基于人机交互的地形复杂区小流域划分研究
——以湖北省为例

韩 培[1,2]，王志刚[1,2]，高 超[3]，张平仓[1,2]，任洪玉[1,2]，董林垚[1,2]

(1. 长江水利委员会 长江科学院 水土保持研究所，湖北 武汉 430010；
2. 水利部 山洪地质灾害防治工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；3. 湖北省水土保持监测中心，湖北 武汉 430071)

摘 要：[目的] 对地形复杂区小流域划分方法进行研究，为区域生态小流域建设、规划等提供基础数据。[方法] 以湖北省为例，其地形涵盖山地、丘陵和平原，且多河流、湖泊分布。首先基于 DEM 自动提取全省小流域，然后辅助沟道、遥感影像、居民点数据人工修正山区小流域，在平原区采用高精度水系替代常规沟道进行人工修正，并对适宜集流阈值、小流域面积频率、精度以及河网密度进行分析。[结果] 湖北省共划分小流域 5 806 条，面积在 30～50 km^2 的占 60%，且划分精度高；面积小于 20 km^2 划分精度低，在平原区分布密集；总体上，山区小流域的划分精度高于平原区，但其小流域平均河网密度低于平原区。[结论] 对任何地形进行小流域划分，都必须使用人机交互修正，才能获得较好的结果；平原区小流域自动划分的精度低于山区，需辅助高精度水系资料进行修正才能提高精度。

关键词：人机交互；地形复杂区；小流域划分；城市水土保持

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)06-0182-05 **中图分类号**：S157

文献参数：韩培，王志刚，高超，等. 基于人机交互的地形复杂区小流域划分研究[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：182-186. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.028. Han Pei, Wang Zhigang, Gao Chao, et al. Small watersheds division in complex terrain region based on human-machine interaction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 182-186.

Small Watersheds Division in Complex Terrain Region Based on Human-machine Interaction
—Taking Hubei Province as an Example

HAN Pei[1,2], WANG Zhigang[1,2], GAO Chao[3], ZHANG Pingcang[1,2], Ren Hongyu[1,2], Dong Linyao[1,2]

(1. *Soil and Water Conservation Department, Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei* 430010, *China*; 2. *Mountain Flood Geological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei* 430010, *China*; 3. *Soil and Water Conservation Monitoring Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei* 430071, *China*)

Abstract: [Objective] The watershed division in complex topography area was conducted in order to provide basic data for regional ecological watershed construction and planning. [Methods] Hubei Province was selected as a case study area, where covers mountainous, hill land, plain, many rivers and lakes. Firstly, small watersheds were extracted automatically by using the ArcGIS base on DEM data. Then, small watersheds in the mountains were merged and revised manually with the assistance of gullies, remote sensing images and residential data. For plains, the conventional gullies were replaced by the high-precision river systems. At last, we analyzed the suitable threshold value, frequency, precision and river network density. [Results] There were 5 806 small watersheds in Hubei Province. The watersheds with areas changed from 30 to 50 km^2 account for 60% of the total number. Watersheds with area small than 20 km^2 had low-precision and dense in

收稿日期：2018-05-07 **修回日期**：2018-06-13

资助项目：国家重点研发计划项目“喀斯特槽谷区土壤地上/下流/漏失过程与保护技术研发及示范”(2016YFC050230305)；国家重点研发计划项目“山洪灾害监测预警关键技术与集成示范”(2017YFC1502506)；武汉市水务局项目“武汉市水土保持遥感普查”(CKSK2016876/TB)；湖北省水利厅项目“湖北省水土流失普查成果遥感复核”(CKSK2015592/TB)

第一作者：韩培(1989—)，女(汉族)，湖北省孝感市人，硕士，主要从事水土保持相关遥感信息化方面的研究。E-mail：2196721759@qq.com。

通讯作者：王志刚(1981—)，男(汉族)，湖北省枣阳市人，博士，高级工程师，主要从事土壤地理、土壤侵蚀方面的研究。E-mail：371381624@qq.com。

plain. In general, the classification accuracy of small watershed in mountainous area was higher than that in plain area, while the average river network density shows the opposite. [Conclusion] The results show the human-machine interaction correction could be used for the small watershed's division in order to get a better result. The accuracy of automatic division of small watersheds in plain area is lower than that in mountainous area, which needs to be corrected manually with high precision water systems.

Keywords: human-machine interaction; complex terrain region; division of small watersheds; urban water and soil conservation

小流域是以天然沟壑及其两侧山坡形成的闭合集水区。每个小流域既是一个独立的水土流失单元,又是发展农林牧业的经济单元。根据水利部规定,目前中国水土保持工作中小流域的面积不超过 50 km^2[1]。在新形势下,中国水土保持工作方向发生了巨大的转变,由传统的水土流失综合治理转向全面推进清洁型小流域建设;同时大力推进水土保持信息化建设,以水土保持信息化推动现代化[2]。小流域划分能为区域的生态清洁小流域建设、规划等提供小流域基础数据支撑,同时,能将城市水土流失[3]状况细化到小流域单元进行数字化管理,建立小流域水土保持基础数据库,满足新时代水土保持信息化、数字化的要求。数字高程模型(digital elevation model, DEM)[4]是小流域划分的基础。DEM 包含丰富的地形、地貌和水文信息,能够反映各种分辨率的地形特征。通过 DEM 可以提取大量的地表形态信息,如水流方向、汇流累积量、河流网络以及流域分割等[5]。目前,利用 DEM 进行流域分析的工具有很多,如:ArcGIS[6]、Global Mapper[7]、WMS (Watershed Modeling System)[8] 和 MapGIS[9] 等。本文选用 ArcGIS 的水文分析模块(Hydrology Model[10])作为流域自动划分的工具,因为 Hydrology Model 是美国环境系统研究所公司(ESRI)专门针对水文分析提出的,可用于地形和河流网络的提取、分析以及地形模型的可视化[11]。陈智虎等[12]基于 DEM 对典型喀斯特地貌类型区金沙县进行小流域划分;朱秀迪等[13]分析了西南岩溶区小流域的水文特征;朱战强等[14]基于典型小流域探讨了退耕还林对宁南黄土丘陵区景观格局的影响。目前,国内外采用人机交互方式对地形复杂区小流域划分研究很少。湖北省是典型的中国南方地形复杂区,地貌类型涵盖了山地、丘陵和平原,且多河流、湖泊分布。本文首先基于 DEM 使用 ArcGIS 自动划分该省小流域,然后在山区采用沟道、遥感影像、居民点资料辅助人工合并和修正;在平原区,由于自动提取的沟道太密集,采用高精度水系替代沟道进行人工修正;并进行适宜集流阈值、小流域面积频率、精度以及河网密度分析,以期对今后类似地复杂地形区的小流域划分研究提供参考价值。

1　研究数据与方法

1.1　研究区概况和研究数据

湖北省位于中国中部偏南、长江中游,地理位置介于 29°05′—33°20′N,108°21′—116°07′E 之间。长江、汉江横贯其中,平原区水系发达,星罗密布。全省海拔范围是 7～3 083 m,其中最高点位于神农架林区。地势大致为东、西、北三面环山,中间低平,略呈向南敞开的不完整盆地。在湖北省国土总面积中,山地占 56%,丘陵占 24%,平原占 20%。山地主要位于恩施州、神农架、十堰、宜昌西部、襄阳西南部、随州北部、荆门北部、孝感北部、黄冈东北部、黄石及咸宁东南部地区;平原主要是江汉平原[15],包括荆州、潜江、仙桃、天门、武汉、鄂州以及孝感南部地区;其他地区为山区向平原区过渡的丘陵地带。

试验使用的主要基础数据是 DEM,辅助资料有高分遥感影像、行政区划、水系及其他数据(表 1)。

表 1　研究区基础数据

序号	数据名称	数据格式	参数说明	来 源
1	湖北省 DEM	栅格	栅格大小 20 m×20 m,符合 GB/T 17 278,CH/T1015.2 标准	购买自高分湖北中心
2	湖北省高分遥感影像	栅格	全色空间分辨率 2 m,多光谱空间分辨率 8 m,比例尺 1∶50 000	购买自高分湖北中心
3	湖北省行政区划数据	矢量	包含省界、市界、县界、乡镇界以及相应点位置,比例尺 1∶50 000	湖北省测绘局提供
4	湖北省水系数据	矢量	包含河流、湖泊、水库,比例尺 1∶50 000	湖北省测绘局提供
5	平原区水系数据	矢量	包含河流、湖泊、水库,比例尺 1∶10 000	湖北省测绘局提供
6	其他数据	矢量	公路、铁路、水利工程、居民点、山峰点矢量数据,比例尺 1∶50 000	湖北省测绘局提供

1.2 划分方法

(1) 洼地填充。由于地形洼地的存在,导致连续栅格中依据水流方向矩阵提取的排水网络不连续。因此,在 ArcGIS 中,用 Hydrology—>Fill 对 DEM 进行洼地填充。

(2) 水流方向计算。ArcGIS 采用最大坡降法(Deterministic eight-node, D8)[6] 原理计算水流方向,基于无洼地 DEM,运用 Hydrology—> Flow Direction实现。

(3) 汇流累积量计算。汇流累积量指各网格上游集流网格的数量。假定集水区每个网格有 1 单位水量,按照水流方向流动,流经各网格的汇流累积量都会增加 1。在 AcrGIS 中,基于水流方向,运用 Hydrology—>Flow Accumulation 实现。

(4) 集流阈值设置。目前,国内河网提取方法主要采用地表径流漫流模型[13]。当汇流累积量达到集流阈值[14]时,会产生地表水流。集流阈值设定是河网提取的关键,也影响小流域自动划分的精细程度。本文采用循环统计分析法确定适宜的集流阈值。选取原则是经自动化划分后,面积大于 50 km^2 的子流域很少,小于 10 km^2 的子流域不至于太多、太碎。目的是为减少后期人工修正工作量。具体分析流程为:①在初始时刻,设定一个较大集流阈值,进行子流域自动提取;②统计小于 10 km^2,10~50 km^2,大于 50 km^2 的子流域数量及占比;③依次减小初始集流阈值,循环进行自动提取与统计;④遵循选取原则,综合分析得到适宜集流阈值。

(5) 河网提取。设定集流阈值后,用 Spatial Analyst —>Raster Calculator 自动提取河网;经矢量化、人工修正获取沟道,它是后期进行山区微流域合并与修正的重要辅助数据。

(6) 河网分级。河网分级是对线性河流用数字标识方式划分等级,运用 Hydrology—> Stream Order实现。

(7) 子流域自动提取。子流域自动提取流程为:①用 Hydrology—>Stream Link 提取出水点;②结合水流方向,用 Hydrology—>Watershed 计算栅格集水单元;③经矢量化获得小流域自动划分的结果。

(8) 微流域人工合并。依据小流域划分规范[1]要求,小流域面积宜控制在 10~50 km^2 之间。小流域自动划分的结果中存在大量面积小于 10 km^2 的微流域,需进行人工合并。

(9) 人机交互修正。对面积小于 0.1 km^2 的微流域,为减少人工合并工作量,用 Generalization—> Eliminate自动合并。对面积大于 0.1km^2 的微流域,在保证地形地貌完整的前提下,辅助沟道、遥感影像、居民点数据,进行人工手动修正(包括合并、分割和修正边界等)。修正工作遵循原则为:①保证地表上下游汇流关系和拓扑关系正确性。②合并后,小流域面积尽量控制在 50 km^2 以内。③对较大或重要的河流、湖泊以及水库,在划分中,可将其单独作为 1 个流域。④当流域边界跨过村庄,要保证村庄的完整性,需结合遥感影像、居民点和地形,适当调整小流域边界。⑤为方便行政管理,跨县界小流域,用县界进行分割[1]。

依据自然地表汇流关系与地形特征,进行人机交互修正后,形成不同形态类型(包括完整型、区间型、坡面型及狭长型等[1])的小流域。

1.3 结果验证

验证人机交互方式划分的小流域成果是否符合要求。将小流域边界与地形图进行叠加,核查小流域边界是否与等高线垂直,小流域的分水线必须经过山顶点以及鞍部;将小流域与水系进行叠加,核查地表汇水关系及拓扑关系是否正确。部分不确定的地区还需要进行野外调查验证。

2 结果与分析

2.1 适宜集流阈值的选取

按照前面循环统计分析法原理,将集流阈值依次设定为 3 000,2 000,1 500,1 000,800,500 和 300,然后运用 ArcGIS 软件分别自动提取子流域,分别统计小于 10 km^2,10~50 km^2,大于 50 km^2 的子流域数目及比例,统计结果详见表 2。

表 2 不同集流阈值条件下子流域统计

序号	集流阈值	总子流域数	<10 km^2 子流域数	10~50 km^2 子流域数	>50 km^2 子流域数	<10 km^2 比例/%	10~50 km^2 比例/%	>50 km^2 比例/%
1	3 000	4 841	1 581	1 800	1 460	32.7	37.1	30.2
2	2 000	6 907	2 323	3 454	1 130	33.6	50.0	16.4
3	1 500	9 134	3 328	5 025	781	36.4	55.0	8.6
4	1 000	13 294	5 615	7 343	336	42.2	55.2	2.6
5	800	16 107	8 403	7 526	178	52.2	46.7	1.1
6	500	25 403	18 706	6 662	35	73.6	26.3	0.1
7	300	40 801	36 660	4 138	3	89.9	10.1	0.01

如图 1—2 可知:(1) 集流阈值越大,自动划分的小流域总数量越少,且面积大于 50 km^2 的子流域占比率较大,因此,集流阈值设置不宜过大;(2) 随着集流阈值的减小,自动划分的小流域越精细,表现为面积小于 50 km^2 的子流域数量不断增加,面积大于 50 km^2 的数量不断减少;(3) 随着集流阈值减小至 800 时,面积在 10～50 km^2 的子流域占比率呈下降趋势,但数量仍在增加;(4) 当集流阈值低于 500 时,随着集流阈值的减小,10～50 km^2 的子流域的数量显著减少,说明原先在 10～50 km^2 的小流域被细化;(5) 要保证面积大于 50 km^2 的子流域较少,且自动提取的子流域不太破碎,综合分析后,集流阈值选取为 500 较合适。

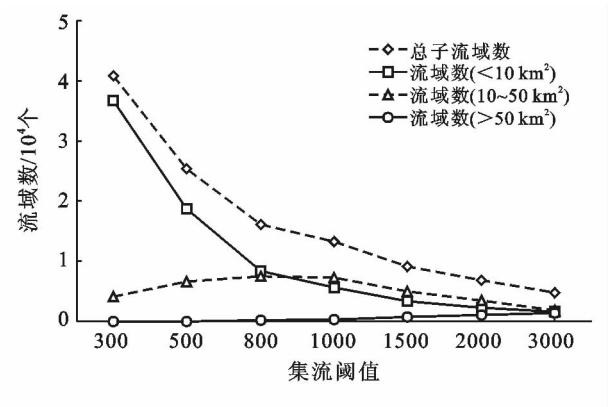


图 1　子流域数量统计

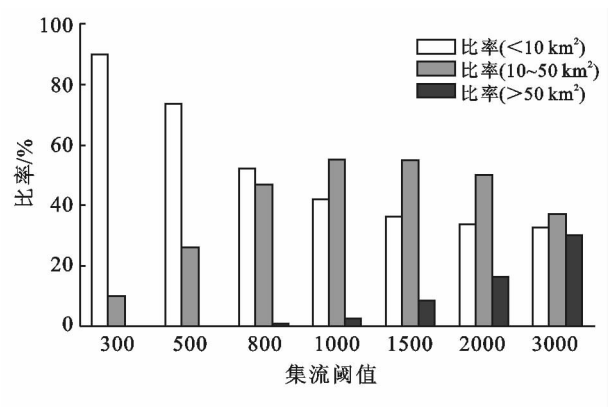


图 2　子流域数量比例统计

2.2　平原区小流域修正

在设置合适的集流阈值后,计算机自动提取的小流域如图 3 所示。在平原区小流域自动划分中,出现很多密集直线错误(如图 3 中方框)。

经分析可知:①密集直线错误大多出现在平原区,这是因为计算机自动化划分的小流域是基于邻近栅格的高程差来确定水流方向,平原湖库区地势变化小,水流方向不确定,因此,自动提取的沟道太密集、小流域密集;②平原区小流域修正或合并时,不再采用自动提取的沟道作为流向参考,而采用 1∶1 万平原区水系替代沟道,辅以遥感影像、居民点数据,按照 1.2 中方法进行人工合并或修正;③对大型或重要的平原区河流、湖泊和水库,参考北京市小流域划分成果[1],将其单独作为 1 个小流域。

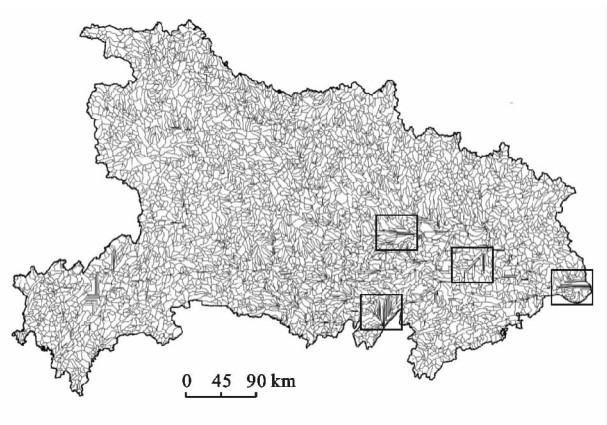


图 3　计算机自动提取的小流域

在人机交互修正完成后,经验证和处理获得最终的小流域划分结果(图 4),湖北省划分小流域共 5 806条。

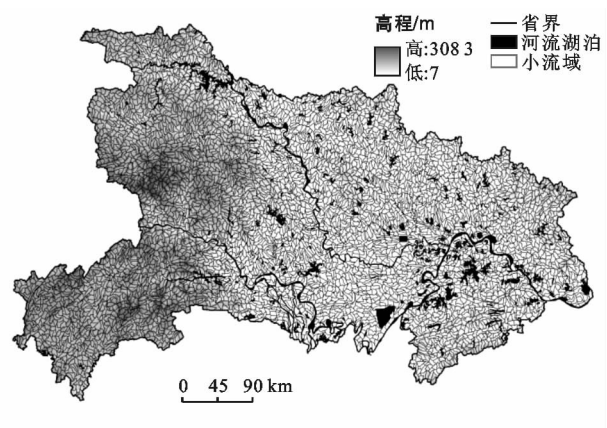


图 4　湖北省小流域划分结果

2.3　面积频率、精度分析

对湖北省 5 806 条小流域,按照面积<10 km^2,10～20 km^2,20～30 km^2,30～40 km^2,40～50 km^2,>50 km^2 进行统计(表 3)。由表 3 可知,①面积小于 10 km^2 的有 215 条,占总数量的 3.7%;面积在 10～20 km^2 的有 761 条,占总数量的 13.12%;面积在 20～30 km^2 的有 1 313 条,占总数量的 22.61%;面积在 30～40 的有 2 041 条,占总数量的 35.15%;面积在 40～50 km^2 的有 1 392 条,占总数量的 23.97%;面积大于 50 km^2 的有 84 条,占总数量的 1.45%,主要是大型江河、湖泊和水库区;②总体上,面积分布在 30～50 km^2 区间的较多,将近 60%;③面积在 30～50 km^2 区间的提取精度较高,达到

96%，主要分布在山区；④面积小于20 km² 提取精度较低，约93%，分布在平原区较密集；⑤总体上，山区小流域提取的精度高于平原区，整体精度达到95%。

表3 湖北省小流域面积统计

面积 S/km²	<10	10～20	20～30	30～40	40～50	>50	合计
数量/条	215	761	1 313	2 041	1 392	84	5 806
比例/%	3.7	13.12	22.61	35.15	23.97	1.45	100
精度/%	92	93	94	96	95	93	95

2.4 河流密度分析

按照《小流域划分及编码规范(SL653-2013)》对小流域的河网密度进行计算，并按面积<10 km²，10～20 km²，20～30 km²，30～40 km²，40～50 km²，>50 km² 进行平均河网密度统计(表4)：①小流域面积小于10 km² 的平均河网密度是1.14 km/km²，面积在10～20 km² 的平均河网密度是0.44 km/km²，面积在20～30 km² 的平均河网密度是0.3 km/km²，面积在30～40 km² 的平均河网密度是0.24 km/km²，面积在40～50 km² 的平均河网密度是0.19 km/km²，面积在50 km² 的平均河网密度是0.16 km/km²；②总体上，随着小流域面积的增大，平均河网密度呈减小趋势(表4)；③面积小于20 km² 的小流域平均河网密度较大，因其主要集中在平原区，水系较发达；④面积在30～50 km² 的小流域平均河网密度较小，主要分布在山区，山区河流水系较少；⑤总体上，平原区小流域的平均河网密度大于山区。

表4 小流域平均河网密度统计

面积 S/km²	<10	10～20	20～30	30～40	40～50	>50
平均河网密度/(km·km^{-2})	1.14	0.44	0.3	0.24	0.19	0.16

3 结论

(1) 适宜的集流阈值的选取是个反复试验的过程，需经过统计、综合分析来确定。

(2) 计算机自动划分的平原区小流域精度较低，且提取的沟道密集，需用高精度水系替代常规沟道辅助，进行人机交互修正来提高精度。

(3) 平原区小流域划分将是后期我们需进一步研究的问题，后期将综合考虑人工沟渠(非自然沟渠)、城市地下管线等因素，以提高平原区小流域的划分精度。本文首次实现了复杂地形区小流域划分，同时为湖北省生态清洁小流域建设和规划提供了基础数据。

[参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国水利部. SL653－2013 小流域划分及编码规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.

[2] 姜德文. 贯彻十九大精神推进新时代水土保持发展[J]. 中国水土保持，2018(1)：1-5.

[3] 姜德文. 从三个方面加强城市水土保持生态文明建设[J]. 中国水利，2017(21)：29-29.

[4] 汤国安，刘学军，闾国年，等. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京：科学出版社，2005.

[5] 李建松. 地理信息系统原理[M]. 湖北 武汉：武汉大学出版社，2006.

[6] 汤国安，杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[J]. 2 版. 北京：科学出版社，2012.

[7] 杨恺. Global Mapper 软件在地表复杂地区物探生产中的应用[J]. 软件导刊，2011，10(9)：106-108.

[8] Erturk A L I, Gurel M, Baloch M A, et al. Application of watershed modeling system(WMS) for integrated management of a watershed in Turkey[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, 2006, 41(9): 2045-2056.

[9] 吴信才. MAPGIS 地理信息系统[M]. 北京：电子工业出版社，2005.

[10] Christensen N S, Wood A W, Voisin N, et al. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin[J]. Climatic Change, 2004, 62(1/3): 337-363.

[11] 赵健，贾忠华，罗纨. ARCGIS 环境下基于 DEM 的流域特征提取[J]. 水资源与水工程学报，2006，17(1)：74-76.

[12] 陈智虎，杨广斌，杨春艳，等. 典型喀斯特地貌类型区小流域划分：以贵州省金沙县为例[J]. 中国岩溶，2016，35(3)：262-268.

[13] 朱秀迪，王志刚，任斐鹏，等. 西南岩溶区小流域划分与水文特征分析[J]. 中国水土保持，2017(2)：25-27.

[14] 朱战强，刘黎明，张军连. 退耕还林对宁南黄土丘陵区景观格局的影响[J]. 生态学报，2010，30(1)：146-154.

[15] 李仁东，程学军，隋晓丽. 江汉平原土地利用的时空变化及其驱动因素分析[J]. 地理研究，2003，22(4)：423-431.