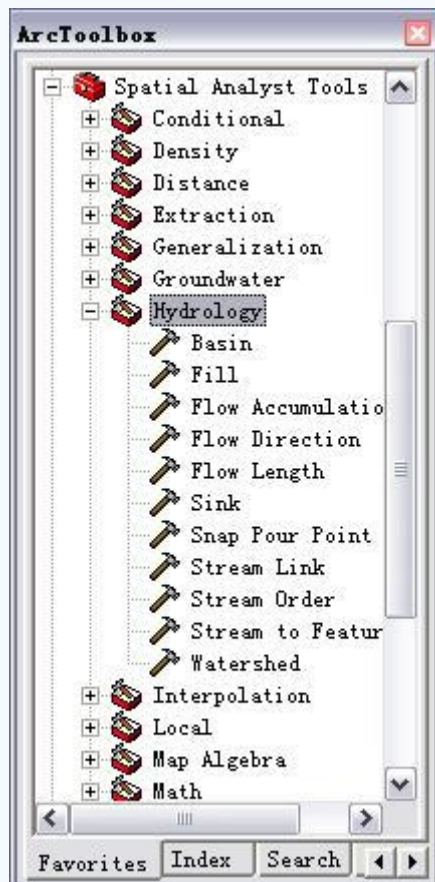
目前常用的河网提取方法是采用地表径流漫流模型计算：首先是在无洼地 DEM 上利用最大坡降的方法得到每一个栅格的水流方向；然后利用水流方向栅格数据计算出每一个栅格在水流方向上累积的栅格数，即汇流累积量，所得到的汇流累积量则代表在一个栅格位置上有多少个栅格的水流方向流经该栅格；假设每一个栅格处携带一份水流，那么栅格的汇流累积量

则代表着该栅格的水流量。基于上述思想,当汇流量达到一定值的时候,就会产生地表水流,那么所有那些汇流量大于那个临界数值的栅格就是潜在的水流路径,由这些水流路径构成的网络,就是河网。

7) Stream Order: 河网分级。

8) Basin: 流域分割工具。

9) Watershed: 流域分割工具。



### 3.1 ArcHydro 背景介绍

Arc Hydro 数据模型是把 GIS 和水文地理领域知识相结合的水文地理数据模型,由 ESRI 联合得克萨斯大学的水资源研究中心(Center for Research in Water Resources, CRWR)从 1999 年开始设计。

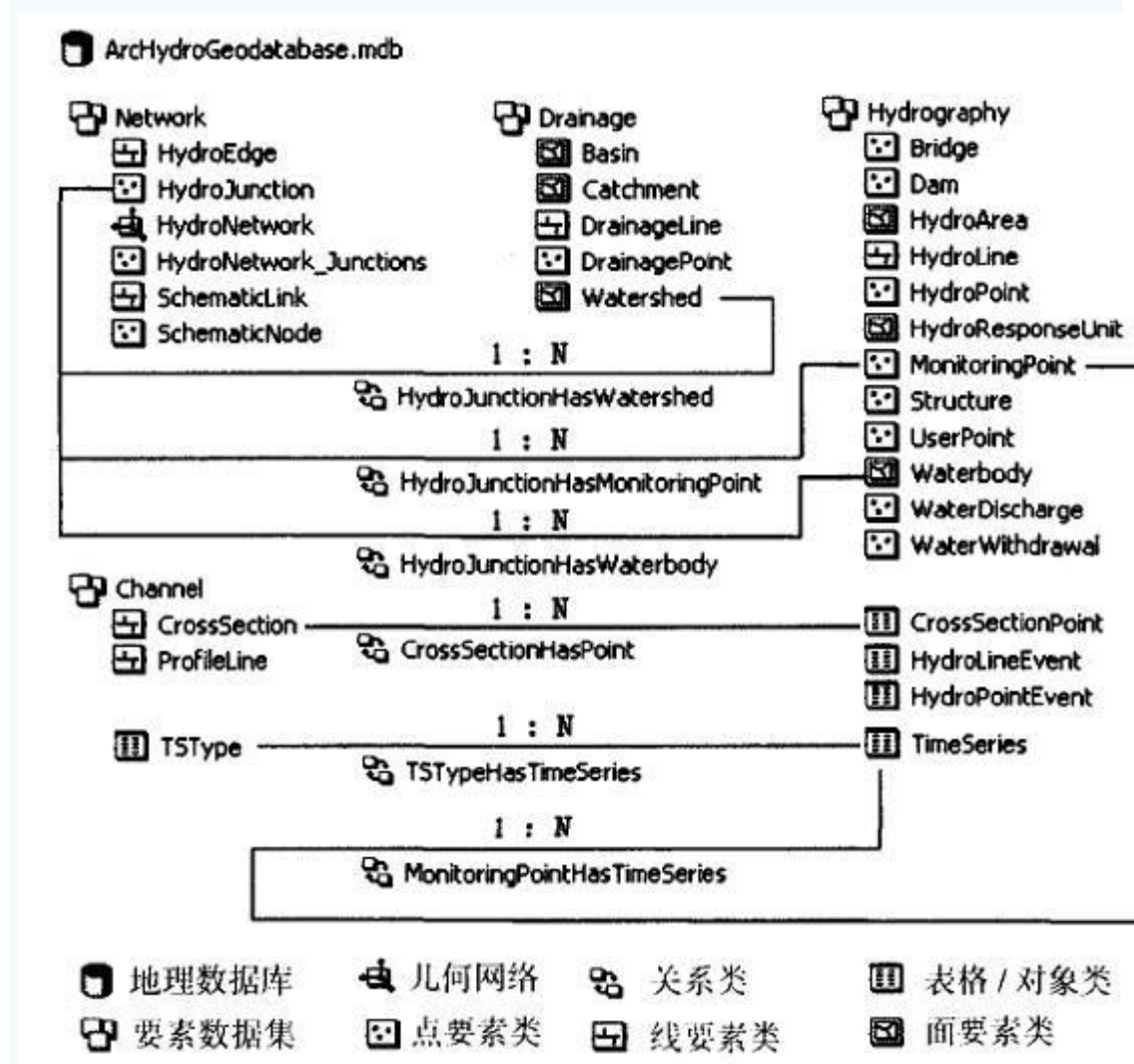
2000 年 6 月,在圣地亚哥举行的第 20 届年度国际 GIS 用户大会的水文 GIS 预备会议上,CRWR 的主管 David R.Maidment 博士提出了 ArcGISHydro Data Model 的模型及文档的草稿,模型的整体设计于 2002 年完成。

在 2003 年 ESRI 公司召开的第 23 届年度国际 GIS 用户大会上,David R, Maidment 博士因此被授予终身成就奖。

### 3.2 Arc Hydro 数据模型

ArcHydro 数据模型包括五个部分: Drainage (汇流)、Hydrography(水文地形)、Channel(河道)、Network(水文网络)和 TimeSeries(时间序列)。依据 Arc Hydro 数据模型建

立的地理空间数据库的主要结构如图所示。



### 3.2.1 Drainage 汇流区

Drainage 是汇流区要素数据集模型，表达南地形地貌定义的河谷线、分水线、汇流区等水文地理几何特征。

- 1) **Basin:** 地理数据库数据管理的边界范围，可根据管理的需要，由几个不同的行政流域范围组成，一般用流域内的主河流来命名，例如长江流域。
- 2) **Watershed:** 根据特定的水文法则得到的流域子集，通常是汇流到河网上某一点、某一河段或者水体的区域，如长江流域可分为长江上游、中下游、汉江等子流域。
- 3) **Catchment:** 根据流域的河谷线、分水线等自然地形按照一定的规则来划分的汇流区。
- 4) **DrainageLine, DrainagePoint** 是 DEM 提取划分的汇流区的出水口所在的网格单元中心点。
- 5) **DrainageLine** 是 DEM 提取划分的流经经过的 DEM 网格单元的中心点连成的线。

### 3.2.2 Hydrography 水文地形

Hydrography 是水文地形要素数据集模型，表达地表水系及其附属建筑物的底图信息。

- 1) **HydroPoint** 表示井、泉等；
- 2) **HydroLine** 表示水系线之外的其他线要素，如境界线等。
- 3) **Waterbody** 要素指湖泊、海湾或者河口湾等。
- 4) **HydroArea** 要素表示 **Waterbody** 之外的其他面要素，如沼泽地、洪水淹没区等。
- 5) 其他点要素有 **Dam**(坝)、**Bridge**(桥)、**Structure**(附属建筑物)、**MonitoringPoint**(测量径流量、降雨量、水质等的监测站)、**WaterWithdrawal**(入水口)、**WaterDischarge**(出水口)。
- 6) 自定义的点(如河流与地下蓄水层的交点)。
- 7) **HydroResponseUnit** 面要素类是用来计算地表水平衡的单元，一般由规则的图幅表示，用来计算单元面积内地表降水的径流量、蒸发量或渗透量。

### 3.2.3 Network 网络

**Network** 是水文网络要素数据集模型，表达河流的总体信息和地表水流动的连通性。

- 1) **HydroNetwork**: **Network** 的主要要素类是几何网络，由溪流、河流及面状水体的中心线构成，包括复杂边要素 **HydmEdge**(水文界线)和点要素 **HydroJunction**(水文结点)。
- 2) **HydmEdge**: 由流域界线或水文边界(河流、圩区等)构成，
- 3) **HydroJunction**: 由用户在网络上定义的点，如汇流点。
- 4) **SchematicLink** 和 **SchematicNode** 要素类，这两个要素类没有实际的几何坐标值，用来储存网络的相关性和一些属性，是一个示意性网络，与 **HydroNetwork** 点或线关联的表格信息被存储在 **HydroEvents** 字段中。
- 5) 水文网络的 **HydroJunction** 与 **Watershed**、**Monitoring**、**point**、**Waterbody** 之间的关系由不同的关系类来表达，由 **HydroJunction** 拥有惟一的标识码 **HydroID** 来与其他要素的 **JunctionID** 字段关联建立关系。

### 3.2.4 Channel 河道

**Channel** 是河道要素数据集模型，表达河流的 3 维形态，用于分析河流水力学特性的细部特征，研究洪水、河流生态和形态学，包括横断面、轮廓线、洪水淹没线和 3 维信息等。

- 1) **ProfileLine** 是沿河流流向的纵剖面线，如河道深泓线、河岸线、洪水淹没线。
- 2) **CrossSections** 是垂直于河流流向的剖面。河道信息、通过野外测量技术收集，或者从以 TIN 或 DEM 形式的 DTM 提取。
- 3) **CrossSectionPoint** 对象类存储横剖面点数据。关系类 **CrossSectionHasPoint** 在 **CrossSection** 和 **CrossSectionPoint** 间建立关联，当只有一个横剖面表现剖面位置时，几个横剖面点用来描述河道的几何特征。

### 3.2.5 TimeSeries 时间序列

水文现象随着时间、气候而改变，**Arc Hydro** 定义了时序数据模型 **TimeSeries**，来存储监测站和其他设施定期观测的数据，如水位、径流量和水质等。

- 1) **TimeSeries** 表可以记录同一时刻一个或多个监测站的数据，监测站也可以拥有任何数量的时间序列数据。
- 2) **TimeSeries** 与监测站(点要素类 **MonitoringPoint**)通过 **FeatureID / HydroID** 来连接，用

天系类 `MonitOringPointHastimeSeries` 实现某空间范围内监测站在某时间序列内的测量记录查询。