

基于 DEM 的等流时带内划分子流域的方法

安 婷^{1,2},董增川¹

(1.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;
2.水利部海河水利委员会引滦工程管理局,河北 迁西 064309)

摘要 提出了一种根据 DEM 资料划分等流时带进而在等流时带内部再划分子流域的方法,运用该方法对黄河流域进行了子流域划分,并在此基础上建立了水资源模拟模型.模拟结果表明:用此方法划分子流域,可以解决水循环模拟模型与水资源分配模型耦合中如何将人工控制点引入天然河网的问题.利用等流时带的概念,可以为水循环模拟模型中的汇流演算提供方便.

关键词 DEM;等流时带;子流域;划分方法;人工控制点

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)04-0466-05

目前,分布式水文模拟大多采用在划分好的子流域内再细分等流时带的方法,划分的子流域虽然可以满足水文预报对时段的要求,但与水资源调配模型耦合则存在时间尺度转换问题.同时,水资源调配模型高度概化了人工用水因素,没有真正实现分布式的水资源配置.由于上述问题的存在,流域水循环模拟模型与水资源调配模型无法实现真正意义上的耦合.本文利用等流时带的概念^[1]构建了一个分布式水文模型的基本框架,提出了一种基于 DEM 划分等流时带,在等流时带内划分子流域,将人工控制点引入水循环模拟模型并作为相应子流域出口控制点的方法,从而实现了人工控制节点与天然河网的耦合.

1 等流时带的划分

传统的确定流域等流时线的方法是在地图上进行人工经验勾绘.这种方法的经验性较强,净雨到达流域出口断面的距离并不是净雨到达流域出口断面的真实路径的长度,而且在地图上进行人工经验勾绘,费时费力.随着地理信息系统的发展,数字高程模型在地形地貌描述中的应用也越来越广.

近年来,随着遥感和 GIS 技术的发展,通过数字地形分析技术从 DEM 数据中提取流域数字河网和地形地貌等空间特征^[2-3],可以通过流域的 DEM 而不是地图来自动生成等流时线分布图^[4-7].熊立华等^[8]进行了基于数字高程模型的等流时线推求的研究,康玲等^[9]综合考虑了地形和降雨因素的影响,提出了变等流时线法.这些方法都考虑了流域汇流速度随地形坡度的变化.

1.1 基于 DEM 的等流时带确定

熊立华等^[8]提出的方法要求首先将流域表面上的每一个栅格按高程从低到高进行排序,但在整个流域表面有很多高程相同点,没有必要区分它们的高低顺序.为此,本文提出了一种不需要对各栅格高程进行排序的推求等流时线的改进方法:先采用文献^[10]的方法确定各栅格的水流方向,再按下述方法推求等流时线.

a. 计算各栅格的坡度.两网格间的坡度计算公式为

$$S_{ij} = (E - E_i) / \Delta l \tag{1}$$

式中: i ——计算栅格所在的行; j ——计算栅格所在的列; S_{ij} ——计算栅格的坡度; E, E_i ——计算栅格及其汇入栅格的高程; Δl ——两栅格间的距离.按前述方法为流向编码时,计算栅格的流向为 2 的偶次幂时 Δl 取栅格的边长,流向为 2 的奇次幂时 Δl 取边长的 $\sqrt{2}$ 倍.

b. 计算净雨流经各个栅格所需要的时间 τ . 因各个栅格的坡度不同,流速也不同,从而流经时间也不同. 坡度大,流速大,流经时间短. 坡度小,流速小,流经时间长. 另外,如果栅格内有河道存在,则此栅格的流经时间按河道处理. 流经时间 τ_{ij} 的计算公式为

$$\tau_{ij} = \frac{\Delta l}{an^c S^b} \tag{2}$$

式中: a ——参数,其量纲与速度量纲相同; b ——幂指数,可以反映坡度大小对流速的影响(b 值为 0,就相当于假设流速在整个流域内均匀分布,与坡度无关); n ——计算栅格的糙率系数; c ——幂指数,可以反映糙率大小对流速的影响(c 值为 0,就相当于假设流速在整个流域内与糙率无关).

- c. 将流域出口断面处栅格汇流时间设置为出口断面所处栅格的流经时间.
- d. 由流域出口断面处栅格向上游遍历,汇入流域出口断面栅格的汇流时间为

$$t_{ij} = t + \tau_{ij} \tag{3}$$

式中: t_{ij} ——计算栅格的汇流时间; t ——汇入栅格的汇流时间.

- e. 对 d 步中处理的各栅格点再次调用 d 步,直至将流域内所有栅格的汇流时间全部确定为止.
- f. 将具有相同汇流时间的栅格面积加在一起,作等流时面积分布图 $\Delta A(\tau) \sim \tau$.

1.2 在等流时带内部划分子流域

如果 2 条等流时线之间的各栅格点产生的净雨会在同一个时段汇到子流域出口断面,则 2 条等流时线之间的部分被称为等流时带. 而各等流时带内部存在局部分水岭,将等流时带内部分割成相互间没有水量交换的独立区域. 这些独立区域产生的水量会在下一个时段通过子流域出口汇入下游子流域. 因此,本文将等流时带内的独立区域划分为不同的子流域. 划分出的子流域数目是根据定义限制子流域最小给养面积的阈值来确定的. 给出的阈值越大,划分的子流域数目就越少.

在划分子流域之前,首先要判断出子流域的出口点. 本文的方法是,先将等流时线上的所有河道栅格都标注为子流域的出口控制点,再由这些控制点向上游遍历同一等流时带内的所有集水栅格,最后将这些栅格点作为同一个子流域. 本文列举了一个河道阈值为 3、子流域阈值为 5 的在等流时带内部划分子流域的例子,具体做法如下:

- a. 按照文献[10]的方法分析各栅格的水流方向,推算各栅格的集水面积,并根据生成河道阈值确定河道位置(图 1(a),(b)).
- b. 根据前述方法计算各栅格的汇流时间,并作等流时面积分布图(图 1(c)).
- c. 标注各等流时线上的河道栅格点. 以第 3 条等流时带为例. 如需要标注第 3 条等流时线上的河道点,则需要查找第 3 条等流时线上集水面积大于河道阈值的栅格点,并将该栅格点记录为子流域出口控制点(图 1(d),图中圆圈标记为判断出来的等流时线上出口控制点位置). 这里需注意 2 个问题:(a)如果图 1(d)中 I 处的 2 点都为等流时线上的河道点,按前述关系应都判断为子流域出流控制点,但由于这 2 点间的汇流面积小于阈值,因此将下游点定为出流控制点.(b)如果 I 处的 2 点或多点为同一水体(如水库和湖泊)且没有上下游的汇流关系,则将 2 点或多点概化为一点,作为子流域的出流控制点.
- d. 由 c 步判断出的所有出流控制点分别向上游遍历,将所有控制点在同一等流时带内的集水区标注为独立的子流域. 对于 c 步内的问题(b),则将标注出的 2 个或多个栅格在此等流带内的集水区域标记为同一子流域.
- e. 判断 d 步确定的各子流域面积是否小于子流域阈值,如果小于子流域阈值,则将其并入下游子流域.
- f. 将流域内部没有分配子流域的栅格划分到栅格汇入的子流域内,并记录各子流域的面积.

2 人工影响控制点的引入

人工侧支水量循环过程包括人类的取水和用水. 为了便于从自然界获取所需要的水资源,人类修建了大量的水利工程,如人工引水渠道、水库和泵站等. 因此,在建模之前还需要建立人工影响因素与自然河网的拓扑关系. 如果栅格内存在人工控制的断面,如水库控制断面和河道取水断面等,则在该栅格处设置人工控制点. 以此类控制点作为子流域出口,以水库的出库流量作为子流域出口断面的流量,以河道取水口的流量作为出口断面流量的一部分. 下面在已划分好的天然子流域上(图 2(a))将人工控制点引入天然河网,具体做

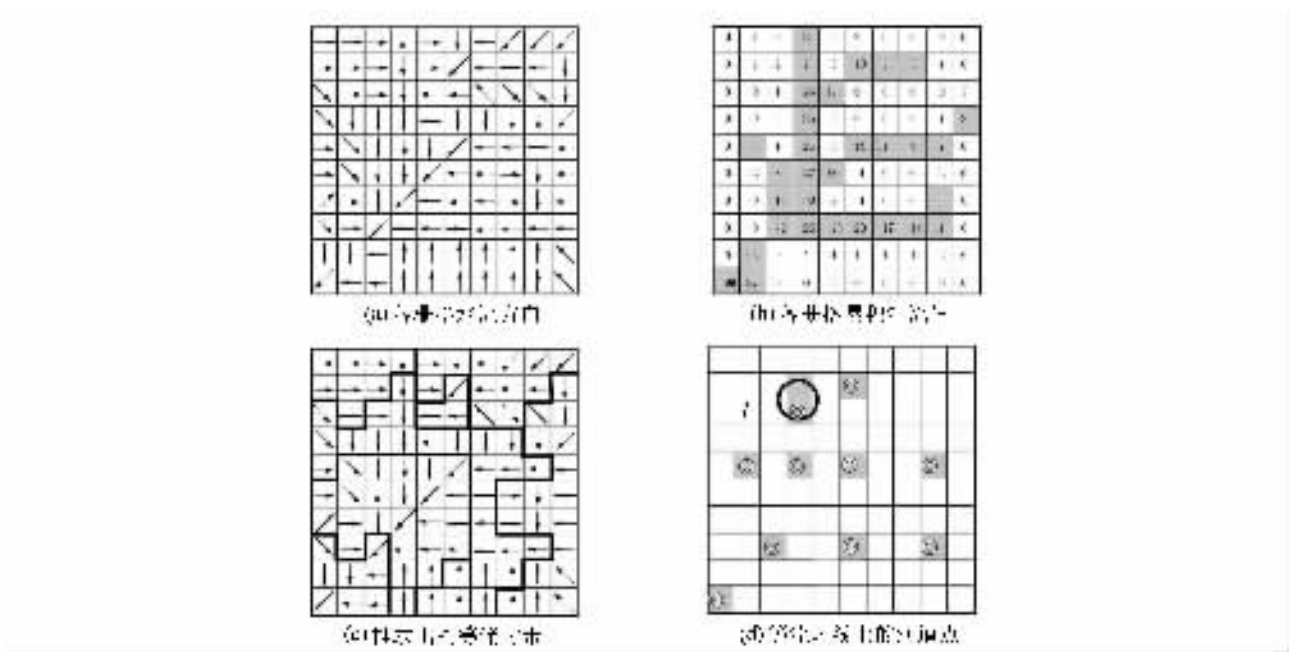


图 1 基于 DEM 划分等流时带示意图

Fig.1 Sketch of partitioning isochrones based on DEM

法如下：

- a. 读入人工影响控制点的地理位置信息,判断其所在栅格点位置.
- b. 判断此人工影响控制点所处的按上述方法确定的子流域编号,读入子流域面积 A .
- c. 确定由人工影响控制点到所处子流域边界的集水区面积 B .
- d. 根据 A 与 B 的关系划分子流域. 如果 $A - B < \text{子流域阈值}$,则所在子流域的出口控制点以此人工影响控制点代替,见图 2(b). 否则再重新进行判断. 如果 $B < \text{子流域阈值}$,则将此人工控制点作为当前所在子流域的上游汇入子流域控制点,人工影响控制点到所处子流域边界的集水区内的栅格计入上游河道集水区较大的子流域,同时从当前子流域内去除,见图 2(c). 如果上述 2 种情况都不满足,则将人工控制点到所处子流域边界的集水区从当前子流域内去除,同时建立一个新的子流域,子流域的范围是上述集水区域,见图 2(d).

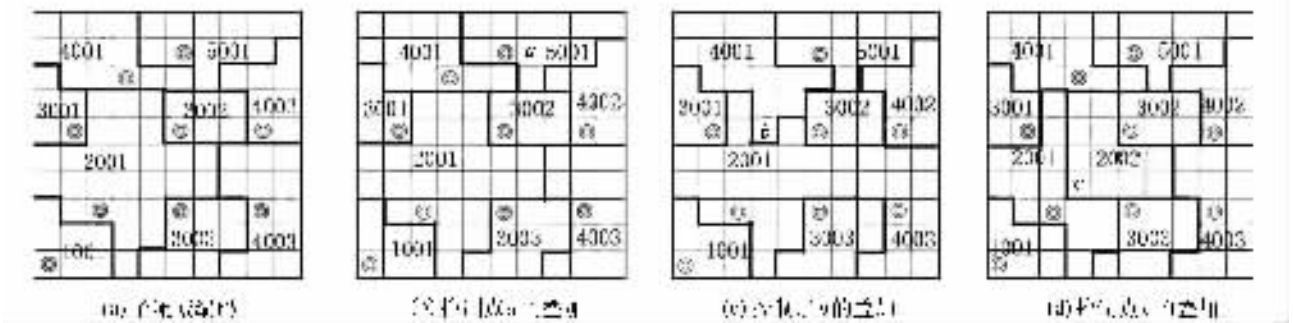


图 2 子流域划分引入人工控制点示例

Fig.2 Sketch of introducing the manual control points into the sub-basins partition

3 应用实例

采用文献[10]的方法,从 DEM 数据中提取黄河流域的数字水系.对比结果显示,由 DEM 生成的流域水系与实际比较吻合.式(2)中的参数有 2 种率定方法:一是水力学的方法;二是水文学方法中的单位线法.本文采用了水文学的方法.经率定,参数的取值为: $a = 0.128$; $b = 0.55$.图 3 显示了以 d 为时段的黄河流域等流时带的划分结果,整个黄河流域被划分为 42 个等流时带.基于前述方法,再在等流时带内划分子流域.子流域最小集水面积阈值取为 100 km^2 .整个黄河流域被划分为 875 个子流域.本例中叠加的人工控制点仅以

大中型水库为例.人工控制点叠加后,划分的黄河流域子流域数量扩大到 981 个.图 4 显示了叠加了人工控制点后的黄河流域子流域分区结果.

在已划分好的黄河流域子流域上建立水文循环模拟系统,并利用 1996 ~ 1998 年的资料进行模型率定.图 5 给出了龙门和花园口断面实测流量和模拟流量的比较结果.总体上看,模拟流量和实测流量有较好的对应关系.这表明前述方法基本上能满足水资源模拟的需求.

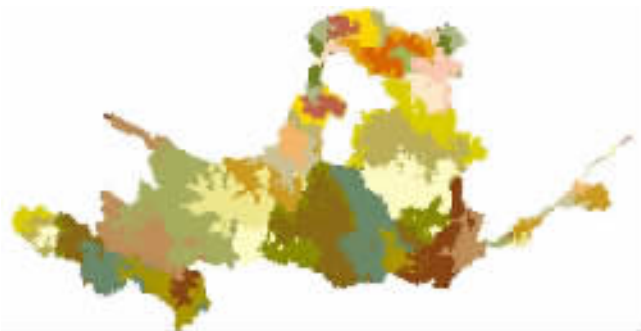


图 3 黄河流域等流时带



图 4 黄河流域子流域

Fig.3 Partitioning isochrones in the Yellow River watershed

Fig.4 Partitioning sub-basins in the Yellow River watershed

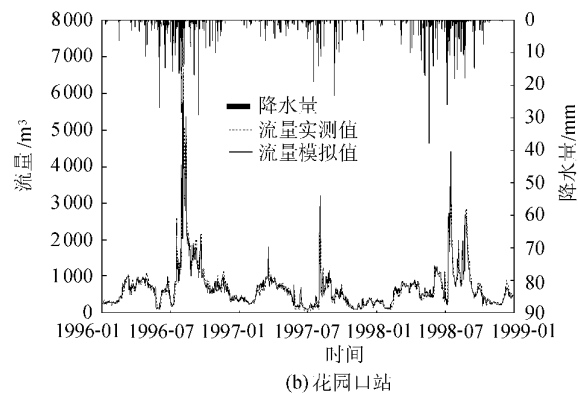
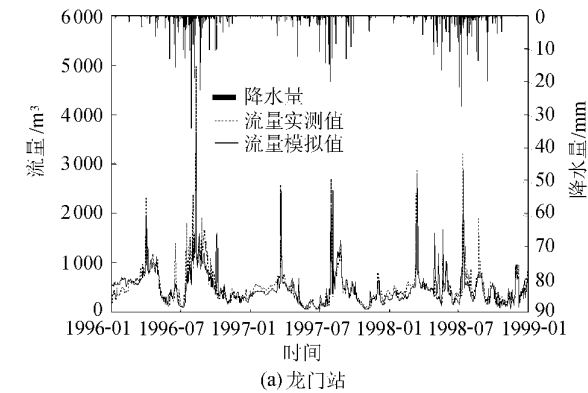


图 5 实测与模拟流量的对比

Fig.5 Comparison of observed and simulated discharge hydrographs

4 结 论

本文对基于 DEM 划分等流时带的方法进行了改进,提出了在等流时带内划分子流域,并将各人工控制点作为相应子流域出口控制点的方法,解决了水循环模拟模型与水资源分配模型耦合时人工控制点引入天然河网以及时间尺度和空间尺度统一的问题.本文方法划分的子流域数量与人工控制点的数量有关,即当人工控制点较多时,划分的子流域数量也会增加.

参考文献：

[1] PONCE V M. Engineering hydrology[M]. New Jersey : Pretice-Hall, Inc. ,1989 340.
[2] 詹道江,叶守泽.工程水文学[M]. 北京 中国水利水电出版社,2000 36.
[3] 任立良,刘新仁.数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用[J]. 水科学进展,1999,10(2) :129-134.
[4] MAIDMENT D R. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS[C]//KOVAR K,NACHTNEBEL H P. HydroGIS 93, Application of GIS in Hydrology and Water Resources Proceedings of the Vienna Conference, April 1993. [S.l.] :IAHS,1993(211) :181-192.
[5] MUZIK I. A GIS-derived distributed hydrograph[C]//KOVAR K,NACHTNEBEL H P. HydroGIS 96, Application of GIS in Hydrology and Water Resources Proceedings of the Vienna Conference, April 1996. [S.l.] :IAHS,1996(235) :453-460.
[6] FREEMAN T G. Calculating catchment area with diver-gent flow based on a regular grid[J]. Computers & Geosciences,1991,17(3) :413-422.

- [7] LAWRENCE W M, GARBRECHT J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25: 835-844.
- [8] 熊立华, 彭定志. 基于数字高程模型的等流时线推求与应用 [J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2003, 36(3): 1-3.
- [9] 康玲, 王学立, 姜铁兵, 等. 基于数字高程模型的流域变动等流时线方法 [J]. *水利学报*, 2006(1): 40-44.
- [10] 安婷, 董增川. 动态链表在提取数字流域排水结构中的应用研究 [J]. *水文*, 2007(2): 63-67.

Method for partitioning sub-basins in the isochrones based on DEM

AN Ting^{1,2}, DONG Zeng-chuan¹

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*;

2. *Luanhe River Diversion Project Management Office, Haihe River Water Resources Commission, Chinese Ministry of Water Resources, Qianxi 064309, China*)

Abstract: A method for partitioning sub-basins in the isochrones determined from a DEM was presented. The method was used to partition sub-basins in the Yellow River watershed. On this basis, a water resources simulation model was developed. The simulation results show that the problem of how to introduce manual control points into the natural river network for the coupling of the water cycle simulation model and water resources allocation model is solved with this method, and that it is very convenient to calculate flow concentration in the water cycle simulation model using the concept of isochrones.

Key words: DEM; isochrone; sub-basin; partition method; manual control point

中国科技核心期刊 全国水利系统优秀期刊 全国农业系统优秀期刊

《水利经济》征订启事

(邮发代号 28-252, CN32-1165/F, 双月刊)

《水利经济》是由河海大学与中国水利经济研究会共同主办的以技术性为主、兼顾学术性和管理性的科技期刊。《水利经济》1983年创刊,是全国水利经济研究领域唯一的专业期刊。

主要刊登内容 水利经济学基本理论 水利水电建设中的经济效益、社会效益和环境效益分析,工程经济评价和财务评价,工程投资的筹集与费用分摊研究,以及水利工程的经济管理研究 水库移民及土地淹没赔偿中的经济问题研究 水利事业在社会经济发展中的作用和地位研究 水利事业和水利建设的管理体制体制改革研究等。

主要读者对象 从事水利经济工作的水利行业、环保行业、农业行业的有关工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生。

订阅办法 读者可通过邮局订阅,也可直接汇款至编辑部订阅。每期定价6元,全年6期共计36元。

编辑部地址 210098 南京西康路1号 河海大学《水利经济》编辑部

电话/传真:(025)83786350 **E-mail** :jj@hhu.edu.cn **http** ://kjb.hhu.edu.cn