

均值变点及分叉比确定最佳汇流阈值的对比

梁倍瑜,徐亚莉,白雷超,罗明良,赵文启
(西华师范大学国土资源学院,四川南充 637009)

摘要: DEM为水文分析提供了更加多样化的研究分析途径。研究以ASTER GDEM为数据源,利用均值变点和水道分叉比综合对比分析不同区域的水文特征和流域地貌特征,对比不同区域在最佳阈值提取的河网差异及彼此间流域河道分叉比的特征。试验结果表明:清溪河样区和杏子河样区的最佳汇流阈值分别为1500和1300,其所对应的河网密度分别为0.63和0.68;不同的流域内取相同的汇流阈值时河道的分叉能力相同或相近,但河道的数目上有较大的区别。这两者的结合可以在今后的地形分析中提供必要的理论依据。

关键词: 河道分叉比;均值变点;DEM;阈值;杏子河样区;清溪河样区

中图分类号:P542

文献标志码:A

论文编号:casb17020096

Comparison of the Determination of Optimal Convergence Threshold Based on Mean Change-point and Bifurcation Ratio

Liang Beiyu, Xu Yali, Bai Leichao, Luo Mingliang, Zhao Wenqi

(Land and Resource School, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637009)

Abstract: Digital Elevation Model provides more diversified techniques for the hydrological analysis. The authors made use of mean change-point and bifurcation ratio to synthetically analyze hydrological characteristics and geomorphic features in different areas, meanwhile, compared the difference of river network extraction through the optimal threshold and the characteristics of bifurcation ratio based on ASTER GDEM. The results indicated that the optimal convergence threshold of Qingxi river area and Xingzi river area was 1500 and 1300, respectively, the drainage density was 0.63 and 0.68, respectively; the ability of branch of river through the identical convergence threshold in different basin was the same or similar, but the number of the channel had great difference. The combination of the two factors may provide a theoretical basis for the future research.

Key words: bifurcation ratio; mean change-point; DEM; threshold; Xingzi river area; Qingxi river area

0 引言

随着信息时代的到来,计算机技术发展越来越快,促使数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)在各学科中得到广泛应用,尤其是地学研究中的兼收并采^[1-2]。DEM作为水文分析的基础数据已有较成熟的

算法^[3],其可以反映各种尺度、分辨率的地形地貌^[4],在预防水文地质灾害和救援及评估灾害情况中越发重要,在土地规划和利用中也被广泛运用^[1]。

地面上每条河流的集水区统称为其流域^[5]。地表径流构成众多河网形成河流的集水区,河网是反映河

基金项目:国家自然科学基金项目“基于DEM的黄土高原流域侵蚀基准体系研究”(41101348);西华师范大学基本科研业务费专项资金资助项目“黄土地貌鞍部下切效应研究”(15C002);绵阳师范学院四川省生态安全与保护重点实验室“干热河谷生态退化区冲沟侵蚀模拟的不确定性研究”(ESP1606)。

第一作者简介:梁倍瑜,女,1991年出生,四川泸州人,硕士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。通信地址:637009四川省南充市顺庆区师大路一段西华师范大学新区二期西华师范大学国土资源学院,E-mail:1447840470@qq.com。

通讯作者:罗明良,男,1978年出生,河南信阳人,教授,硕士生导师,博士后,主要从事GIS空间分析及DEM数字地形分析研究。通信地址:637009四川省南充市顺庆区师大路一段西华师范大学新区二期西华师范大学国土资源学院,E-mail:lolean586@163.com。

收稿日期:2017-02-23,修回日期:2017-04-28。

流域地形特征的重要媒介^[6],对径流节点的研究也成为流域水文学研究的重要内容。径流节点是河流等级的过渡点,所以河道分叉比(Bifurcation ratio, Rb)也成为研究流域地貌的重要参数^[7-8]。在研究流域水文特征时,均值变点同样被用来指示流域地貌特征分析的一个重要参数^[9]。

当前,水文学、地貌学和数字高程模型已有机结合,利用 ArcGIS 平台和 DEM 构建水文分析模型来分析河流、地貌的演化成为一种潮流。前人对这个问题的研究取得众多成果,体现以下几个方面:对中国数字高程模型与数字地形分析研究进展做了全面的总结和分析^[1];对地形形态要素通过空间格局分析揭示地表构造和河流的区域构造特征^[10];利用 DEM 提取三峡库区河网,通过计算确定变点从而提取最佳河网^[11];基于变点原理研究了广东省河川年径流量的特征^[12];对平原河网地区城市中心区河流水系变化特征进行研究^[13]等。

以上研究是从某单一的参数来分析和研究流域水文和地貌特征,本研究借鉴前人的研究方法,基于 ArcGIS 平台和 DEM 数据,利用均值变点和水道分叉比来综合对比分析两个小流域的水文特征和流域地貌特征,以期对水文分析提供一定的借鉴。

1 研究区概括

1.1 杏子河流域

杏子河是延河的一级支流,其发源于黄土高原白云山的南坡,自西北向东南流经靖边、志丹和安塞三县,全长 106 km,流域面积 1486 km²^[14]。杏子河地貌属黄土高原丘陵地貌,沟壑纵横,地形起伏大,属于典型的水土流失区^[15]。该地区气候以温带大陆性季风气候为主,降水分配不均,雨季集中于每年的 7、8 月^[14]。

1.2 清溪河流域

清溪河发源于四川省川东平行岭谷区高登山东北

的八卦沱,属亚热带湿润性季风气候,夏热冬温、四季分明、雨量丰沛,年降水量为 1000~1100 mm。清溪河蜿蜒曲折,属长江水系,全长 36 km,水力资源丰富。该流域地处川东平行岭谷区,河谷迂回于向斜地区,河流水浅而多裂点,普遍发育深切曲流,河流两侧汇入短小的横向河且多为自然跌水,流域水系呈现格子状形态^[16-17]。

本研究所用两个样区裁剪于杏子河流域和清溪河流域(图 1)。

2 材料与方法

2.1 ASTER GDEM 概述

先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM)是美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的最新地球电子地形数据,该数据是根据 NASA 新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作而成的。其空间分辨率为 1 弧度秒(约 30 m),垂直精度 20 m,水平精度 30 m^[9]。

本研究借助于 ArcGIS 9.3 工作平台对基础数据 ASTER GDEM 进行预先处理,包括格式转换、投影转换以及流域裁剪等。在处理提取所得的数据时采用统计分析软件 Excel 2010。

2.2 分析方法

2.2.1 均值变点方法 均值变点法是以统计学的原理来判断和检验变点的存在并确定一个或多个变点,目的是通过分析来确定曲线由陡变缓的最优点^[9,18]。

在研究流域水系变化特点的关键问题是确定汇流阈值。由于阈值的大小的不同,导致流域水系的形状也随之改变,并且随阈值的变化水系汇流与阈值呈逻辑斯蒂曲线。均值变点分析法的目标是处理沟谷流域

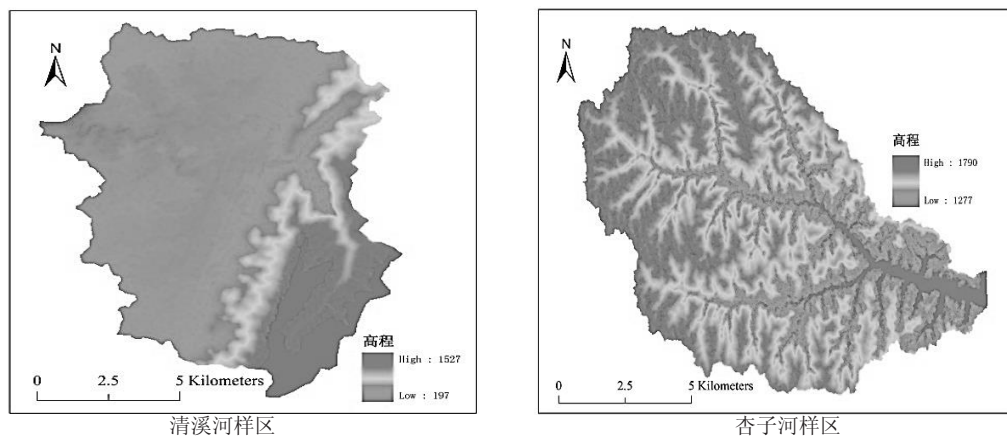


图 1 试验样区

水系长度随汇流阈值变化的曲线变化的最优值,而且点是唯一的。前人研究表明均值变点法的演算结果具有较高的精确性与合理性,在提取水系的过程中所取的阈值也合理^[9]。

均值变点分析法是一种数理统计学上的对非线性数据进行处理的方法,其计算步骤如下^[19-20]。

(1)令 $i=2, \dots, N$, 对每个 i 将样本分为两段: X_1, X_2, \dots, X_{i-1} 和 X_i, X_{i+1}, \dots, X_N 。计算每段样本的算术平均值 \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 及统计量 S_i , 如(1)所示。

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (X_t - \bar{X}_1)^2 + \sum_{t=i}^N (X_t - \bar{X}_2)^2 \dots\dots\dots (1)$$

(2)计算统计量,如式(2)~(3)。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{t=1}^N X_t}{N} \dots\dots\dots (2)$$

$$S = \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2 \dots\dots\dots (3)$$

(3)计算期望值 $E(S-S_i)$, $i=2, 3, \dots, N$; 其中 S 为原始样本的统计量, S_i 为样本分段后的统计量。公式如(4)所示。

$$E(S-S_i) = E \frac{(i-1) \times (N-i+1) \times (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2}{N} \dots\dots\dots (4)$$

2.2.2 河流分叉比 河流分叉比(Bifurcation ratio)首先由美国学者 Horton 提出和定义,他认为相邻两级水道的之比即为河道分叉比^[7]。可以表示为式(5)。

$$R_b = \frac{n_x}{n_{x+1}} \dots\dots\dots (5)$$

式中: R_b 为分叉比; n_x 为第 x 级水道的数目 ($x=1, 2, 3, \dots, m$); n_{x+1} 为第 $x+1$ 级水道的数目。但是按 Horton 的分法第一级水道不一定全部汇入第二级河道,有可能汇入三级、四级河道^[21]。

Strahler 定义从河源出发的河道为一级河道;同级的两条河道组成二级河道,以此类推形成一个流域水系^[22]。同时 Strahler 主张河道的平均分叉比是用将相邻两级水道分叉比与相邻两级水道总数的乘积作为累积总量除相邻两级水道总数的累积总量^[21]。根据 Strahler 的观点得出河道的平均分叉比公式表示如(6)所示。

$$\bar{R}_b = \frac{\sum_{i=1}^n M_n}{\sum_{i=1}^n N_n} \dots\dots\dots (6)$$

式中 $M_n = N_n \times R_{bi}$; M_n 表示相邻两级河道数与两级河道分叉比的乘积总和 ($n=1, 2, 3, \dots, m$); R_{bi} 表示相邻河道的分叉比 ($i=1, 2, 3, \dots, m$); N_n 表示相邻河道的数量 ($n=1, 2, 3, \dots, m$); 以上当 $n=1, i=1$ 时表示一级河道和二级河道的和,以此类推。

3 结果与分析

3.1 河网阈值的确定及均值变点分析

首先,经过多次试验当汇流阈值取 50000 时两个

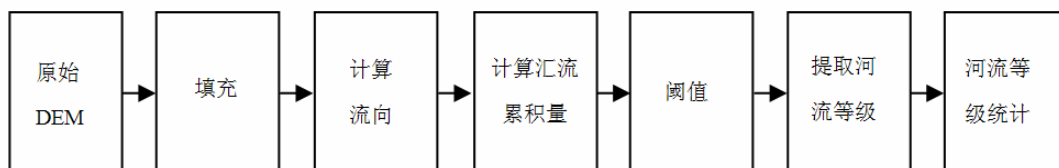


图2 流域水系提取流程图

表1 清溪河样区不同阈值分叉比

阈值	级别				相邻两级河道的分叉比(R_b)			相邻河道总数(N_n)	两级河道数与两级河道分叉比的乘积(M_n)	平均分叉比(R_b)
	I	II	III	IV	R_{b1}	R_{b2}	R_{b3}			
1000	40	22	12	5	1.82	1.83	2.40	113	215.86	1.91
1100	38	20	12	5	1.90	1.67	2.40	107	204.33	1.91
1200	34	17	11	5	2.00	1.55	2.20	95	180.47	1.90
1300	30	15	9	5	2.00	1.67	1.80	83	155.20	1.87
1400	28	13	9	5	2.15	1.44	1.80	77	145.29	1.89
1500	24	10	9	4	2.40	1.11	2.25	66	131.96	2.00
1600	23	11	9	2	2.09	1.22	4.50	65	145.04	2.23
1700	19	8	9	1	2.38	0.89	9.00	54	169.24	3.13
1800	18	7	9	1	2.57	0.78	9.00	51	166.73	3.27

续表 1

阈值	级别				相邻两级河道的分叉比(R_b)			相邻河道 总数(N_n)	两级河道数与两级河道 分叉比的乘积(M_n)	平均分 叉比(R_s)
	I	II	III	IV	R_{b1}	R_{b2}	R_{b3}			
1900	18	7	9	1	2.57	0.78	9.00	51	166.73	3.27
2000	17	6	9	1	2.83	0.67	9.00	48	165.17	3.44
2100	16	9	5	1	1.78	1.80	5.00	45	99.64	2.21
2200	15	8	5	1	1.88	1.60	5.00	42	93.93	2.24
2300	15	8	5	1	1.88	1.60	5.00	42	93.93	2.24
2400	15	8	5	1	1.88	1.60	5.00	42	93.93	2.24
2500	15	8	5	1	1.88	1.60	5.00	42	93.93	2.24
2600	15	8	5	1	1.88	1.60	5.00	42	93.93	2.24
2700	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
2800	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
2900	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
3000	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
3100	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
3200	14	8	4	1	1.75	2.00	4.00	39	82.50	2.12
3300	12	6	4	1	2.00	1.50	4.00	33	71.00	2.15
3400	12	6	4	1	2.00	1.50	4.00	33	71.00	2.15
3500	12	6	4	1	2.00	1.50	4.00	33	71.00	2.15
3600	12	6	4	1	2.00	1.50	4.00	33	71.00	2.15
3700	12	6	4	1	2.00	1.50	4.00	33	71.00	2.15

表 2 杏子河样区不同阈值分叉比

阈值	级别				相邻两级河道的分叉比(R_b)			相邻河道 总数(N_n)	两级河道数与两级河道 分叉比的乘积(M_n)	平均分 叉比(R_s)
	I	II	III	IV	R_{b1}	R_{b2}	R_{b3}			
1000	50	24	19	6	2.08	1.26	3.17	142	287.65	2.03
1100	49	24	18	6	2.04	1.33	3.00	139	277.04	1.99
1200	43	25	12	5	1.72	2.08	2.40	122	234.84	1.92
1300	41	23	12	5	1.78	1.92	2.40	116	221.97	1.91
1400	41	23	12	5	1.78	1.92	2.40	116	221.97	1.91
1500	39	22	11	5	1.77	2.00	2.20	110	209.34	1.90
1600	35	20	10	5	1.75	2.00	2.00	100	186.25	1.86
1700	32	17	10	4	1.88	1.70	2.50	90	173.14	1.92
1800	30	16	9	4	1.88	1.78	2.25	84	159.94	1.90
1900	30	16	9	4	1.88	1.78	2.25	84	159.94	1.90
2000	27	13	9	4	2.08	1.44	2.25	75	144.10	1.92
2100	28	14	9	4	2.00	1.56	2.25	78	149.03	1.91
2200	24	12	7	4	2.00	1.71	1.75	66	123.82	1.88
2300	24	12	7	4	2.00	1.71	1.75	66	123.82	1.88
2400	24	12	7	4	2.00	1.71	1.75	66	123.82	1.88
2500	24	12	7	4	2.00	1.71	1.75	66	123.82	1.88
2600	23	11	7	4	2.09	1.57	1.75	63	118.63	1.88

续表 2

阈值	级别				相邻两级河道的分叉比(R_{bi})			相邻河道总数(N_n)	两级河道数与两级河道分叉比的乘积(M_n)	平均分叉比(R_s)
	I	II	III	IV	R_{b1}	R_{b2}	R_{b3}			
2700	21	10	6	4	2.10	1.67	1.50	57	106.77	1.87
2800	19	8	6	4	2.38	1.33	1.50	51	97.79	1.92
2900	19	8	6	4	2.38	1.33	1.50	51	97.79	1.92

研究区的流域范围最完整,即从两个地区大范围的DEM图中确定研究样区;其次,通过求得的集水区裁剪出所需要的实验样区。最后,运用图2的方法对两个小流域进行水文分析,并获取所需的数据见表1和表2。

本研究利用均值变点法对数据进行分析时,经实验河网提取的阈值取1000、1100、...、3800。从图3(a)清溪河样区 S 和 S_i 值的拟合曲线可以看出清溪河样区的变异点为第4个点,再结合文献[4]的研究成果可知清溪河样区的最佳阈值是1300,此时提取的水系是理想状态,见图4(a)。由图3(b)杏子河样区 S 和 S_i 值的拟合曲线,可知杏子河样区的变

异点为第六个点,因此杏子河样区水系提取的最佳汇流阈值为1500,见图4(b)。

两个样区均为丘陵地形,经过试验分析,清溪河和杏子河两个样区在取最佳汇流阈值时的河网密度分别为0.63和0.68,可以看出在河网密度上两个地区有一定的相似性。前人研究发现影响和控制河网密度的因素最重要的是岩性;其次是地表的渗透能力^[21];最后是植被的覆盖率,同时地形和降水量也是重要的因子^[23]。

3.2 河道分叉比的特征

根据Strahler的理论,河道分叉比是研究水系结构的一个十分重要的尺度^[21]。由于水系形态的发育受区域地质构造、地貌、气候、环境等影响,但不同区域的河

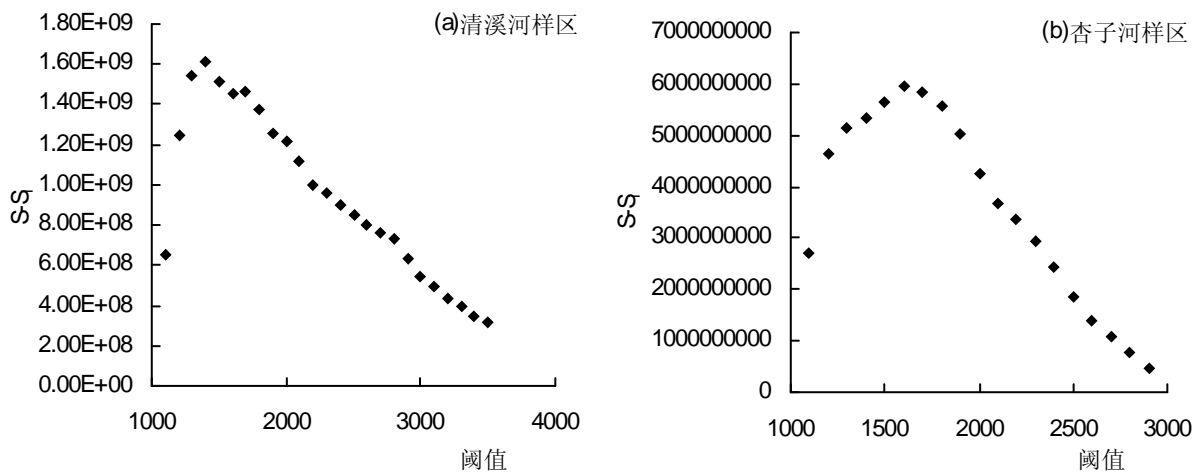


图3 S 和 S_i 插值曲线

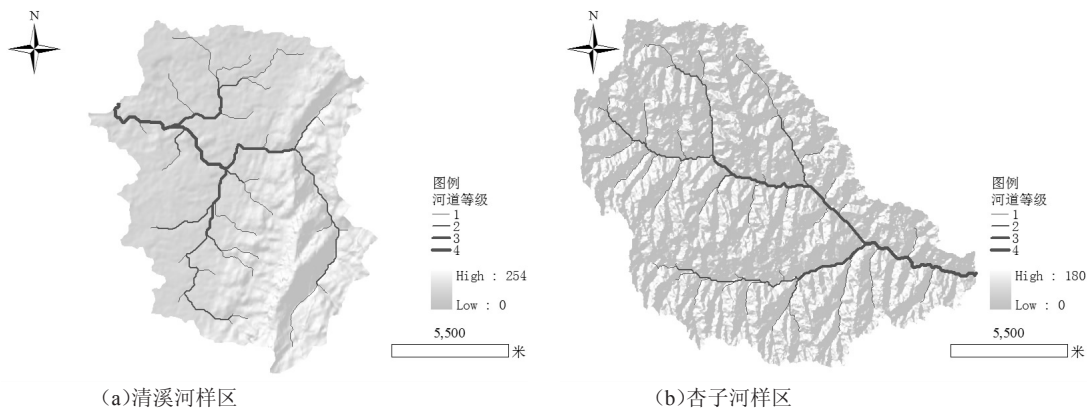


图4 提取的河网图

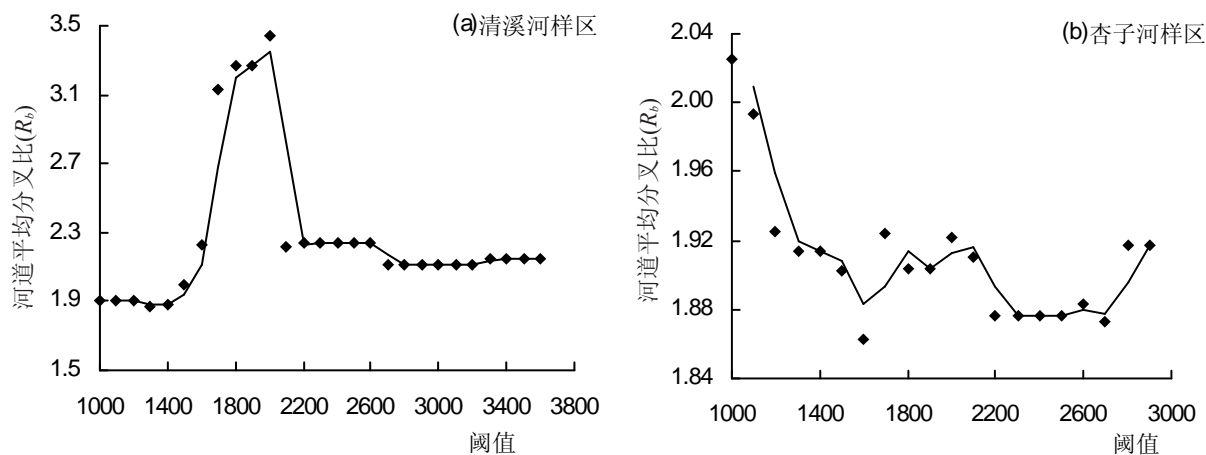


图5 河道分叉比

道分叉比变化是小范围的^[21]。依据文献的理论,本研究对黄土高原地区的杏子河样区和华蓥山地区清溪河样区进行对比并分析两个流域的平均分叉比。分析河道分叉比表1和图5(a)杏子河样区汇流阈值为2200时水道平均分叉比趋于稳定,平均分叉比为1.88。从表2和图5(b)可以看出清溪河样区汇流阈值取2200时河道平均分叉比变化稳定,平均分叉比为2.24。

根据Horton的理论,河道的分叉比由于自然条件的不同而呈现出其独特性。在平坦地区或丘陵区的流域,分枝比接近常数2;河道分叉比为3~4的地形多为山地或强烈起伏的流域。这与图5(b)得出的结果相印证。由于杏子河样区地处黄土高原,流域内相对高差200~300 m,梁峁起伏,沟谷纵横,地形破碎^[24],所以相比于清溪河样区,杏子河样区的平均分叉比更加不稳定。

4 结论与讨论

本研究主要利用均值变点和河道分叉比两种方法,对清溪河样区和杏子河样区的DEM数据进行分析,可以得出以下结论。

(1)利用均值变点法确定最佳汇流阈值并提取不同流域的水系时,两个样区具有一定相似性,且实验结果在理论上满足要求,但在确定最佳阈值也有差异性,清溪河样区的最佳汇流阈值是1500,杏子河样区的最佳汇流阈值是1300。经计算在最佳阈值时清溪河样区河网密度为0.63,杏子河样区河网密度是0.68,两个流域的河网密度差异较小。

(2)在相同的地形地貌区,不同的流域内取相同的汇流阈值时河道的分叉能力相同或相近,但河道的数目上有较大的区别。同等级的河道清溪河样区的河道数整体上比杏子河样区的河道数少。

本研究主要分析两个不同地区流域最佳汇流阈值的确定及其与河道分叉比的关联性。对于两个不同流域河网形态没有进一步探讨和分析。在今后的研究中可以进一步分析对比在取相同汇流阈值时,不同流域的河网形态变化维数是否具有了一定的联系,在相同等级时河道数量上有什么变化等。

参考文献

- [1] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1305-1325.
- [2] 杨昕,汤国安,刘学军,等.数字地形分析的理论、方法与应用[J].地理学报,2009,64(9):1058-1070.
- [3] 孙庆艳,余新晓,胡淑萍,等.基于ArcGIS环境下DEM流域特征提取及应用[J].北京林业大学学报,2008,30(S2):144-147.
- [4] 王峥,Nguyen T T,马孝义,等.基于SRTM_DEM的泾河流域特征信息提取研究[J].中国农村水利水电,2011(11):32-36.
- [5] 伍光和王,王乃昂,胡双熙,等.自然地理学[M].北京:高等教育出版社,2008:202-222.
- [6] 易红伟,汤国安,刘咏梅,等.河网径流节点及其基于DEM的自动提取[J].水土保持学报,2003,17(3):108-111,132.
- [7] Horton R E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins, Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology[J]. Geol Soc America Bull,1945,56(2):275-370.
- [8] Strahler A N. hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J].geological Society of America Bulletin,1952,63:1117-1142.
- [9] 解博,罗明良,杨俊志,等.基于ASTER-GDEM的川中丘陵区水系提取与分析[J].测绘科学,2014,39(3):66-69.
- [10] 罗明良,汤国安,刘学军.地形形态要素研究综述[M].中国地理学会2007年学术年会.中国江苏南京.2007:321.
- [11] 赖晗,芮小平,梁汉东,等.基于均值变点分析的三峡库区河网提取研究[J].测绘科学,2012,37(5):173-175.
- [12] 涂新军,陈晓宏.基于变点识别的区域河川径流量特征值变异研究[J].自然资源学报,2010,25(11):1930-1937.

- [13] 杨明楠,许有鹏,邓晓军,等.平原河网地区城市中心区河流水系变化特征[J].水土保持通报,2014,34(5):263-266.
- [14] 邱临静,郑粉莉,Yin R S.DEM栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J].生态学报,2012,32(12):3754-3763.
- [15] 李秀霞,李天宏.黄河流域泥沙输移比与流域尺度的关系研究[J].泥沙研究,2011(2):33-37.
- [16] 四川省华蓥市人民政府.华蓥市自然环境[EB/OL].<http://www.hys.gov.cn>. 2015.
- [17] 穆桂春,陈升琪,郭玉清,等.四川省地貌区划[M].四川省农业区划办公室,四川省地貌区划研究组,1982.
- [18] 李朝奎,徐望国,邹峥嵘.均值变点分析理论及其在桥梁健康监测中的应用[J].中国公路学报,2001,14(4):53-55.
- [19] 韩海辉,高婷,易欢,等.基于变点分析法提取地势起伏度—以青藏高原为例[J].地理科学,2012,32(1):101-104.
- [20] 白雷超,陈珂,罗明良,等.地表高程剖面特征及其在起伏度分析中的应用——以平行岭谷区华蓥市为例[J].遥感信息,2016,31(4):141-146.
- [21] 承继成,江美球.流域地貌数学模型[M].北京:科学出版社,1986.
- [22] 余新晓,秦富仓.流域侵蚀动力学[M].北京:科学出版社,2007:41-53.
- [23] 刘怀湘,王兆印.典型河网形态特征与分布[J].水利学报,2007,38(11):1354-1357.
- [24] 陈永宗,景可,蔡强国,等.杏子河流域的侵蚀地貌[J].水土保持通报,1984,34(5):6-9.