

基于 GIS 的乌江流域地表径流模拟研究

唐从国^{1,2} 刘丛强¹

(1 中国科学院地球化学研究所, 贵阳市观水路 46 号, 550002)

(2 中国科学院研究生院, 北京市玉泉路甲 19 号, 100049)

摘 要: 基于 GIS 平台, 建立了数字乌江流域。在此基础上, 选择 5 个典型子流域, 利用流域 1956~2000 年的降雨和水文资料及流域 2000 年土地利用数据, 分别计算 5 个子流域的年均降雨量、年均地表径流量和土地利用百分比; 用多元回归分析工具建立流域年均地表径流量与年均降雨量和土地利用百分比之间的关系式, 得到不同土地利用方式下的降雨径流模型; 通过实测资料对模型进行验证的结果表明, 模型模拟精度较高, 相对误差在 7% 以内。

关键词: 数字流域; 降雨径流模型; 地表径流; 土地利用百分比; 乌江

中图法分类号: P208

传统预测径流的方法多采用降雨径流经验相关图^[1]。该方法使用适线法通过点群中心确定相关关系线, 仅依靠气象及水文观测数据, 因而只适用于较小的流域或气候条件相对一致的较大区域。近几十年来, 随着计算机技术和一些交叉学科的发展, 流域水文模拟的研究方法也开始产生了根本性的变化, 主要表现在以下方面: ① 计算机技术、空间技术、遥感技术等的应用; ② 分布式物理模型被广泛提出, 遥感、地理信息系统在水文模拟中的应用给传统的研究方法带来了创新; ③ 基于 GIS 的降雨径流模型可以方便地使用具有空间分布特征的地理数据, 大大提高了模拟的精度和效率, 丰富了模型信息, 能够充分反映流域气候和下垫面空间分布不均对模拟的影响^[2]。

1 数字流域的构建

研究区选择贵州省内乌江流域, 流域面积 66 990 km², 占流域总面积的 76.24%^[3], 属亚热带季风气候区, 雨量丰沛, 全年降雨量 80% 以上集中在 5~8 月, 多年平均降雨量分布大致从西向东减少^[4]。

以贵州省内乌江流域 1:25 万栅格 DEM 和 1:25 万数字水系图为数据源, 采用 ArcGIS 的 Arc Hydro Tools 来构建数字乌江流域。Arc

Hydro Tools 基于传统的 D8 算法, 以最陡坡度原则确定栅格单元的水流流向, 以最小水道集水面积阈值确定河道起始点及河道来生成数字流域。其中 DEM 数据采用国家基础地理信息系统全国 1:25 万数字高程模型数据库数据, 地面分辨率 100 m, 投影方式为 ALBERS 等面积圆锥投影, 中央经线为 105°E, 双标准纬线分别为 25°N 和 47°N, 采用 KRASOVSKY 椭球体。水系图从贵州省 1:25 万地形图中手工数字化得到。在最小水道集水面积阈值为 100 km² 时应用 Arc Hydro Tools 可以得到如下结果: 水流流向栅格、流域分水线、数字河网及相应子流域、河道与子流域特征属性表、河网空间拓扑关系等。封 3 彩图 1 为以 5 个水文站点为子流域出口自动生成的数字河网和子流域。提取的 5 个子流域面积与实际量测子流域面积对比如表 1, 可以发现两者比较接近, 相对误差在 9% 以内。

2 数据收集和处理

2.1 降雨量数据

对大流域的模拟研究需要与其匹配的气象数据作为输入数据, 因为降水数据在模拟径流方面效果明显, 所以必须保证降水数据在空间和时间

表 1 自动提取子流域面积与实际量测面积对比
Tab. 1 Comparison Between Automated Extraction

Area and Surveyed Area			
子流域名称	自动提取子流域面积/km ²	量测子流域面积/km ²	相对误差/%
湘江站以上	535	554	3.48
洪家渡站以上	8 678	9 450	8.17
乌江渡站以上	26 165	27 780	5.82
江界河以上	40 100	42 299	5.20
思南以上	49 458	51 270	3.53

注:量测子流域面积数据来源于贵州省水文与水资源局信息中心。
上的准确度^[8]。本研究中使用 1956~2000 年乌江流域年平均降雨量等值线图,以该等值线图作为输入数据,在 ArcGIS 3D Analyst 中生成 TIN 数据,最后将 TIN 转化为栅格 DEM,栅格大小设为与地形 DEM 一致,即 100 m×100 m,就得到了 1956~2000 年乌江流域年平均降雨量栅格图(封 3 彩图 2)。

用 ArcGIS Grid 中的加权累积流函数(weighted flow accumulation)来计算每个子流域年平均降雨量值。加权累积流函数是常规累积流函数(regular flow accumulation)的扩展,除了水流流向栅格,还需要一个权重栅格(weight grid)作为输入参数,它不是计算某一栅格上游所有栅格的个数,而是计算其上游所有权重栅格值的总和。以降雨量栅格作为权重栅格,在 ArcGIS Spatial Analyst 中的栅格计算器(raster calculator)中输入如下命令:

$$\text{WeighFac_precip} = \text{flowaccumulation}(\text{fdr}, \text{precip}) \cdot 10$$

其中,fdr 为水流流向栅格;precip 为乌江流域年平均降雨量栅格图;10 为将降雨量从深度单位(mm)转化为体积单位(m³)的因子,每个栅格的面积为 10 000 m²。

查询该栅格在各水文站点所在位置的值就得到了各子流域的年累积降雨量,最后将各子流域的年累积降雨量分别除以各子流域面积即得到各子流域的年均降雨深(mm),如表 2。

表 2 子流域年平均降雨深

Tab. 2 Annual Precipitation Depth of Sub-watersheds

子流域名称	年平均降雨深/mm
湘江站以上	1 089.69
洪家渡站以上	979.13
乌江渡站以上	1 112.41
江界河以上	1 130.05
思南以上	1 148.73

2.2 水文数据

径流数据采用贵州省水文与水资源局 1956

~2000 年湘江、洪家渡、乌江渡、江界河、思南水文站实测的年月径流数据。

2.2.1 基流的确定

乌江流域地处世界 3 大喀斯特集中分布区之一的东亚片区的中心,流域内碳酸盐岩分布广泛,岩溶极为发育,地下水资源丰富,地下水对河川径流的贡献不可忽视。

表 3 为 1971~2000 年乌江流域 08~08 时(即日面雨量)强降水面雨量频次分布情况。从表中可以看出:① 12 月到次年 2 月乌江流域无面雨量 20 mm 以上强降水,3 月仅出现一次;② 30 a 中乌江流域无面雨量≥70 mm 的特强降水;③ 50~69.9 mm 之间的日面雨量 30 a 中共出现 3 次,集中在 6~7 月;④ 大于 20 mm 以上的强降水 90.6%出现在 5~9 月。

根据 1971~2000 年乌江流域 08~08 时强降水面雨量频次分布,流域强降水面雨量出现频次具有明显的季节变化特征和年变化特征。冬季频次几乎为零,夏季频次最多,春季猛增,秋季陡降。流域集中强降水主要出现在 5~9 月,7 月强度最大。冬季(12 月到次年 2 月)的河川径流基本是基流,因此本研究将其近似作为基流。根据 5 个水文站 1956~2000 年实测月径流资料,分别计算每年冬季(12 月到次年 2 月)径流量的平均值就得到了该年的基流量,然后将 45 a 各站基流量求平均,就得到了各站的月平均基流量,最后将月平均基流量乘 12 即为年平均基流量,如表 3。

表 3 子流域年平均基流量

Tab. 3 Annual Baseflow of Sub-watersheds

子流域名称	月均基流量/m ³	年均基流量/m ³
湘江站以上	8.433 47E+06	1.012 02E+08
洪家渡站以上	1.351 31E+08	1.621 57E+09
乌江渡站以上	4.940 98E+08	5.929 17E+09
江界河以上	6.944 09E+08	8.332 91E+09
思南以上	8.749 13E+08	1.049 90E+10

2.2.2 地表径流的确定

地表径流会将一个区域的非点源污染物从地面带入河网,对水体造成污染。本研究降雨径流关系中的径流指的就是地表径流,也称直接径流。河川系统上任何一点的径流是由该点以上流域的地表径流以及地下水含水层中的回归水所形成的^[9],此处假定河川径流由地表径流和基流组成,分别将 5 个水文站的河川径流量减去基流量,就得到了各子流域的地表径流量,再除以各自的流域面积即得各子流域的地表径流深,如表 4。

表 4 子流域年平均地表径流深

Tab. 4 Annual Depth of Surface Flow of Sub-watersheds

子流域名称	年均河川径流量/ m^3	年均基流量/ m^3	年均地表径流量/ m^3	年均地表径流深/ mm
湘江站以上	2.733 50E+08	1.012 02E+08	1.721 48E+08	310.736 8
洪家渡站以上	4.483 29E+09	1.621 57E+09	2.861 72E+09	302.827 8
乌江渡站以上	1.496 39E+10	5.929 17E+09	9.034 74E+09	325.224 5
江界河以上	2.203 75E+10	8.332 91E+09	1.370 46E+10	323.994 0
思南以上	2.760 42E+10	1.049 90E+10	1.710 53E+10	333.631 0

2.3 土地利用数据

土地利用数据是乌江流域 2000 年 1:10 万土地利用图。该数据是在 TM 影像上解译出来的,采用林业部门的分类方法,即分为耕地、林地、草地、水域、城乡、工矿、居民用地和未利用土地 6 大类,如图 3。

在 ArcGIS 中分别以 5 个子流域边界来剪切土地利用栅格图,得到各子流域土地利用图,然后打开各子流域土地利用图的属性表,利用 ArcGIS 中的 Summarize 功能对各土地利用类型的面积进行统计分析,结果如表 5。

表 5 回归分析输入参数

Tab. 5 Input Values Used in Regression Tool

子流域名称	地表径流深/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	降雨深/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	耕地 /%	林地 /%	草地 /%
湘江站以上	310.736 8	1 089.69	22	70	4
洪家渡站以上	302.827 8	979.13	36	42	21
乌江渡站以上	325.224 5	1 112.41	36	39	23
江界河以上	323.994 0	1 130.05	33	46	20
思南以上	333.631 0	1 148.73	31	49	18

3 降雨径流模型的建立和验证

3.1 模型的建立

根据表 5 中 5 个子流域的年均地表径流深、年均降雨深和土地利用百分比数据,进行多元回归分析,建立三者之间的数学关系式以预测地表径流。线性模型的一般式为:

$$y = \alpha + \sum \beta_i x_i \tag{1}$$

用 Microsoft Excel 2003 数据分析工具中的回归分析工具进行多元回归分析。对于耕地,以年均地表径流深的自然对数作为 y 值输入区域,以年均降雨深和耕地面积百分比的自然对数作为 x 值输入区域,进行多元回归分析,方程(1)变为:

$$\ln Q = a + b \cdot P + c \cdot \ln(\%A) \tag{2}$$

其中, Q 为地表径流深(mm/a); a、b、c 为回归分析计算出的系数; P 为降雨深(mm/a); %A 为某类土地利用类型的面积百分比。将分析结果代入方程(1),得:

$$\ln Q = 5.220\,454 + 0.000\,571 \cdot P +$$

$$0.067\,157 \ln(\%A) \tag{3}$$

如果耕地百分比为 100%,则方程(1)中的最后一项等于零,求解方程(2)得:

$$Q = 185.018\,1 \cdot \exp(0.000\,571 \cdot P) \tag{4}$$

同理,对林地和草地进行多元回归分析,得到如下结果。

林地:

$$Q = 165.472\,9 \cdot \exp(0.000\,562 \cdot P) \tag{5}$$

草地:

$$Q = 184.262\,4 \cdot \exp(0.000\,536 \cdot P) \tag{6}$$

对于水域,降雨量全部转化为径流量,即

$$Q = P \tag{7}$$

对于城乡、工矿、居民用地和未利用土地,由于其在整个流域所占比例很小,分别为 0.61%和 0.02%,没有代表这两种土地利用类型的典型流域;且未利用土地均为裸岩地,与城乡、工矿、居民用地都是以不透水面积为主的土地利用类型,故根据文献及野外调查,采用以下经验公式来计算:

$$Q = 0.6 \cdot P \tag{8}$$

在 ArcGIS Spatial Analyst 中使用栅格计算器,以年均降雨量栅格图和土地利用栅格图为输入参数,利用回归分析得到的上述各土地利用类型的降雨径流关系式,分别计算各种土地利用类型产生的地表径流量,最后将地表径流量相加就得到地表径流栅格图,如图 4。

3.2 模型的验证

用 ArcGIS Grid 中的加权累积流函数来计算模型模拟的年平均地表径流量,在 ArcGIS Spatial Analyst 的栅格计算器中输入如下命令:

$$\text{WeiFac_runoff} = \text{flowaccumulation}(\text{fdr}, \text{runoff}) \cdot 10$$

其中,fdr 为水流流向栅格;runoff 为乌江流域年平均地表径流栅格图;10 为单位转换因子。在所生成的新栅格图上查询 5 个水文站点处的值即得到 5 个水文站处的模拟地表径流量,与 5 个水文站点处的实测年均地表径流量对比如表 6。可以看出,两者非常接近,相对误差在 7%以内,证明所建降雨径流模型能满足模拟需要,模拟精度较高。

表 6 模拟地表径流量与实测年平均径流量比较

Tab. 6 Comparison Between Simulated Surface Runoff and Annual Surface Runoff

水文站	年均地表径流量 /m ³	模拟地表径流量/ m ³	相对误差/%
湘江	1.721 48E+08	1.757 45E+08	-2.09
洪家渡	2.861 72E+09	2.665 1E+09	6.87
乌江渡	9.034 74E+09	8.850 53E+09	2.04
江界河	1.370 46E+10	1.359 7E+10	0.79
思南	1.710 53E+10	1.685 14E+10	1.48

4 结 语

1) 乌江流域地表径流受降雨量、土地利用方式和流域面积影响很大,关系也很复杂,但对于多年平均地表径流量的计算,采用本文方法可以得到较好的结果。

2) 喀斯特流域的地下水流情况复杂,基流难以确定,本文采用径流年流量过程线和流域气候形势分析,可以简单快速地确定基流量。

3) 在数字流域基础上可以准确、快速地建立流域降雨径流模型,对于不同的研究区可采用相同的方法,但应根据要求选取不同精度的空间地

理数据。

参 考 文 献

[1] 肖鹏,张立. 降雨径流经验相关关系计算机优选途径探讨[J]. 吉林水利, 2004, 7: 4-6

[2] 吴险峰,王中根,刘昌明,等. 基于 DEM 的数字降水径流模型——在黄河小花间的应用[J]. 地理学报,2002, 57(6): 671-678

[3] 苏维词,李久林. 乌江流域生态环境预警评价初探[J]. 贵州科学,1997, 15(3): 207-214

[4] 吴正祺. 乌江流域大气降水微量元素丰度及地面水物质来源探究[J]. 贵州环保科技,2000, 6(4): 1-4

[5] 林诚二,村上正吾,渡边正孝,等. 基于全球降水数据估计的地表径流模拟——以长江上游地区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 125-135

[6] Maidment D R. 水文学手册[M]. 张建云,李纪生,译. 北京:科学出版社, 2002

第一作者简介:唐从国,博士生。研究方向为 GIS 与流域水文水环境。
E-mail:tangcongguo@hotmail.com

Simulation of Surface Runoff of Wujiang Watershed Based on GIS

TANG Congguo^{1, 2} LIU Congqiang¹

(¹ Institute of Geochemistry, CAS, 46 Guanshui Road, Guiyang 550002, China)
(² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China)

Abstract: Non-point source pollutants are mainly carried over land and into stream networks by surface runoff, and how to simulate surface runoff is the key to determine the loads of non-point source pollutants. The volume of surface runoff is chiefly controlled by climates, topographical characteristics and types of land use of the watershed. Five subwatersheds that can represent the whole watershed are chosen and their average annual precipitation, average annual surface runoff and percent land use are calculated respectively in digital Wujiang watershed based on climatic and hydrological data from 1956 to 2000 and land use data of 2000. The surface runoff is assumed to be a function of precipitation and land use and the regression tool is used to determine the relationship between surface runoff, precipitation and percent land use. So the rainfall-runoff models in all kinds of land use types are built. The result shows that the relative errors are all below 7% and the accuracy of the models is high.

Key words: digital watershed; rainfall-runoff model; surface runoff; percent land use; Wujiang

About the first author: TANG Congguo, Ph. D candidate, his major research interest is GIS, hydrology, and water environment of watershed.
E-mail: tangcongguo@hotmail.com

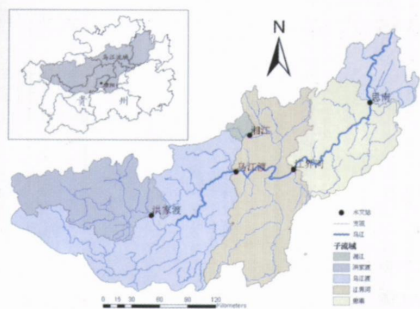


图 1 数字乌江流域

Fig. 1 Digital Map of Wujiang Watershed

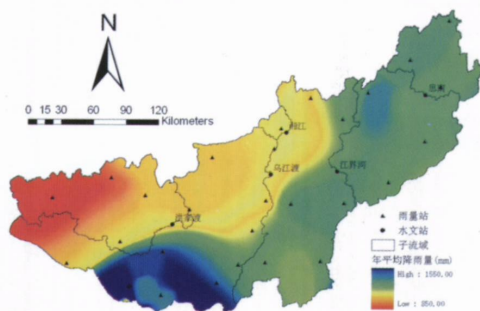


图 2 乌江流域年平均降雨量栅格图

Fig. 2 Annual Precipitation Depth Map of Wujiang

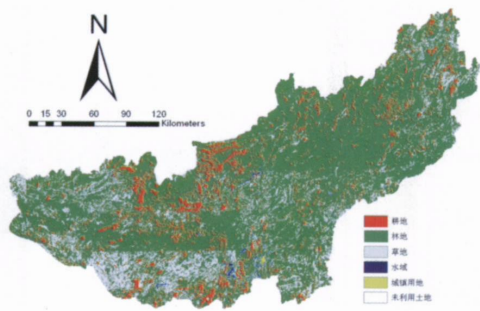


图 3 乌江流域土地利用栅格图

Fig. 3 Landuse Map of Wujiang Watershed

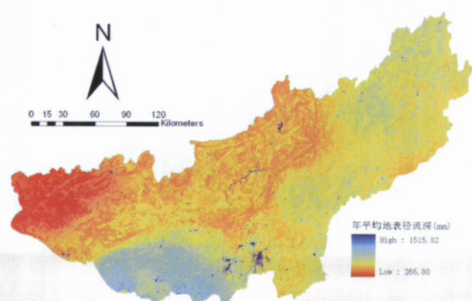


图 4 乌江流域年平均地表径流栅格图

Fig. 4 Annual Surface Runoff Map of Wujiang