

文章编号:1009-3087(2014)06-0049-07

基于临界支撑流量的西藏典型河流源头位置确定及河网解析研究

沙玉坤^{1,2},程根伟^{1*},李卫朋^{1,2},范继辉¹

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室,四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:河源作为河流形成环境的重要标志,需要一个简单且客观有效的判定方法。提出一种基于临界支撑流量(CSD)的河源集水面积计算模型,并且建立最小集水面积CSA和CSD的关系。利用该模型在西藏的2个流域(拉萨河的堆龙曲、尼洋河白水曲)进行对比研究,结果表明,堆龙曲的临界支撑流量(Q_c)为 $0.0028\text{ m}^3/\text{s}$,而白水曲为 $0.0085\text{ m}^3/\text{s}$ 。另外,临界支撑流量可随水文气候条件而变化,湿润地区(白水曲)的临界支撑流量 Q_c 要比半干旱地区(堆龙曲)的大。所提出的临界支撑流量(CSD)概念和模型方法可以用于在复杂的地理区域确定河源的水文学指标,它也可以反映出不同地区水文气候变化对河流补给的影响。

关键词:河网提取;临界支撑流量;水文气候条件;河流源头

中图分类号:P343

文献标志码:A

Determination of a Riverhead Based on Critical Support Discharge and River Network Analysis

SHA Yukun^{1,2}, CHENG Genwei^{1*}, LI Weipeng^{1,2}, FAN Jihui¹

(1. Key Lab. of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Inst. of Mountain Hazard and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new model referring to the relation of CSA and CSD was proposed, which was based on the physical mechanism for the origin of river heads. The feasibility of the model was verified by using two watersheds of Duilongqu basin of Lhasa River and Beishuiqu basin of Niyang River in Tibet to calculate the CSA and extract river networks. The comparison results of river networks derived from DEM with real ones indicated that the critical support discharge Q_c are $(0.0028 \pm 0.001)\text{ m}^3/\text{s}$ in Duilongqu and $(0.0085 \pm 0.001)\text{ m}^3/\text{s}$ in Beishuiqu, respectively. The CSD can vary with hydro-climate conditions. It was higher in humid region and lower in arid region. Using this method, the optimal critical support discharge Q_c of $0.0085\text{ m}^3/\text{s}$ in Beishuiqu basin (humid region) was greater than $0.0028\text{ m}^3/\text{s}$ for Duilongqu (semi-arid region). The suggested method provided a new application approach that could be used to determine CSD (Q_c) in complex geographical regions, and the effect of hydro-climate change could be reflected.

Key words: river network extraction; critical support discharge; hydro-climate conditions; riverhead

水文分析计算及河网结构解析中都涉及到河流的源头确定,它是长流水河道与季节性沟槽的分界点,但是河源位置的判定比较困难,过去通常用该位置以上的集水面积作为判别标准,称为临界支撑面积CSA,关于临界支撑面积的选择比较复杂,已经有较多的研究^[1-3]。作者研究了河流源头的基本条件,提出河源的主要特征是具有一定的维持流量,因

此定义临界支撑流量(critical support discharge, CSD)为形成河流源头所需的最小稳定流量,可以用CSD作为判定河流源头的流量变化范围标准,根据区域内的水文气象因素(例如,年降雨、年蒸发或者最枯月流量等)来确定河流开始的位置。

目前对于临界支撑流量CSD还很少有相关的研究,但是有一些生态环境领域的相似概念(如最

收稿日期:2014-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31070405);中国科学院知识创新项目资助(KZCX2-XB3-08)

作者简介:沙玉坤(1986—),男,博士生.研究方向:水文模型. E-mail:sharpon@163.com

*通信联系人 E-mail:gwcheng@imde.ac.cn

枯月流量、最小生态需水量等)已经有很多的论述^[4]。最枯月流量是一年内的月平均流量的最小值(枯水期流量)。Tennant^[5-6]在1964—1974年在美国3个州11条河流做了广泛而细致的试验,认为年均流量的10%和30%可以作为维持河流健康生态环境的标准。Fraser^[7]则通过指定月最小流量占月平均流量的百分比的方式,将Tennant方法与季节变化相结合。在20世纪70年代初期,研究河流污染的美国机构,采用90%保证率最小连续7d的平均水量作为河流最小流量设计值,也就是常称的7Q10法^[8]。在20世纪70年代中期,在宾夕法尼亚州的研究显示提供最小枯水流量的集水面积要大于等于1.3 km²,并且建议0.01 m³·s⁻¹·km⁻²为最小枯水流量,但是它作为一个单一值标准并没有考虑流域面积,集水面积以及不同研究区水文气候条件下自然流量的产出。基于水文学参数的7Q10法是河流维持低水平的流量,计算的最小流量一般比其他方法计算出的流量要小,而任何更大的流量都被认为是可以接受的^[9]。以上的这些方法,都是从河流生态需水的角度考虑一个河段的最低流量,是在历史水文数据资料的基础上对满足环境和生态需要的最小流量进行的考虑^[10]。

虽然关于河流的最小流量(low flow)的研究很多,但是关于临界支撑流量CSD的研究却鲜有被涉及。临界支撑流量(CSD)是一个与河源区集水面积阈值(又叫临界支撑面积,CSA)有关的概念^[11],集水面积阈值可以认为是形成河流源头稳定流量的最小流域面积^[12-13]。在DEM中,具有集水面积阈值的栅格常常被认为是河流发源地^[14-15]。CSD与最小流量(low-flow)相似,都是一个变化的流量范围,并且应该在最小流量low-flow的之上。在评估CSD的范围时,也许还要考虑生态因素对流量范围的影响,但是在基于生态信息上设定目标流量是一个困难的过程,Richter等^[16]建议以指标的平均值加减一个标准差(standard deviation, SD)作为流量的变化范围。因此,将在河流源头临界支撑流量 Q_c 基础上 $\pm 1Q_{SD}$ 作为 Q_c 的最大和最小阈值,则 Q_c 的范围为:

$$Q_c - Q_{SD} \leq Q_c \leq Q_c + Q_{SD}。$$

为此,作者提出一种计算并确定 Q_c 的新方法,并利用观测数据对西藏中东部2个流域进行了分析检验。这种方法在充分考虑气候和水文要素的前提下,利用水量平衡原理推演建模,并结合已有的集水面积阈值与河网密度关系来确定 Q_c 的流量范围,为客观可靠地判定河流源头位置提供了一种有效的途径。

1 研究方法 with 区域

1.1 研究方法

形成河流的基本条件是在天然沟槽中,常年有流水不断,至少一年的绝大部分时间都有径流存在,否则不能叫河流。河流流量从下游到上游逐渐减小,如果河流流量减小到某一特定的临界值时,河流沟槽内不再被可持续水体所覆盖,即河流不能保持稳定流量,那么从这往上的径流不足以支持以形成河流,这一特殊的临界点被认为是河流源头。

临界支撑流量(CSD)就是定义为形成河流源头的临界稳定流量值,在西藏地区它常常在0.001 ~ 0.010 m³/s之间范围内变化,它也被作为辨识河流源头的流量标准 Q_c ^[17-18,12]。河流的流量随季节变化显著,考虑到流量的季节变化特性,临界支撑流量 Q_c 常与最枯一个月中的径流量 $Q_{\min}$ (low-flow)相比较。只有 $Q_c \geq Q_{\min}$ 的情况下,该沟槽可以被认为是河流,否则应该被认为是沟道或干沟。

$Q_{\min}$ 是一条河流的最枯月平均流量,它常常在枯水期的最后1个月中出现(西藏的3月份^[19])。 $Q_{\min}$ 被认为与年平均流量 Q_a 有一个比例关系 $Q_{\min} = C_0 \times Q_a$,对于中国西南地区的河流来说, C_0 为0.15 ~ 0.20之间变化的常数。

河流的年平均流量 Q_a 是由当地的水文气象条件决定的。水文气象条件决定一个流域的年径流量 W_a :

$$Q_a = W_a / T_a = F \cdot (P - E) / T_a \quad (1)$$

其中, F 、 P 、 E 、 T_a 为该流域的集水面积、年降水量、年蒸发和1年的时间长度。由此可得流域集水面积:

$$F = Q_a \cdot T_a / (P - E) \quad \text{或} \\ F = Q_{\min} \cdot T_a / C_0 \cdot (P - E) \quad (2)$$

式中, F 就是对应于最小流量的集水面积阈值,又叫临界支撑面积(CSA),它是满足支撑河源稳定流量的临界面积,因此当 $Q_{\min}$ 被临界支撑流量 Q_c 取代时,可得临界流域支撑面积计算公式:

$$F_c = Q_c \cdot T_a / C_0 \cdot (P - E) \quad (3)$$

式中,流域蒸发 E 和降雨量 P 可以由研究区域的观测数据插值获得, T_a 为常数(365 × 86 400 s), Q_c 为标准临界支撑流量,它可由提取河网与实际河网的匹配程度最终确定。式(3)建立了集水面积阈值 F_c (CSA)与 Q_c 之间的联系。

由于在多数研究区域都缺少蒸发的观测数据,所以可采用蒸发公式计算流域年蒸发 E ,考虑到研究区域特殊地理环境以及测站的有限,作者推荐采用高桥公式^[20],利用研究区域的月气温和降水观

测数据来计算流域蒸散发:

$$E_m = 3\,100P_m/[3\,100 + 1.8P_m^2\exp(\frac{-34.4T_m}{235 + T_m})] \tag{4}$$

式中, E_m 、 P_m 和 T_m 分别为月陆面蒸发、月降雨量和月气温。

付菁、范广洲等^[21] 考虑到青藏高原存在冻土和融冰化雪的特殊现象,对高桥公式进行了改进,通过拉萨河流域的观测数据验证了改进后的高桥公式具有较高的精度,并论证了该公式在青藏高原的适用性。

在 GIS 的水文分析技术中,集水区阈值 CSA 常常被用来提取河网,它的大小对河网的疏密和河网形态有至关重要的影响^[22]。河网密度 ρ 为研究区域的河流总长度(L_r) 与流域面积(F_r) 的比值。河流越长,河流密度 ρ 越大。与提取河网的 DEM 尺度相匹配的地形图上显示的河流被作为研究区域的实际河网, ρ_e 为提取河网的河网密度, ρ_r 为实际河网的河网密度。提取河网与实际河网的相似性由河网密度指数 ρ_e/ρ_r 来判断。当河网密度指数 ρ_e/ρ_r 趋向于 1 时,可以认为提取河网与实际河网匹配度最高,这时用于提取河网的 F_e 与 Q_e 分别为该流域的集水面积阈值 CSA 和最佳临界支撑流量 Optimized-CSD,那么 Q_e 的下限阈值($Q_e - Q_{sd}$) 和上限阈值($Q_e + Q_{sd}$) 就可以确定了。

1.2 研究区域

以西藏拉萨河的堆龙曲和尼洋河的白水曲为研究区域(见图 1),拉萨河和尼洋河是雅鲁藏布江的重要支流,分别发源于念青唐古拉山脉南麓和米拉山西侧的错木梁拉。拉萨河河源地区为平坦湿地,海拔 5 200 m,汇入口海拔 3 580 m,总落差 1 620 m,是雅鲁藏布江流域面积最大的一条支流。尼洋河流向由西向东,在林芝县的则们附近汇入雅鲁藏布江,全长 307.5 km。由于拉萨河和尼洋河流域面积较大,地形、气候和水文条件较为复杂,作者分别选取拉萨河堆龙曲(靠近拉萨站)和尼洋河的白水曲作为研究区域。以分辨率为 90 m 的 DEM 为数据源进行流域河网提取的研究,并以 1:250 000 的地形图为河网提取的地理底图。

研究区域为拉萨河和尼洋河的子流域,可以分别代表半干旱地区和湿润地区的气候环境,这样可以比较在不同气候环境下的河网特征。受青藏高原地形地貌影响,研究区域降雨量由西南(700~800 mm)向东北(300~400 mm)逐渐降低^[23-24]。

作者以分辨率为 90 m 的 DEM 为数据源进行流

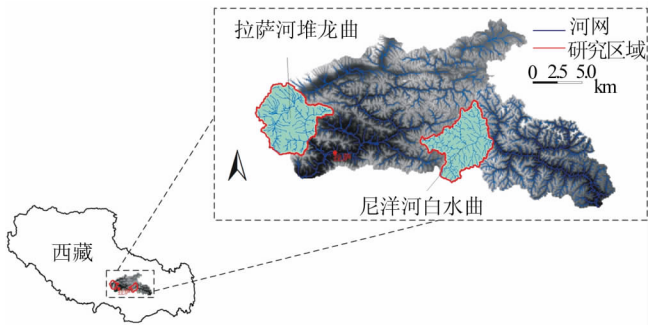


图 1 位于拉萨河和尼洋河范围内的研究区域
Fig.1 Study basins located in Lhasa River and Niyang River

域河网提取的研究,并以 1:250 000 的地形图为河网提取的地理底图。月平均气温和月降雨量数据由来自拉萨河流域和尼洋河流域及周边 10 个测站 1982 年—2002 年的数据(见图 1 和表 1),并用考虑高程的协同克里格法插值获得流域面数据。所有数据计算和空间分析操作均在 ArcGIS 10.0 环境下运行获得。

表 1 研究区域周边气象站的气候特征
Tab.1 Climate characteristics of surrounding meteorological stations of study areas

测站	高程/m	气温/℃	年降水量/mm
拉萨	3 649	8.2	446
当雄	4 200	1.6	482
嘉黎	4 488	-0.5	732
林芝	2 991	8.9	709
尼木	3 809	7.2	349
泽当	3 552	8.6	385
波密	2 736	8.8	742
那曲	4 507	-1.4	336
班戈	4 700	-1.1	253
江孜	4 040	4.9	288

2 结果与讨论

2.1 结果

基于研究区域的水文和气象观测数据(1982—2002 年)在 ArcGIS10.0 环境下插值获得堆龙曲和白水曲流域多年平均降雨量 P 分别为 457 和 720 mm,根据改进的高桥公式计算获得多年平均流域蒸散发 E 分别为 388 和 408 mm。根据拉萨河和尼洋河流域的水文记录,计算得到参数 $C_0 = 0.175$,利用计算式(3),选取不同的临界流量 Q_c (0.001~0.015 m³/s),计算获得不同的临界阈值 F_c 的值(表 2),在 ArcSWAT 软件平台中导入各个 F_c 来提取河网(图 2、3),与研究区域的蓝线河网图(1:250 000)进行比对(图 4),并通过计算河网密度和实际河网密度的比值 ρ_e/ρ_r (表 2),确定反映堆龙曲和白水曲流域的最佳临界支撑流量值 Q_e 。

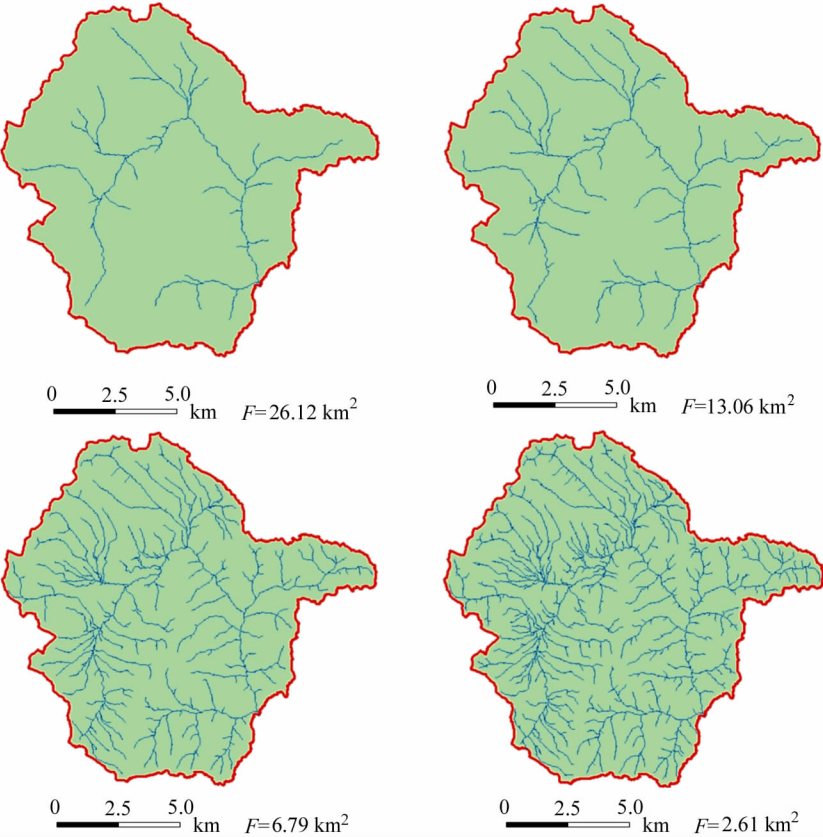


图 2 不同阈值条件下提取的堆龙曲河网

Fig. 2 River networks of Duilongqu basin extracted via different threshold values of support area

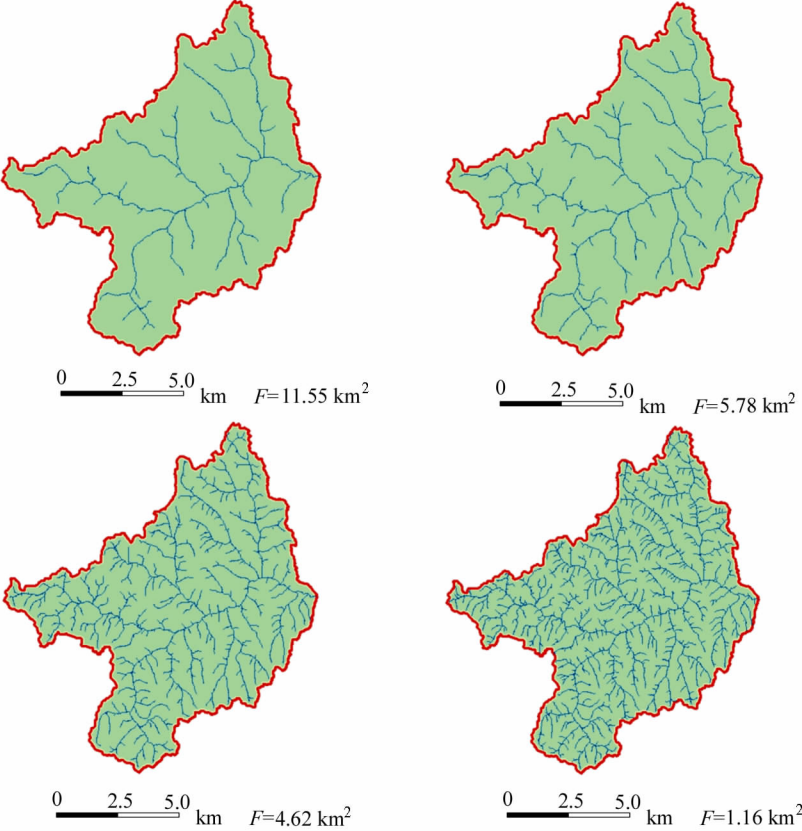


图 3 不同阈值条件下提取的白水曲河网

Fig. 3 River networks of Beishuiqu basin extracted via different threshold values of support area

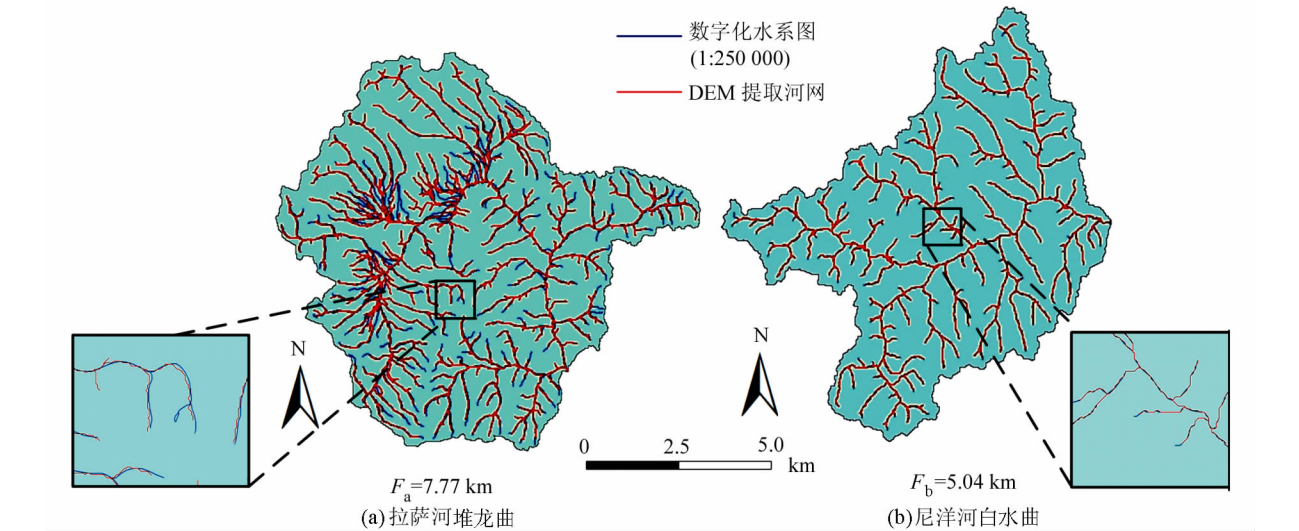


图 4 利用最佳 CSD 确定的提取河网与数字化水系图的比较

Fig.4 Comparison of river networks derived via the CSD method with digital stream map

表 2 堆龙曲和白水曲 CSD 确定方法主要参数结果

Tab.2 Results of main parameters for CSD method for study areas

堆龙曲						白水曲					
$P = 457\text{ mm}, E = 388\text{ mm}, C_0 = 0.175$						$P = 720\text{ mm}, E = 408\text{ mm}, C_0 = 0.175$					
Q_c	$Q_c : C_0$	F_c	ρ_c	ρ_r	$\rho_c : \rho_r$	Q_c	$Q_c : C_0$	F_c	ρ_c	ρ_r	$\rho_c : \rho_r$
0.010	0.057	26.12	0.106	0.377	0.281	0.020	0.114	11.55	0.154	0.365	0.421
0.008	0.046	20.89	0.132	0.377	0.351	0.015	0.086	8.66	0.205	0.365	0.562
0.005	0.029	13.06	0.212	0.377	0.562	0.010	0.057	5.78	0.307	0.365	0.842
0.003	0.017	7.84	0.353	0.377	0.937	0.009	0.051	5.20	0.342	0.365	0.936
0.002 8	0.016	7.31	0.379	0.377	1.004	0.008 5	0.049	4.91	0.362	0.365	0.991
0.0026	0.015	6.79	0.408	0.377	1.081	0.008	0.046	4.62	0.384	0.365	1.053
0.0024	0.014	6.27	0.442	0.377	1.171	0.005	0.029	2.89	0.615	0.365	1.685
0.002 2	0.013	5.75	0.482	0.377	1.278	0.003	0.017	1.73	1.025	0.365	2.808
0.002	0.011	5.22	0.530	0.377	1.406	0.002	0.011	1.16	1.537	0.365	4.212
0.001	0.006	2.61	1.060	0.377	2.811	0.001	0.006	0.58	3.075	0.365	8.424

注: P 为年降水量,mm; E 为年蒸发量,mm; Q_c 为临界支撑流量, m^3/s ; F_c 为集水面积阈值, km^2 ; ρ_c 为提取河网密度, km/km^2 ; ρ_r 为实际河网密度, km/km^2 。

结果显示,临界面积阈值 F_c 越小,河网密度越密,并且具有更复杂的河网形态(图 2、3)。在式(3)中可知,临界流量 Q_c 是影响临界面积阈值 F_c 的关键参数之一, Q_c 选取的大小也是直接影响提取河网阈值 F_c 主要因素。 Q_c 值越大,对应的 F_c 越大,提取河网密度 ρ_c 越小。在表 2 中,当河网密度吻合指数 ρ_c/ρ_r 趋向于 1.0 时,由 DEM 提取的河网与实际的河网基本重合。由此得到堆龙曲和白水曲流域的临界流量 Q_c 分别为 $0.002\ 8\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.008\ 5\ \text{m}^3/\text{s}$,在此情况下,由堆龙曲和白水曲流域 DEM 提取的河网与地形图显示的实际河网最相似(图 4),则堆龙曲和白水曲临界支撑流量 Q_c 为 $0.002\ 8\ \text{m}^3/\text{s} + Q_{\text{SD}}$ ($Q_{\text{SD}} = 0.001\ \text{m}^3/\text{s}$) 和 $0.008\ 5\ \text{m}^3/\text{s} + Q_{\text{SD}}$ ($Q_{\text{SD}} = 0.001\ \text{m}^3/\text{s}$)。而两流域的源头最小下限流量为 0.001 8 和 0.007 5 m^3/s ,均大于河源最小流量下限 0.001 m^3/s ,符合 $Q_c \geq Q_{\min}$ 的实际情况。

2.2 讨论

基于水文气象条件的河源区临界支撑流量的确定方法是建立在河流自然特性之上的,利用临界支撑流量作为判定集水面积阈值的标准,在应用中也更容易掌握。为了验证方法的可行性,选取拉萨河堆龙曲和尼洋河白水曲流域作为研究区域,利用 ArcSWAT 从 DEM 提取河网,其中水文气象数据由拉萨河和尼洋河流域及周边的 10 个测站提供的气温和降水的日观测数据(表 1)和改进的高桥公式计算得到的月蒸发数据,应用本方法计算出河网密度指数,检验不同临界流量 Q_c 和集水面积阈值 F_c 下提取河网与实际河网的相似性(表 3),得到当临界

阈值 F_c 分别为 7.31 和 4.91 km^2 时,计算与实际的河网相似性最高(图4),标准临界流量 Q_c 为 0.002 8 和 0.008 5 m^3/s 。由图 4 和表 3 可知,这种方法确定的河源 CSD 提取后的河网与实际河网不论是从形态结构还是从河流长度、数目和密度上都有极高的相似度。

表 3 堆龙曲和白水曲提取河网与实际河网对比分析
Tab.3 Comparison between extraction of river network and actual river network for Duilongqu and Beishuiqu basins

	流域面积/ km^2	河流长度/ km	河流 条数	河网密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$
实际河网	4 574.6	1 726.8	445	0.377
堆龙曲 提取河网	4 531.5	1 807.8	460	0.379
相对误差/%	0.94	4.69	3.37	0.53
实际河网	4 023.0	1 468.7	515	0.365
白水曲 提取河网	3 986.2	1 456.7	525	0.362
相对误差/%	0.91	0.81	1.94	0.82

从实际河流观测和野外调查的工作中发现,河源起点以上的临界支撑面积 F_c 的变化很大,范围可以从 1.0 到 20 km^2 之间,一般是在较为干旱的地区面积大,而在湿润地区面积较小;在平缓区面积大,在山区面积小。但是不论是在干旱地区或者湿润地区,在不同的地形地貌条件下,临界支撑流量 Q_c 的变化不太大,一般可以在 0.002 ~ 0.01 m^3/s 左右,因此采用确定临界流量 Q_c 作为标准应用来推算临界支撑面积也是一种比较容易掌握的方法,结果也更加合理。

基于水文气象条件的临界支撑流量 CSD 的确定方法提供了一种参数化河源区最小流量和支撑面积的模型,并且应用于从 DEM 提取河网的新方法,该方法利用常规的气象参数(降雨和气温数据)等来确定 CSD,比利用经验值确定集水面积阈值来提取河网更具有合理性,也更适合应用于各种不同气候条件下的地区的河网提取。另外,CSD 作为流域水文气象变化的重要指标,也提供了一种可以反映出当地气象与水文变化的影响的新途经。

3 结 论

对于河源位置的确定及河网解析是水文地理中的重要任务,以往的研究主要集中于临界支撑面积,最枯月流量、生态需水量等方面。作者在对河流源头的基本特征分析的基础上提出临界支撑流量的概

念和计算模型。在河流形成条件与水量平衡原则的基础上,利用水文气象参数建立集水面积阈值(CSA)与临界支撑流量(CSD)之间的关系,通过 2 个流域的典型案例分析,验证了新方法的可行性。这种新的 CSD 确定方法适应不同水文气象条件下确定河源位置的需要,也提供了一种利用参数化临界流量模型的方式确定河网和临界阈值的新方法。

对于临界支撑流量 CSD 的研究还处于初步研究阶段,并且临界流量和临界阈值之间的关系有可能更加复杂,涉及到的参数也要更加广泛,但是在长时间、大尺度流域范围内,基于水量平衡的 CSD 方法具有较高的可信性的。另外,对于更广泛的地区 CSD 方法的适应性,以及 CSD 随水文气象要素的变化影响等方面还需要进一步的研究。

参考文献:

[1] Jones R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples [J]. Computers and Geosciences,2002,28(9):1051-1060.

[2] Ariza-Villaverde A B, Jiménez-Hornero F J, Gutiérrez-de-Ravé E. Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation [J]. Geomorphology,2013,197:85-95.

[3] Guan Yinghui, Zheng Fenli, Wang Bin, et al. DEM based extraction of river networks in Binzhou river basin of Heilongjiang province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(1):127-131. [关颖慧,郑粉莉,王彬,等.基于DEM的黑龙江宾州河流域水系提取试验研究[J].水土保持通报,2012,32(1):127-131.]

[4] Pan Zharong, Ruan Xiaohong, Xu Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(1):119-126. [潘扎荣,阮晓红,徐静.河道基本生态需水的年内展布算法[J].水利学报,2013,44(1):119-126.]

[5] Zheng Zhihong, Zhang Zezhong, Huang Qiang, et al. Improvement and application on ecological mater requirement tennant method [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2010,42(2):34-39. [郑志宏,张泽中,黄强,等.生态需水量计算 Tennant 法的改进及应用[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(2):34-39.]

[6] Tennant D L. Instream flow regiments for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisher-

- ies,1976,1(4):6-10.
- [7] Fraser J C. Suggestions for developing flow recommendations for in-stream uses of New Zealand streams [R]. Wellington: Ministry of Works and Development Water and Soil Miscellaneous Publication NO.6,1978.
- [8] Singh K P, Stall J B. Hydrology of 7-day 10-year low flows[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1974, 100(12):1753-1771.
- [9] Chiang S L, Johnson F W. Low flow criteria for diversions and impoundments [J]. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, 1976, 102(2):227-238.
- [10] Tharme R E. A global prespective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6):397-441.
- [11] Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. Computers and Geosciences, 1992, 18(6):747-761.
- [12] Sun Aili, Yu Zhongbo, Yang Chuanguo, et al. Impact factors of contribution area threshold in extracting drainage network for rivers in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8):901-908. [孙爱立, 余钟波, 杨传国, 等. 我国水系提取阈值影响因素分析[J]. 水利学报, 2013, 44(8):901-908.]
- [13] Shi Changxing, Zhou Yuanyuan, Fan Xiaoli, et al. A study of the calculation of drainage density of the middle Yellow River from DEM [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(10):24-27. [师长兴, 周园园, 范小黎, 等. 利用 DEM 进行黄河中游河网提取及河网密度空间差异分析[J]. 测绘通报, 2012(10):24-27.]
- [14] Yang Bang, Ren Liliang. Identification and comparison of critical support area in extracting drainage network from DEM[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(5):11-14. [杨邦, 任立良. 集水面积阈值确定方法的比较研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5):11-14.]
- [15] Li L, Xu Z X. A preprocessing program for hydrologic model—A case study in the Wei River Basin[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13:766-777.
- [16] Richter B D, Baumgartner J V, Wigington R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1):231-249.
- [17] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3):323-344.
- [18] Quinn P, Beven K J, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1):59-79.
- [19] Gain A K, Apel H, Renaud F G, et al. Thresholds of hydrologic flow regime of a river and investigation of climate change impact—the case of the Lower Brahmaputra river Basin[J]. Climatic Change, 2013, 120(1/2):463-475.
- [20] Takahashi H. The calculation method of monthly average temperature, monthly precipitation and evapotranspiration [J]. Synoptics, 1979, 26(12):759-763.
- [21] Fu Jing, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen. The applicability and modification of Takahashi formula for evaporation estimation in Lhasa [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(2):231-237. [付菁, 范广洲, 周定文. 高桥公式在拉萨地区的适用性及其修正[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2):231-237.]
- [22] Li Li. Study on flood routing of distributed hydrologic models[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. [李丽. 分布式水文模型的汇流演算研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [23] Zheng Du, Zhang Rongzhu, Yang Qinye. On the natural zonation in the Qinghai Xizang Plateau [J]. Acta Geographic Sinica, 1979, 34(1):1-11. [郑度, 张荣祖, 杨勤业. 试论青藏高原的自然地带[J]. 地理学报, 1979, 34(1):1-11.]
- [24] Shen Dajun. Research on the rational use of water resources on the Lhasa River, Tibet [C]//Simonovic S P, Kundzewicz Z, Rosbjerg D, et al. Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems. Boulder: IAHS, 1995.