

基于空间信息技术的呼伦湖流域研究*

孙 标 李畅游[#] 张 生 赵胜男

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要 通过对干涉雷达技术任务(SRTM)数据处理,运用土壤与水评价工具(SWAT)模型对呼伦湖整个流域的数字高程模型(DEM)进行水文特征提取,分析流域地形分布情况。呼伦湖全流域面积约为25.6万km²,蒙古国部分约为16.3万km²,约占总面积的63.7%。坡度为0~2.0°的地形主要分布在中国境内的呼伦湖南岸和东岸以及贝尔湖周边的平坦草原上,降雨主要被植被截留和土壤吸收,产汇流条件差;而呼伦湖的主要水源、产汇流条件较好的克鲁伦河和乌尔逊河,其产流区大部分位于蒙古国。2国应加强流域综合管理,合理配置水资源,以保证下游入湖的水量来防止呼伦湖的持续萎缩。

关键词 呼伦湖流域 DEM SRTM数据 SWAT模型

Analysis of Hulun digital basin based on spatial information technology SUN Biao, LI Changyou, ZHANG Sheng, ZHAO Shengnan. (Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot Inner Mongolia 010018)

Abstract: Supported by Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data, the Hulun digital basin was established by using Digital Elevation Model (DEM). Soil and Water Assessment Tool (SWAT), which could generate basin network, divide subwatershed and generate basin boundary automatically, was applied to extract hydrological feature and analyze topography distribution of Hulun digital basin. Results showed that the area of whole Hulun Lake basin was 256 000 km², with 163 000 km² in Mongolian and 93 000 km² in China. Slope of 0-2.0 was mainly distributed in flat grassland of China, as well as south and east coasts of Hulun Lake, and surrounding of Buir Lake, this kind of terrain had poor runoff conditions for the rain water could be retained vegetation or absorbed by soil. The Kelulun River and Halaha River was main water source of Hulun Lake, they had perfect runoff conditions, but the main water flow producing region was located in Mongolia. The two governments should strengthen the integrated river basin management, rational allocation of water resource, to ensure the amount of water flow into the Hulun Lake, and prevent the lake atrophy continuously.

Keywords: Hulun Lake basin; digital elevation model; SRTM data; SWAT model

湖泊是内陆水体的重要组成部分,具有多种利用价值和功能,其水源来自于流域。湖泊及其流域是人类主要的生境所在,但随着社会经济的发展,湖泊萎缩和流域生态退化等问题也随之出现。而目前对湖泊和流域的研究大多将两者割裂,忽视了湖泊/流域的生态系统完整性^[1,2]。同时,流域管理采取分散化、以行政辖区为基础的管理模式,而一些跨国界的湖泊/流域所面临的问题非常复杂。

呼伦湖地处内蒙古北方边疆,其流域跨越蒙古国与我国。由于所处区域偏远、气候寒冷、交通不便等因素影响,受国内外的关注和相关研究甚少,研究内容也主要集中在湖区内部,关于流域的研究仅有零星的文字描述。关于呼伦湖流域的面积,不同作者有不同的记载,数据相差甚远,尚无定论。其中,韩玉梅等^[3]记载为11.7万km²,秦伯强等^[4]为15.3

万km²,严登华等^[5]、李翀等^[6]为33 469 km²,王荔弘^[7]为37 214 km²。空间信息技术具有大范围、高时效等特点,对无资料、少资料地区有很好的针对性,李云鹏等在呼伦湖地区利用卫星影像及气象数据研究了湖面萎缩及区域气候变化情况。笔者则利用空间雷达技术及计算机地理信息系统软件,通过对干涉雷达技术任务(SRTM)数据处理,对呼伦湖整个流域的数字高程模型(DEM)进行水文特征提取,分析流域地形分布情况,以期对后续的流域水文模拟、污染物运移以及流域管理提供研究基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

呼伦湖位于内蒙古自治区满洲里市及新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗之间,地理坐标为116°58'~

第一作者:孙 标,男,1983年生,博士研究生,主要从事3S技术在湖泊演化中的应用。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 50669004、No. 50969005、No. 40901262)。

117°48'E, 48°33'~49°20'N。湖盆东边是兴安岭山脉,阻隔了东南季风带来的湿润气流;西边及南边是蒙古高原。湖面呈不规则斜长方形,轴为东北至西南方向,长度为 93 km,最大宽度为 41 km,湖水多年平均面积在 2 000 km²左右,平均水深为 5.7 m。呼伦湖属额尔古纳河水系,流域地处中温带半干旱大陆性季风区,多年平均降水量为 268 mm。呼伦湖水的补给除大气降水外,主要来自发源地蒙古国肯特山脉的克鲁伦河,以及连接贝尔湖和达赉湖的乌尔逊河。湖东北部的新开河是一个吞吐性河流,当海拉尔河水量大时,顺该河流入呼伦湖;当呼伦湖水量大时,又顺此河流入额尔古纳河(见图 1)。

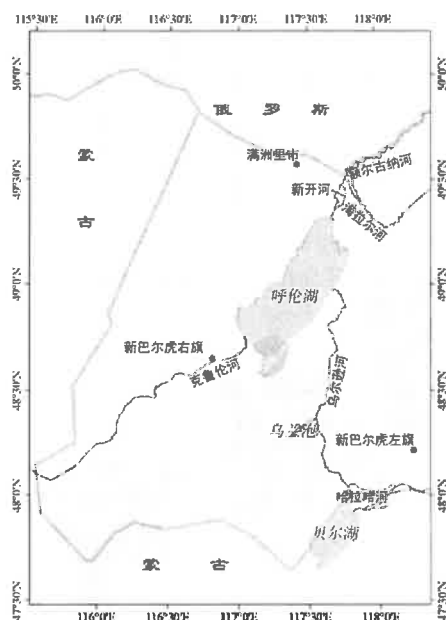


图 1 呼伦湖地理位置图
Fig. 1 Geography location of Hulun Lake

1.2 数据来源

采用的 DEM 为 SRTM 数据。SRTM 数据由美国航空航天局、美国国家图像测绘局以及德国与意大利航天机构共同合作完成。SRTM 数据是世界上第 1 套高分辨率海拔高度模型,公开发布的数据分辨率为 3 弧秒,投影后的长度相当于 90 m,可免费下载使用。SRTM 数据的公布具有重要意义,很多研究人员已经成功地将 SRTM 数据应用于相关领域的研究^[8-10]。

首先,根据 Google Earth 的卫星地图大致估计呼伦湖全流域的坐标范围,介于 107°00'~123°00'E, 45°30'~50°30'N。然后,登陆美国地质勘探局数据库网站,输入所需经、纬度后获取数据,下载的数据为栅格图像,椭球体系统为 WGS_1984,见图 2。因流域东西跨度大,为减少因变形而产生的面积计算误差,所有图件均采用阿尔伯斯双标准纬线多圆锥投影系统,双标准纬线选取 40°N 与 50°N,中央经线选取 115°E。

2 呼伦湖流域数字分析

2.1 理论方法

2.1.1 DEM 介绍

DEM 是利用一个任意坐标场中大量已知的 X、Y、Z 轴的坐标点对地面的一个连续统计表示,它将区域空间切分为规则的网格单元,每个网格单元对应一个高程值。从数学的角度,用一个二维函数系列取值的有序集合来概括表示 DEM 的基本内容,见式(1)。

$$K=f(u_p, v_q) \quad (p=1,2,3,\dots,m; q=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

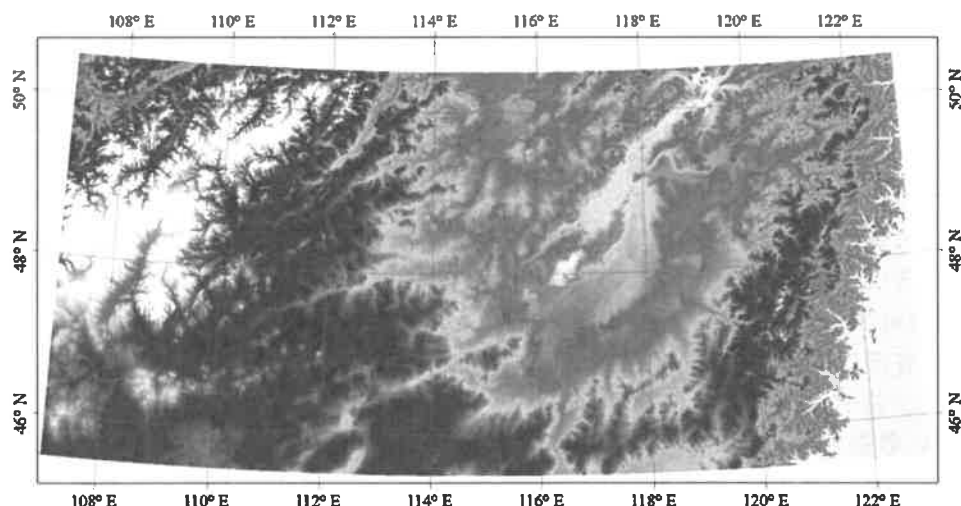


图 2 呼伦湖流域下载后原始数据图
Fig. 2 The download DEM of Hulun Lake basin

式中: K 为地面点上高程取值; u_p, v_q 为地面点的二维坐标可以采用任意一种地图投影的平面坐标; p, q 分别为二维坐标方向上地面点的个数; m, n 分别为二维坐标方向上地面点个数的最大值。

2.1.2 水流方向计算

从 DEM 上提取流域信息, 必须确定各个网格单元的水流方向, 这是利用 DEM 进行数字河网提取的前提。判断水流方向的方法较多, 目前应用较广泛的为单流向法, 单流向法就是假定一个网格中的水流只从一个方向流出网格。而 D8 算法是较早提出并得到广泛应用的一种单流向法^[11], 该方法假设单个网格中的水流只有 8 种可能的方向, 即流入与之相邻的 8 个网格中。D8 算法成熟稳定、计算简单、效率较高, 并且对洼地和平坦区域具有较强的处理能力, 因而应用最为广泛。美国环境系统研究所研制的 ArcGIS 软件中集成的地表水文模拟专用模块, 就是以 D8 算法为基础的。

2.1.3 数字河网与流域边界的确定

河网生成需要先对 DEM 进行填洼处理。洼地是高程小于相邻周边的点, 它们的存在会阻碍自然水流朝流域出口的流动。因此, 对每个网格点

进行查找, 找出凹陷点并使其高程等于周围点的最小高程, 生成新的无洼地 DEM。按最陡坡度原则确定水流路径, 并计算每个网格单元的上游集水面积, 其集水面积的量纲以网格数目表示, 从而产生包含每个网格单元上坡面汇水面积的新矩阵, 将其定义为最小河道集水面积阈值。当网格的上游集水面积超过此阈值时, 这些网格点就定义为河道。

流域边界确定与子流域划分相对比较简单。在确定流域出口断面位置后, 就以流域干流上的每个支流为单元划分子流域, 即一旦河网定下来, 子流域也就确定了。通过沿水流方向确定每个网格汇入的支流, 从而将整个流域划分为若干子流域。

图 3 为基于 DEM 提取河网的主要步骤的简单示意图。图 3(a) 表示的是原始 DEM, 图 3(b) 表示的是利用原始 DEM 通过 D8 算法计算得到的每个网格的水流方向数据; 在此基础上, 进一步计算得到每个网格的汇水面积矩阵, 见图 3(c)。若将最小河道集水面积阈值定义为 5 个网格, 即可最终提取的河网网格见图 3(c) 中灰色区域。

2.2 分析与讨论

2.2.1 流域分布情况

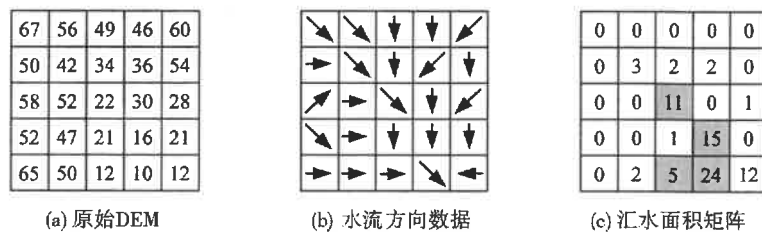


图 3 基于 DEM 提取河网的主要步骤的简单示意图
Fig. 3 Main steps of river networks extraction from DEM

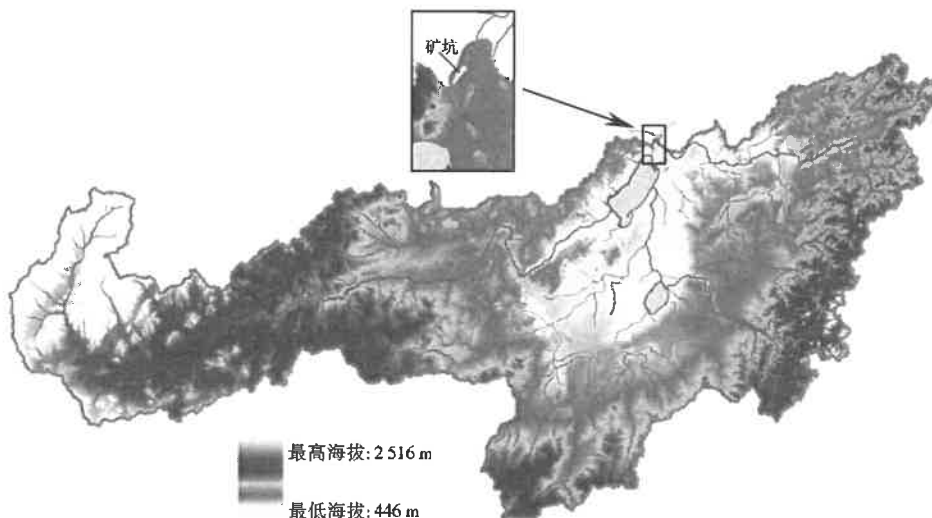


图 4 呼伦湖流域数字河网及流域边界图
Fig. 4 Digital rivers and basin boundary in Hulun Lake basin



图 5 呼伦湖水系子流域划分图

Fig. 5 Sub-basin of Hulun Lake basin

1—克鲁伦河流域;2—乌兰泡流域;3—未知河流域;4—哈拉哈河流域;5—海拉尔河流域;
 6—贝尔湖周边流域;7—乌尔逊河流域;8—新开湖流域;9—新开河流域;10—呼伦湖周边流域

采用基于 ArcGIS 软件的土壤与水评价工具 (SWAT) 模型对呼伦湖流域 DEM 进行了计算, SWAT 是一套由美国农业部开发、历经 30 多年的具有很强的物理机制并适用于复杂大流域的水文模型^[12]。经多次试调,最小河道集水面积阈值定义为 300 km² (约 5 万个网格点左右) 时计算的数字河网和实际河网最为相符,最终提取结果见图 4。

由图 4 可以看出,呼伦湖流域分布广,东西跨度大,最高海拔位于蒙古国肯特山脉,为 2 516 m,最低洼处位于呼伦湖湖区,为 544 m。图 4 所示的最低海拔为 446 m 是由于扎赉诺尔矿区的巨大矿坑所引起,在雷达扫描作业时可见,为人造地形,见图 4 的局部放大图。

图 5 为呼伦湖水系子流域划分图 (图中虚线代表国界线),可详细划分为 10 个子流域。2、3 流域为季节性河流,其中 3 流域由于地处蒙古国境内,也无相关文献记载,故河流名未知;6、10 流域为贝尔湖、呼伦湖周边区域,有降雨时直接排入湖内,不流入其他河道;8 流域为其他流域所包围的一块洼地,不与河流连通,在丰水年、呼伦湖水位高时,湖水会溢流入这块洼地,形成的水域被称为新开湖,在枯水年干枯,所以严格来讲 8 流域即新开湖流域不属于呼伦湖流域;5、9 流域即海拉尔河流域与新开河流域,会因新开河河水的流向不同而归属不同,在呼伦湖水位高、新开河流向额尔古纳河时,5、9 流域归属于额尔古纳河水系;在呼伦湖水位低、海拉尔河通过新开河流向呼伦湖时,5、9 流域归属于呼伦湖内陆

水系。表 1 为呼伦湖流域 (新开湖流域不计入) 面积统计表。

表 1 呼伦湖流域面积统计表

Table 1 Area statistics of sub-basin in Hulun Lake basin

流域名称	面积 /km ²	占总流域比例/%	国内面积/km ²	国外面积/km ²
克鲁伦河	99 786.31	38.92	5 243.38	94 542.93
乌尔逊河	5 980.70	2.33	5 836.37	144.33
哈拉哈河	17 232.18	6.72	8 769.10	8 463.08
海拉尔河	54 260.28	21.16	54 260.28	0
呼伦湖周边	6 639.31	2.59	6 639.31	0
贝尔湖周边	2 208.98	0.86	425.41	1 783.57
未知河流	19 879.47	7.75	2 307.65	17 571.82
乌兰泡	50 296.51	19.62	9 568.87	40 727.64
新开河	95.03	0.04	95.03	0
呼伦湖全流域	256 378.77	100.00	93 145.40	163 233.37

由表 1 得知,呼伦湖全流域面积约为 25.6 万 km²,而蒙古国部分约为 16.3 万 km²,约占 63.7%,我国部分约为 9.3 万 km²。其中,来水量最多、面积最大的克鲁伦河流域几乎 95% 的汇水面积位于蒙古国。如不将海拉尔河和新开河流域计算在内的话,呼伦湖全流域面积约为 20.2 万 km²,蒙古国部分所占比例将增加到 80.7%。

2.2.2 坡度分析

坡度是地形中重要的参数,直接影响流域产流效果,在相同土壤和降雨强度的情况下,产流系数会随着坡度的增加而增加^[13]。在确定呼伦湖流域范围后,应用 ArcGIS 软件的空间分析模块对全流域的 DEM 做坡度分析,分类参考国际地理学会地貌调

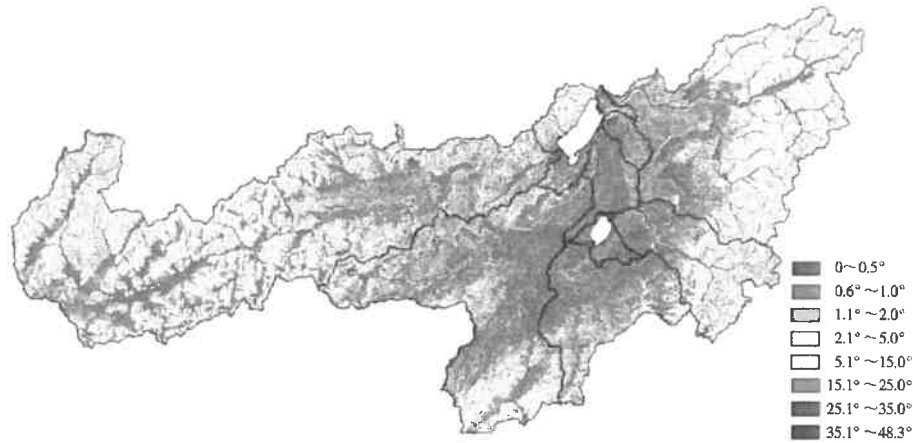


图 6 呼伦湖流域不同坡度分布图
Fig. 6 Slope distribution in Hulun Lake basin

表 2 呼伦湖流域不同坡度所占比例的统计结果
Table 2 The proportion of different slope in Hulun Lake basin

坡度	0~0.5°	0.6°~1.0°	1.1°~2.0°	2.1°~5.0°	5.1°~15.0°	15.1°~25.0°	25.1°~35.0°	35.1°~48.3°
克鲁伦河	10.430 0	17.330 0	25.180 0	28.360 0	16.580 0	1.940 0	0.180 0	0.010 0
乌尔逊河	35.290 0	39.430 0	22.040 0	3.160 0	0.080 0	0	0	0
哈拉哈河	12.440 0	17.220 0	17.730 0	19.260 0	28.470 0	4.530 0	0.340 0	0.010 0
海拉尔河	11.120 0	15.490 0	17.920 0	22.340 0	30.270 0	2.710 0	0.150 0	0.003 0
呼伦湖周边	14.360 0	22.030 0	29.910 0	27.840 0	5.780 0	0.090 0	0.000 3	0
贝尔湖周边	32.200 0	41.790 0	24.670 0	1.350 0	0.002 0	0	0	0
未知河流	21.820 0	31.420 0	30.150 0	13.790 0	2.760 0	0.050 0	0	0
乌兰泡	17.880 0	28.070 0	31.120 0	18.950 0	3.950 0	0.040 0	0.000 1	0
新开河	21.890 0	29.240 0	28.010 0	15.430 0	5.170 0	0.250 0	0	0
新开湖	31.020 0	33.880 0	28.530 0	6.140 0	0.430 0	0.000 4	0	0
呼伦湖全流域	14.090 0	21.100 0	24.780 0	22.510 0	15.770 0	1.630 0	0.120 0	0.005 0

查和野外制图专业委员会制定的方法,将坡度分为 7 级:0~2°为平原至微倾斜坡,2°~5°为缓倾斜坡,5°~15°为斜坡,15°~25°为陡坡,25°~35°为急坡,35°~55°为急陡坡,>55°为垂直坡。根据呼伦湖流域地形情况,为显示更直观,将 0~2°又分为 3 级,无 >55°垂直坡,最终共 8 级,流域坡度分布见图 6,统计结果见表 2。

由图 6、表 2 可得知,整个流域坡度为 0~2.0°约占 60%,主要分布在我国境内的呼伦湖南岸和东岸以及贝尔湖周边的平坦草原上,降雨主要被植被截留和土壤吸收,产汇流条件差;15.1°~25.0°的陡坡和 25.1°~35.0°的急坡所占比例较小,主要集中在克鲁伦河、哈拉哈河、海拉尔河的上游地区,产汇流条件较好,这也解释了这 3 条河流较其他河流有丰富的径流量的原因;呼伦湖周边流域的坡度较大是由于湖区西岸的低山丘陵地形所致,每当有降雨时以洪水直接排入湖区;新开河流域 5.1°~25.0°的坡度出现的原因与扎赉诺尔的矿坑有关,原始地形并无 5°以上的高坡。

3 结 语

(1) 使用 SRTM 数据对呼伦湖流域进行分析,充分利用了空间信息技术的大范围、高时效等特点,尤其对跨国界的流域研究有很好的作用,弥补了因国界阻隔、地区偏远无法到达所引起的数据收集困难等问题。通过 SWAT 模型的数字水文分析及 ArcGIS 软件的空间分析,得出呼伦湖全流域面积约为 25.6 万 km²,而蒙古国部分约为 16.3 万 km²,约占 63.7%,我国部分约为 9.3 万 km²。

(2) 呼伦湖湖水的主要来源为克鲁伦河和乌尔逊河,乌尔逊河的水量主要来自于哈拉哈河和贝尔湖,而产汇流条件较好的克鲁伦河和哈拉哈河汇水区域大部分位于蒙古国。这就说明了蒙古国流入我国的水量在很大程度上决定了呼伦湖的扩张与萎缩的命运,当前亟待解决的问题为加强上游水资源的合理配置,以保证下游入湖的水量来防止呼伦湖的持续萎缩,2 国政府部门应加强联系,重视国际协商和流域综合管理。

(下转第 19 页)

