

Analysis on the Change of Base Flow and Its Driving Factors in Kuye River Basin

Lianmian Shen^{1,2}, Xiaohui Jiang^{1,2*}, Yuxin Lei^{1,2}

¹Shaanxi key Laboratory of Surface Processes and Environmental Bearing Capacity, Northwest University, Xi'an Shaanxi

²College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an Shaanxi

Email: *18333908352@163.com

Received: Jul. 13th, 2020; accepted: Jul. 28th, 2020; published: Aug. 4th, 2020

Abstract

Based on the daily runoff data and climate data of Wenjiachuan hydrology station in Kuye River basin from 1956 to 2012, the appropriate segmentation method was determined by comparing the numerical statistical characteristics and the base flow index errors of nine methods, which includes recursive digital filtering, smooth minimum and HYSEP methods. The difference product curve and slip t test were used to determine and verify the mutation year of base flow. The contribution rates of climate factors and human activities were calculated by double cumulative curve method. The results show that F1 method is reliable for analysis, and the base flow not only shows a trend of continuous reduction, but also the abrupt transition years of 1980 and 1996 were inconsistent with the abrupt transition points of climate. The time series was divided into three stages with the abrupt transition years as the boundary. Compared with the base period, the contribution rates of climate and human activities in the second and third stages are 7.72%, 92.28%, 15.73% and 84.27%, respectively. In the 21st century, human activities have always been the main factor affecting the base-flow, and the influence of climate change on base-flow shows an increasing trend.

Keywords

Base Flow Segmentation, Mutation, Contribution, Comparative Study

窟野河流域河川基流变化及其驱动因素分析

申恋绵^{1,2}, 蒋晓辉^{1,2*}, 雷宇昕^{1,2}

¹西北大学陕西省地表过程与环境承载力重点实验室, 陕西 西安

²西北大学城市与环境学院, 陕西 西安

Email: *18333908352@163.com

收稿日期: 2020年7月13日; 录用日期: 2020年7月28日; 发布日期: 2020年8月4日

作者简介: 申恋绵, 女, 2018级西北大学本科生, 主要从事水文水资源研究工作。

*通讯作者。

文章引用: 申恋绵, 蒋晓辉, 雷宇昕. 窟野河流域河川基流变化及其驱动因素分析[J]. 水资源研究, 2020, 9(4): 373-385.

DOI: 10.12677/jwrr.2020.94039

摘要

基于窟野河流域温家川水文站1956~2012年的日径流资料以及气候等数据,通过比较递归数字滤波法(RF法)、数字滤波法、平滑最小值法与HYSEP法四类共九种方法分割的基流过程、基流指数统计特征与分割效果误差,确定出适合的分割方法;采用差积曲线法与滑动t检验法确定并检验基流突变年份;采用双累积曲线法分别计算气候因素与人类活动的贡献率。结果表明:选用F1法进行基流分割更为可靠。基流不仅呈现出持续减少的趋势,且突变年份1980年和1996年与气候突变点不一致,以突变年为界将时间序列分为三个阶段。与基准期相比,第二、三阶段气候和人类活动的贡献率分别为7.72%、92.28%和15.73%、84.27%。进入21世纪,人类活动始终是影响基流的主要因素,气候变化对基流的影响呈现出日益增长的趋势。

关键词

基流分割, 突变, 贡献率, 比较研究

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基流作为河川径流的重要组成部分,是干旱半干旱区最重要的枯季水文特征之一,在很多方面都有重要地位,例如维持生态系统健康、水安全、工农业供水和构建降雨-径流关系模型[1][2]。作为对枯水流域降水效应的缓慢响应,基流常以地下水的形式渗透补给河流,在维持河道不能断流、水源的稳定性上发挥着重要作用[3]。基流可参与水分循环进而影响地下水的水量平衡,其演化规律与流域内气候特征、水文地质、人类活动等因素相关。

窟野河流域,地处黄河中游支流,发源于内蒙古自治区东宁市巴定沟,经伊金霍洛旗和陕西省府谷县境内,于神木县沙峁头村注入黄河。窟野河水系两岸支流短小,较大支流有21条,东北岸有较大支流9条,西南岸有较大支流12条,略不对称,研究区地势西北高、东南低,是黄土高原侵蚀地区的典型河流。神木县城以上为沙丘和流沙覆盖区,地面平坦,起伏不大;神木县城以下黄土覆盖,地面破碎,为沟谷纵模的梁峁地形,植被缺乏,水土流失极为严重,河口段为土石山区,河流切割基岩,坡陡岸高,支流短少。因处寒温带干旱半干旱大陆性季风气候区,径流量有明显季节性变化的趋势,同时该地区为黄土高原暴雨多发区,降水量在时空分布上表现出极大的不均匀性,干旱-暴雨交替频繁,年内输沙量不稳定。目前,窟野河流域存在的水资源供需矛盾加剧了当地生态环境与经济发展,有必要开展在气候变化与人类活动影响背景下窟野河流域基流变化规律的研究。

由于气候变化及人为活动等因素的影响,窟野河流域基流量呈现出明显的下降趋势。目前,针对基流变化及驱动因素的研究较多,如Wilby等[4]通过模拟技术手段研究在不同时期气候变化和土地利用变化对基流的影响,结果表明在丰水期时气候变化的影响比枯水期大;Vorosmarty等[5]的研究表明人类活动对基流的影响可能超过气候变化造成的影响;董薇薇[6]等通过比较递归数字滤波法和平滑最小值法从气温和降水两个方面探讨祁连山疏勒河基流减少的因素,结果表明降水起主导作用;杨倩楠[7]通过比较不同的基流分割方法并分析气候变化和不同人类活动对基流量的影响,结果表明人类活动对基流影响大于气候变化;雷泳南[8]通过选择合适的基流分割方法分析了影响窟野河流域基流的众多驱动性因素,结果表明煤矿资源的大规模开采占主导地位。由于各种方法的原理和处理方法对窟野河流域基流及驱动因素的研究存在差异,本文在以往研究的基础上运用递归

数字滤波法、数字滤波法、平滑最小值法与 HYSEP 法四类共九种方法对窟野河的基流变化规律进行分析, 并从气候及人类活动等方面定量探讨其变化的驱动因子, 这不仅有助于了解窟野河的水循环特征及其转化规律, 为窟野河地下水资源的开发利用提供合理依据, 而且对全球大背景下流域生态环境建设也具有实际指导意义。

2. 数据资料

本文以窟野河流域内的 2 个气象站、3 个水文站及流域周边 3 个气象站(图 1)的实测气象数据、降水数据以及 1956~2012 年温家川日径流数据进行分析。数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和黄河水利年鉴。



Figure 1. A sketch map of the Kuye River basin
图 1. 窟野河流域地理概况图

3. 基流分割方法

3.1. 递归数字滤波法

递归数字滤波法是由 Eckhardt [9]在单参数数字滤波法的基础上提出的双参数数字滤波方法, 其中 BFL_{max} 为因地域而异的最大基流指数, 窟野河流域易受季风影响, 径流量具有明显季节性变化的特点, 故本研究中取 0.5。

3.2. 数字滤波法

除递归数字滤波法外, 目前应用广泛的数字滤波法还有: Lyne-Hollick 滤波法 [10] [11] (F1)、Chapman-Maxwell 滤波法 [12] (F2)、Boughton-Chapman 滤波法 [13] (F3)、Eckhardt 滤波法 [14] (F4)。

F1 法由 Nathan 和 McMahon [15]于 1990 年首次提出, Nathan [11]等对澳大利亚 186 个流域及 Arnold [16]等对美国 11 个流域的研究表明 α 取 0.925 时分割的效果较好, 因此 α 选择 0.925, β 为 0.5, N (滤波次数)取 3。F2 法为 Chapman [17]于 1991 年对 F1 中的问题进行的系统分析, 将 α 取为 0.95, N (滤波次数)取 1。F3 法: Chapman 和 Maxwell [18]假定某时刻的基流为该时刻的地表径流和前一时刻基流的加权平均, 计算出基流分割方程, 式中

k 为退水系数, 一般情况 $k = 0.95$, N (滤波次数)取 1。F4: 为了得到更为平滑的基流分割结果, 引入另外一个参数 C , 并将式 F3 中的 $1-k$ 用参数 C 代替, 本研究中取 0.15, k 取退水常数值 0.982, N (滤波次数)取 3, 这是一个更为平稳的数字滤波分割方法。

3.3. 平滑最小值法

平滑最小值(Minimum Smoothing Method, MSM)即 BFI (F)法, 是 1980 年英国水文所提出的一套计算基流的方法[19], 将连续的日径流序列分成不重叠的部分, 选出每个部分满足一定条件的最小值将其确定为拐点, 并将拐点用直线连接并用线性内插法[20]将其他的值计算出来。时间步长 N 可以通过试算法来确定[21]。经前期数据分析过程, 将 N 确定为 4。f 称为拐点检验因子, 国内外许多学者[22]的研究表明, f 在不同取值下分割效果不尽相同, 本文将其定为 0.9。

3.4. HYSEP 分割法

HYSEP (A computer program for stream flow hydrograph separation and analysis)法共有三种基流分割方法: 固定间隔法(Fixed)、滑动间隔法(Slide)和局部最小值法(Local min)。三种方法首先应算出退水时段长:

$$N = (2.95A)^{0.2} \quad (1)$$

式中: N 为地表径流停止后径流过程的退水时段(d); A 为流域面积(km²), 确定流域基流分割的时间间隔为最接近于 $2N$ 并且取值在 3~11 的奇数, 流域面积为 8706 km², N 为 7, 故以 11 d 作为时间间隔进行基流分割。

3.5. 基流指数

基流指数(base flow index, BFI)是指时段内河川基流量占总径流量的比例, 反映河川基流量的大小。为比较以上分割方法的差异并选出最适合该地区的分割方法, 运用 9 种分割方法对窟野河流域温家川水文站 57 年的实测径流值进行基流计算, 获取基流指数值, 并计算比较其均值与标准偏差等统计特征。同时运用 SPSS 对不同方法获得的基流指数值作皮尔逊相关分析, 获得相关系数, 依次作为选择依据。

3.6. 误差分析

采用 Nash-Sutcliffe [23]效率系数(E)和平均相对误差(R)作为另一个选择评判依据[8],

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m(i)} - Q_{p(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m(i)} - Q_{am})^2} \quad R = \frac{Q_{as} - Q_{am}}{Q_{am}} \quad (2)$$

式中: $Q_{m(i)}$ 为第 i 年观测年基流量, 亿 m³, 其数值为枯水指数(Q_{90}/Q_{50})与年总径流量的乘积, (Q_{90} 与 Q_{50} 分别表示由日流量历时曲线确定的时段内出现频率不小于 90%与 50%时的径流量), $Q_{p(i)}$ 为采用不同的方法计算出来的年基流量, 亿 m³, Q_{am} 为观测平均年基流量。一般认为, E 超过 0.6, R 小于 10%的模拟效果具有较好的精度。

4. 结果分析

4.1. 退水常数的确定

应用递归参数滤波法可直接算出一系列径流量对应的基流量数值, 但应先求出退水常数 α 。一般来说, 较常用的方法为 MRC (Master Recession Curve)方法[24]。河川径流在形成过程中由于受气候等的影响而表现出高低起伏的变化过程, 因此为全面反映出 57 年的变化规律, 本文基于窟野河流域温家川水文站实测日径流数据, 建立辐射到年内的流量日图, 并确定退水点, 绘制出退水段(图 2)。退水段是地下变动含水层的水量排泄过程,

即为径流量在退水点以后随自身衰减的变化过程，可以用指数关系[24]来表示。 α 为退水常数，其数值的大小反映出基流消退的快慢。

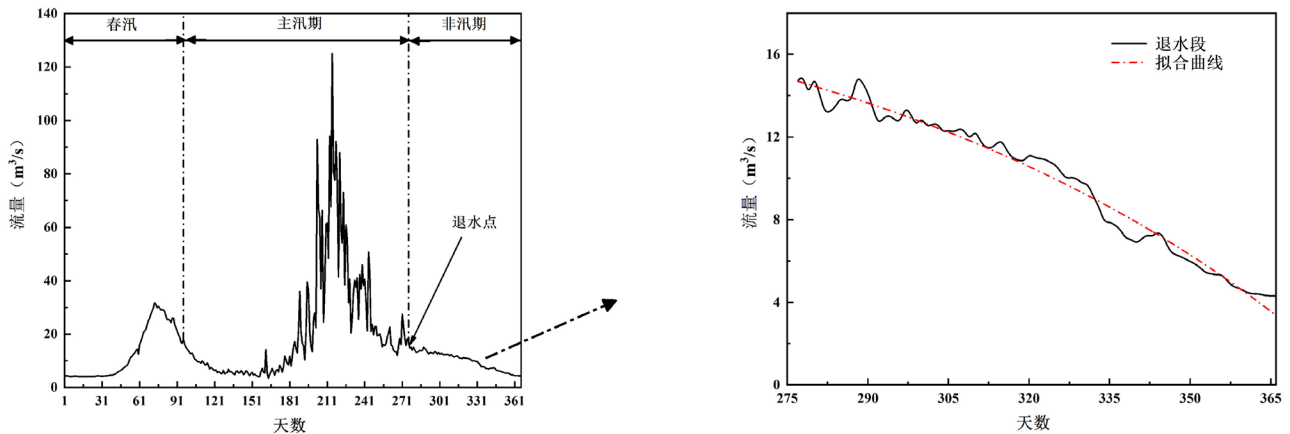


Figure 2. Hydrograph and recession curve of stream flow in Kuye River

图 2. 窟野河流量过程线与退水曲线示意图

应用以上方法求解得退水常数为 0.982，即为指数关系方程中的一个滤波参数，求解可得同时间序列对应的基流序列，但计算过程中还需满足基流数值不小于 0，基流值不大于径流值两个要求，故在本研究中对方程求得的基流值检验修正，得到最终的基流序列。

4.2. 基流分割方法的选取

4.2.1. 基流分割过程比较

图 3(a, b)为采用 9 种基流分割方法对窟野河流域温家川站 1956 年~2012 年日径流序列分割的结果，从图中可以看出，各种方法得到的基流变化与径流变化趋势一致，但基流过程线存在差异性。如图(a)，采用滑动最小值法与 HYSEP 法的基流过程线基本重合，但由于两类方法均为流量最低点的连线，未能很好地反映汛期的径流降水过程。滑动最小值法因对径流序列处理时采用线性内插的方法，处理过程存在很多拐点，未能更好地反映真实的产汇流规律[25]。相反，图(b)递归数字滤波法与数字滤波法得到曲线较为平滑，更符合流域汇流时阻尼效应，F2、F3 法分割曲线波动较大，不够稳定，F1、F4、递归数字滤波法较为稳定。

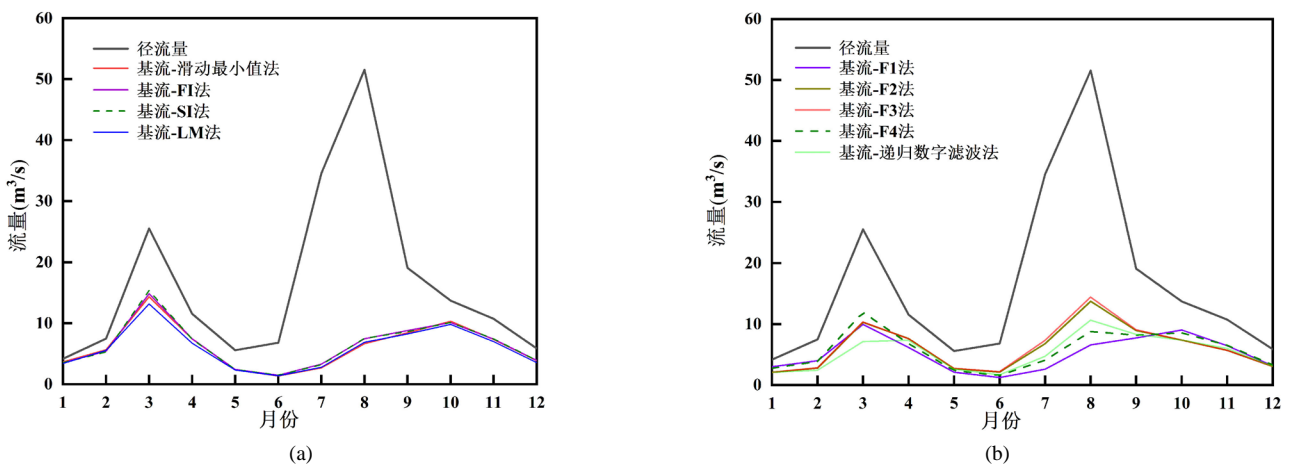


Figure 3. Monthly variations of base-flow calculated by the nine base-flow separation methods from 1956 to 2012

图 3. 1956~2012 年 9 种基流分割方法的基流过程线比较

4.2.2. 基流指数对比分析

9 种基流分割方法的基流指数结果见表 1，不同分割方法估算结果不一致，F1 和递归数字滤波法估算的基流指数值偏小且接近，约为 0.34 左右，而其他 7 种方法估算的基流指数值偏大且比较接近，约为 0.39 左右。将基流指数值作相关分析，结果见表 2，在四种数字滤波法中，F4 与其他 8 种方法估算结果相关性最好，平均在 0.97，其应用稳定性最好；F1 法与其他 8 种方法估算结果相关性仅次于 F4 法，递归数字滤波法的相关性最差。为深入探究不同基流分割方法间估算结果的差异，分析 9 种基流分割方法的统计特征(表 3)，滑动最小值法的标准偏差最大，其次为 HYSEP 法，F1、F4、递归数字滤波法的标准偏差较小，F2、F3 法的标准偏差最小。

Table 1. Base flow indexes estimation by 9 base flow separation methods

表 1. 9 种基流分割方法估算的基流指数

年份	滑动最小值法	HYSEP 法			数字滤波法				递归数字滤波法
		FI	SI	LM	F1	F2	F3	F4	
1956~1965	0.4325	0.4335	0.4364	0.4167	0.3634	0.4003	0.4077	0.3928	0.3567
1966~1975	0.3972	0.4075	0.4098	0.3751	0.3333	0.3818	0.3894	0.3663	0.3331
1976~1985	0.3661	0.3760	0.3791	0.3429	0.3016	0.3735	0.3815	0.3419	0.3182
1986~1995	0.3784	0.3831	0.3813	0.3427	0.2964	0.3564	0.3648	0.3557	0.2993
1996~2005	0.3669	0.3930	0.3954	0.3555	0.2972	0.3719	0.3787	0.3475	0.2983
2006~2012	0.5311	0.5471	0.5426	0.5018	0.4459	0.4382	0.4426	0.4656	0.3908

Table 2. Correlation coefficient of annual base flow indexes among 9 base flow separation methods

表 2. 9 种基流分割方法基流指数值的相关系数

方法	MSM	RF	HYSEP 法			数字滤波法			
			FI	SI	LM	F1	F2	F3	F4
MSM	1.0000								
RF	0.8670	1.0000							
FI	0.9640	0.8830	1.0000						
SI	0.9770	0.8780	0.9860	1.0000					
LM	0.9560	0.8740	0.9470	0.9550	1.0000				
F1	0.9560	0.9320	0.9600	0.9680	0.9540	1.0000			
F2	0.9090	0.9410	0.9320	0.9370	0.8910	0.9190	1.0000		
F3	0.9040	0.9440	0.9250	0.9290	0.8910	0.9140	0.9950	1.0000	
F4	0.9700	0.9210	0.9820	0.9900	0.9570	0.9820	0.9600	0.9550	1.0000

Table 3. Statistical characteristics of annual base flow index in 9 base flow separation methods

表 3. 9 种基流分割方法隔年基流指数统计特征

统计特征	滑动最小值法	HYSEP 法			数字滤波法				递归数字滤波
		FI	SI	LM	F1	F2	F3	F4	
最大值	0.6837	0.6682	0.6630	0.6230	0.6054	0.4821	0.4842	0.5712	0.4692
最小值	0.2414	0.2396	0.2485	0.2345	0.2027	0.2826	0.2945	0.2333	0.2323
极值比	2.8317	2.7884	2.6684	2.6568	2.9867	1.7062	1.6439	2.4481	2.0201
均值	0.4058	0.4168	0.4179	0.3832	0.3340	0.3843	0.3916	0.3702	0.3297
标准偏差	0.1054	0.1020	0.0995	0.0945	0.0829	0.0467	0.0443	0.0756	0.0502

4.2.3. 基于年基流量的误差分析

为进一步验证计算结果的准确性, 选出最适合的基流分割方法, 验证其 E 与 R 结果见表 4。F2、F3、滑动最小值法、HYSEP(F)、HYSEP(S)的平均相对误差高达 27%~32.15%, 其年基流估算值不理想; F4 和 HYSEP(L)虽 Nash-Sutcliffe 效率系数均大于 0.6, 但平均相对误差较大, 效果较为理想; RF 和 F1 的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.81 和 0.84, 平均相对误差控制在 10% 以下, 分别为 9.96% 和 7.28%, 其基流量与实际观测值的模拟效果最好。综合基流过程线、基流指数与误差分析结果, 本文选取更为合理可靠的 F1 法进行进一步分析研究。

Table 4. Verification results of base flow in 9 base flow separation methods

表 4. 9 种基流分割方法的验证结果

方法	E	R
RF	0.81	9.96%
F1	0.84	7.28%
F2	0.55	27.00%
F3	0.47	29.80%
F4	0.72	19.03%
MS	0.50	28.29%
HYSEP(F)	0.42	31.64%
HYSEP(S)	0.43	32.15%
HYSEP(L)	0.63	22.49%

4.3. 基流过程分析

4.3.1. 基流过程线

为直观了解分割的趋势与结果, 现以年份为横坐标, 以基流量为纵坐标(如图 4), 观察曲线的平滑度。

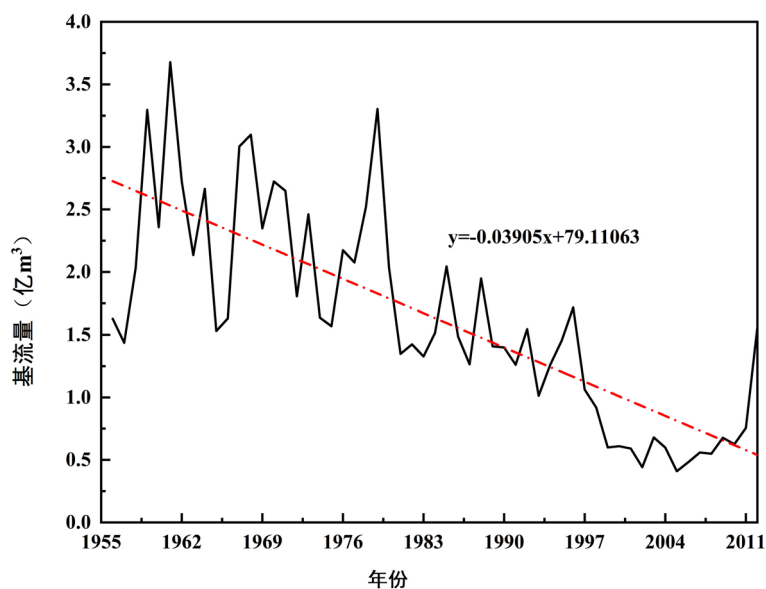


Figure 4. The trend of base flow in Wenjiachuan hydrology of Kuye River from 1956 to 2012 (F1 method)

图 4. 窟野河温家川水文站 1956 年~2012 年基流量过程线示意图(F1 法)

4.3.2. 年代基流量对比分析

为更好地了解基流的变化情况，现对研究流域各年代的基流状况做统计，结果见表 5。河川基流量随年代的增加呈现明显的下降趋势，与 50 年代相比，21 世纪基流量减少率在 66% 左右。同时，表中数据表明，在不同年代秋冬季节的基流量远大于春夏，体现出年内基流的分配不均匀性。

Table 5. Base flow of decades in the Kuye River basin

表 5. 窟野河流域年代基流量(亿 m³)

年代	F1 法			
	春	夏	秋	冬
1956~1965	3.98	9.16	6.06	10.52
1966~1975	4.35	8.02	4.90	11.79
1976~1985	3.78	7.09	4.35	9.83
1986~1995	3.38	5.56	2.71	6.15
1996~2005	2.02	3.29	1.10	3.26
2006~2012	2.32	2.15	1.19	3.78

4.3.3. 基流突变特征分析

采取绘制差积曲线的方式分析基流结果并确认基流突变年份，再结合滑动 t 检验对窟野河流域水文要素的序列突变情况进一步验证。

1) 差积曲线

差积曲线即累积距平曲线，曲线上最大或最小值对应的横坐标为可能的突变点。分析图 5，初步得出突变年份分别为 1980 和 1996 年，为验证其合理性，采用滑动 t 检验法检验。

2) 滑动 t 检验法

该方法的原理为对已知的样本序列 x_1, x_2, \dots, x_n ，选中其中 1a，分别取其前后相邻的连续 n_1 和 n_2 年的样本值计算统计量 T 值。从图 6 可以进一步验证确定其突变年份为 1980 年和 1996 年。

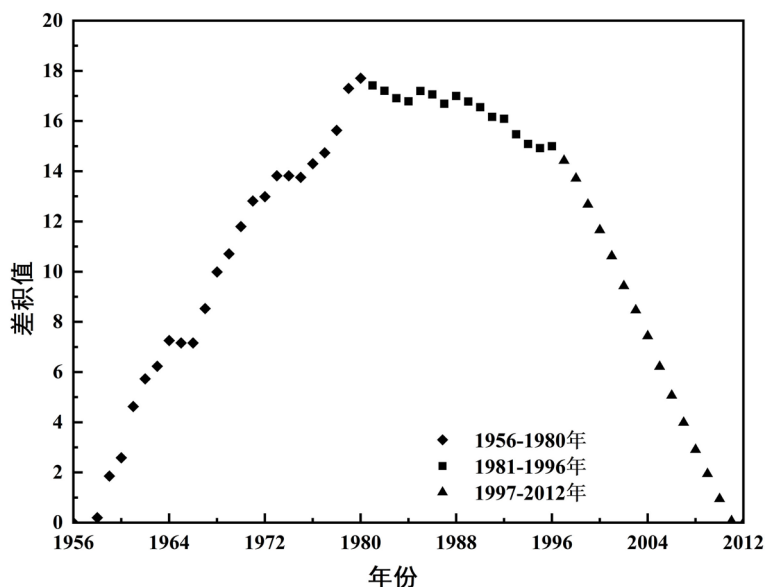


Figure 5. Base flow difference curve in the Kuye River

图 5. 窟野河基流差积曲线

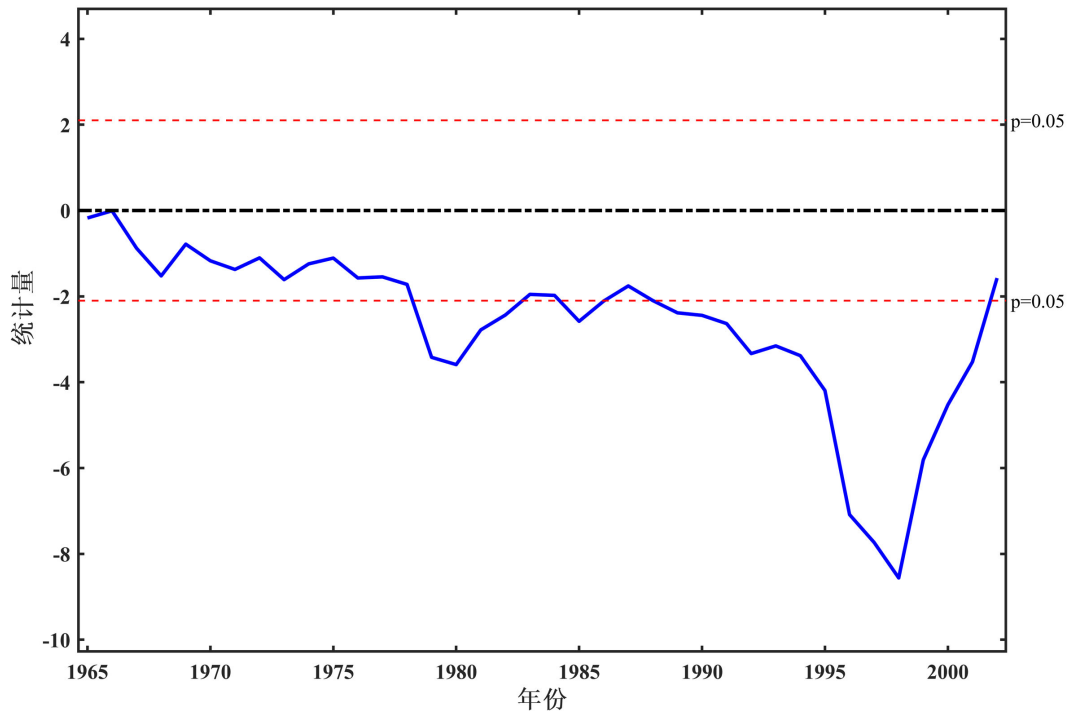


Figure 6. The Sliding t test in the Kuye River

图 6. 窟野河基流滑动 t 检验

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3)$$

式中: \bar{x}_1 , \bar{x}_2 , S_1 , S_2 为前后 n_1 和 n_2 年的均值和标准差。

综上, 以突变年份将整个时间序列划分为三个阶段: 第一阶段(基准期): 1956~1980 年。第二阶段(水土保持期): 1981~1996 年。第三阶段(煤矿开采期): 1997~2012 年。

5. 基流变化驱动因素分析

基于以上对基流过程线的分析及基流年际年内变化、突变年份的识别与检验过程, 进一步分析影响基流变化的因素。与基流相关的因素包括流域面积、流域坡度、河网密度、森林覆盖率等一系列土壤和地质指标[26], 窟野河流域自然条件与地形地貌的特殊性导致该流域生态系统脆弱, 基流易受影响, 加之该流域范围内蕴藏丰富的煤矿资源, 人类活动频繁。鉴于此, 本文将从气候变化和人类活动两方面探讨影响基流变化的驱动因素。

5.1. 降水和气温对基流的影响

从图 7(a)~(b)可以看出, 在全球变暖的总趋势下, 窟野河流域气温呈现显著上升趋势, 降水量呈现不显著的下降趋势。进一步对降水量及气温系列数值用五日滑动平均法[27]对降水及气温变化趋势进行评估, 并进行 Pettitt [8]检验, 结果表明, 降水的突变年份发生在 1979 年, 气温的突变年份出现在 1988 年, 降水和气温均未在基流的突变点 1980 年或 1996 年发生突变, 说明影响基流量突变的因素除气候因素外还有人类活动的影响。

5.2. 气候和人类活动对基流量贡献率计算

根据 F1 法对基流突变特征及基流影响因素分析结果, 通过线性回归得出不同时期基流量累积变化斜率及比

例, 详见图 8 和表 6。为计算不同影响因素的贡献率, 通过同样的时间区间计算降水及气温的累积变化斜率及比例, 详见图 9(a) (累积降水量)、图 9(b) (累积气温值) 和表 6。

综上, 由表 6 可知, 与基准期相比, 水土保持期基流变化量为 -0.9098 亿 m^3/a , 变化率为 -38.241% ; 降水变化量为 -26.69 mm/a , 变化率为 -6.325% ; 气温变化量为 0.247 mm/a , 变化率为 3.371% , 则气候变化率为 -2.954% 。气候和人类活动对基流的贡献率分别为 7.72% 和 92.28% 。与基准期相比, 煤矿开采期基流变化量为 -1.7803 亿 m^3/a , 变化率为 -74.831% ; 降水变化量为 -33.66 mm/a , 变化率为 -7.976% ; 气温变化量为 1.45 mm/a , 变化率为 19.746% , 则气候变化率为 11.77% 。气候和人类活动对基流的贡献率分别为 15.73% 和 84.27% 。煤矿开采期与水土保持期相比, 基流变化量为 -0.8705 亿 m^3/a , 变化率为 -59.246% ; 降水变化量为 -6.97 mm/a , 变化率为 -1.763% ; 气温变化量为 1.20 mm/a , 变化率为 15.841% , 则气候变化率为 14.08% 。气候和人类活动对基流的贡献率分别为 23.76% 和 76.24% 。由此可以看到: 人类活动是影响基流变化的主要驱动因素。此外, 气候变化的比例也呈现微弱的上升趋势, 在一定程度上对基流的变化发挥着作用。

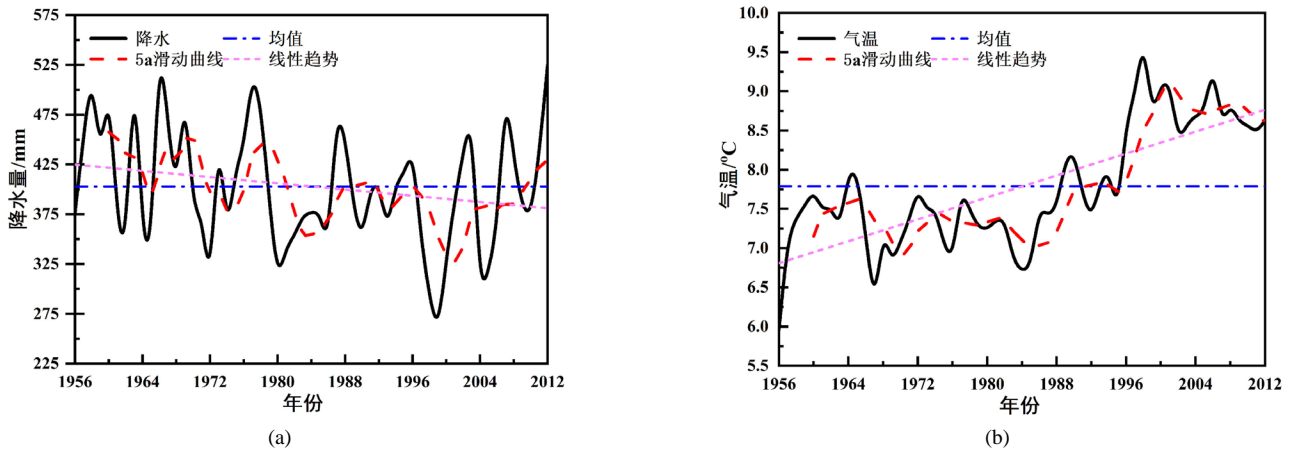


Figure 7. The linear trend of precipitation and temperature of Kuye River from 1956 to 2012
图 7. 窟野河流域 1956~2012 年降水和气温的变化趋势

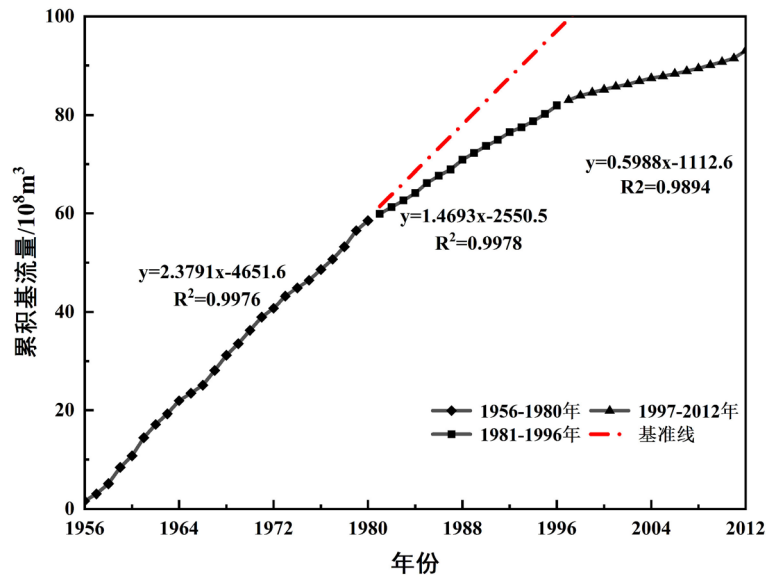


Figure 8. Accumulative curve of base flow in the Kuye River
图 8. 窟野河流域基流累积曲线

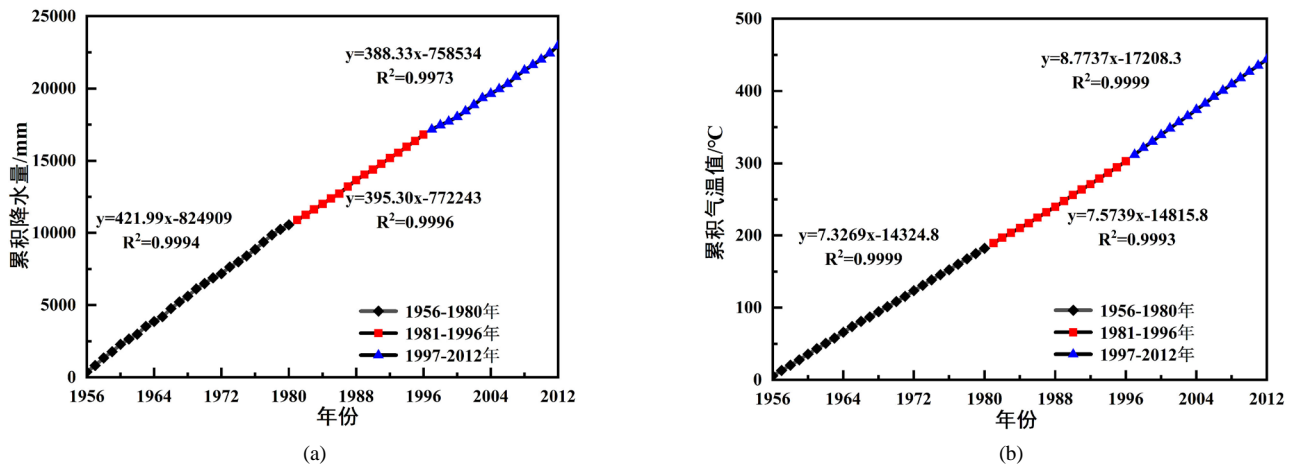


Figure 9. Accumulative curve of precipitation and temperature in the Kuye River

图 9. 窟野河流域降水气温累积曲线

Table 6. The cumulative slope and proportion of base flow, precipitation and temperature in different periods in the Kuye River

表 6. 窟野河流域不同时期基流、气温、降水累积斜率及所占比例

要素	不同时期累积斜率			变化率/%		
	1956~1980年	1981~1996年	1997~2012年	阶段二相对于阶段一	阶段三相对于阶段一	阶段三相对于阶段二
基流	2.3791	1.4693	0.5988	-38.241	-74.831	-59.246
降水量	421.99	395.30	388.33	-6.325	-7.976	-1.763
气温值	7.3269	7.5739	8.7737	3.371	19.746	15.841

由于人类活动的范围较为宽广，窟野河的人为影响方式较多，因此需要定性细分人类活动对基流的影响。

6. 结论

1) 本文探讨了递归数字滤波法、数字滤波法、滑动最小值法及 HYSEP 法 4 类 9 种基流分割方法在窟野河流域的适用性。通过综合比较不同方法得到的基流过程线、基流指数值、相关性、基流统计特征、Nash-Sutcliffe 效率系数和平均相对误差，最终选取 F1 法对窟野河基流变化驱动因素进一步分析。

2) 通过对窟野河流域的基流过程线、基流年代差异性以及基流突变特征进行分析，划分了不同的时间分期：基准期：1956~1980 年；水土保持期：1981~1996 年；煤矿开采期：1997~2012 年。

3) 对流域内气候情况进行调查发现，气候的突变与基流并不一致，故窟野河基流量的变化是气候和人类活动共同作用的结果，不同时期两类因素的贡献率有所差异，综合贡献率结果：与基准期相比，水土保持期气候和人类活动的贡献率分别为 7.72% 和 92.28%；煤矿开采期气候和人类活动的贡献率分别为 15.73% 和 84.27%。煤矿开采期与水土保持期相比，气候和人类活动的贡献率分别为 23.76% 和 76.24%。

随着气候与人类活动的影响，窟野河基流呈现出下降的趋势，为了保证窟野河的水生态环境安全与流域经济发展，基于本文的研究，我们可针对近年来煤矿开采力度上升的现状采取一定的保障措施，并建立一定的预防决策机制，保障当地水资源的合理利用与生态环境的建设。除此之外，人类活动的影响具有主导性和多样性，如何进一步定量分离评判不同人类活动要素对流域水文的影响，仍然是目前的一个难题。

基金项目

该研究是在国家自然科学基金项目(51779209)与陕西水利科技计划项目(2019slkj-20)的资助下完成的。

参考文献

- [1] 戴明英. 黄河中游支流基流的分割及特性分析[J]. 人民黄河, 1996, 18(10): 40-43.
DAI Mingying. Base flow separation and characteristic analyses of tributaries in the middle reach of Yellow River. Yellow River, 1996, 18(10): 40-43. (in Chinese)
- [2] TALLAKSEN, L. M. A review of baseflow recession analysis. Journal of Hydrology, 1995, 165(1-4): 349-370.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- [3] 蓝永超, 康尔泗. 河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 147-152.
LAN Yongchao, KANG Ersi. Changing trend and features of the runoff from mountain areas of some main rivers in the Hexi inland region. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 147-152. (in Chinese)
- [4] WILBY, R., GREENFIELD, B. and GLENNY, C. A coupled synoptic-hydrological model for climate change impact assessment. Journal of Hydrology, 1994, 153(1-4): 265-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90195-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90195-3)
- [5] VOROSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J., et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000, 289(5477): 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
- [6] 董薇薇, 丁永建, 魏霞. 祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 662-663.
DONG Weiwei, DING Yongjian and WEI Xia. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule river in the Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 661-669. (in Chinese)
- [7] 杨倩楠. 黄河中游不同地貌区基流变化及对生态建设的响应[D]. 西安: 陕西省西安理工大学, 2019.
YANG Qiannan. Baseflow change of different geomorphologic regions in the middle yellow river and its responses to ecological construction. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 雷泳南. 窟野河流域河川基流演变特征及其驱动因素分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
LEI Yongnan. Analysis on trend and driving factors of base flow in Kuye catchment. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Ministry of Education, Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research), 2012. (in Chinese)
- [9] ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- [10] LYNE, V. D., HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. In: Hydrology and water resources symposium. Perth: Australian National Conference Publication, 1979: 89-93.
- [11] NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- [12] CHAPMAN, T. G., MAXWELL, I. A. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineer Australia National Conference, Institution of Engineers, Camberra, Australia, 1996: 539-545.
- [13] BOUGHTON, W. C. A simple model for estimating the water yield of ungauged catchments. In: Institute engineer Australia national conference. Canberra: Institution of Engineer, 1993: 317-324.
- [14] ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- [15] NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A. Evaluation of baseflow and recession analyses. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- [16] ARNOLD, J. G., ALLEN, P. M., MUTTIAH, R., et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques. Groundwater, 1995, 33(6): 1010-1018. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x>
- [17] CHAPMAN, T. G. Comment on "evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. Water Resources Research, 1991, 27(7): 1783-1784. <https://doi.org/10.1029/91WR01007>
- [18] CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes, 1999, 13: 701-714. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2)
- [19] Hydrology of Institute. Low flow studies. Wallingford: Institute of Hydrology, 1980.
- [20] AKSOY, H., KURT, L. and ERIS, E. Filtered smoothed minima baseflow separation method. Journal of Hydrology, 2009, 372(1-4): 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.037>
- [21] WAHL, K., WAHL, T. Determining the flow of comal springs at New Braunfels, Texas. Texas Water, 1995, 95(6): 16-17.
- [22] 左海凤, 武淑林, 邵景力, 等. 山丘区河川基流 BFI 程序分割方法的运用与分析——以汾河流域河岔水文站为例[J]. 水文, 2007, 27(1): 69-71.
ZUO Haifeng, WU Shulin, SHAO Jingli, et al. Application of computerized base-flow separation method with BFI program in mountainous areas. Hydrology, 2007, 27(1): 69-71. (in Chinese)

-
- [23] NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models' part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- [24] 朱芮芮, 刘昌明, 郑红星. 无定河流域地下水更新时间估算[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 315-322.
ZHU Ruirui, LIU Changming and ZHENG Hongxing. Estimating residence time of groundwater in the Wudinghe River Basin. *Acta Geographical Sinica*, 2009, 64(3): 315-322. (in Chinese)
- [25] 王燕, 赵雪花, 张永波, 等. 不同基流分割方法在渭河流域的应用对比分析[J]. *水力发电*, 2017(2): 15-17, 80.
WANG Yan, ZHAO Xuehua, ZHANG Yongbo, et al. Comparison of different base flow separation methods applied in Weihe River Basin. *Water Power*, 2017, 43(2): 15-17, 80. (in Chinese)
- [26] MEI, Y. W., ANAGNOSTOU, E. N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 636-649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.083>
- [27] 黄珂珂, 董晓华, 陈亮, 等. 黄柏河流域近 40 年极端降水变化特性分析[J]. *三峡大学学报*, 2019, 41(5): 19-24.
HUANG Keke, DONG Xiaohua, CHEN Liang, et al. Analysis of extreme precipitation characteristics in Huangbai River basin in recent 40 years. *Journal of China Three Gorges University*, 2019, 41(5): 19-24. (in Chinese)