第 37 卷 第 4 期
2017 年 7 月

中 国 沙 漠
JOURNAL OF DESERT RESEARCH

Vol. 37 No. 4
Jul. 2017

呼图壁河基流变化及其影响因素

王敬哲[1ab]，刘志辉[1acd]，塔西甫拉提·特依拜[1ab]，张文娜[2]

（1. 新疆大学 a. 资源与环境科学学院，b. 教育部绿洲生态重点实验室，c. 干旱生态环境研究所，d. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆维吾尔自治区环境监测总站，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘要：基于石门水文站实测日径流数据和流域气象资料，运用平滑最小值法和递归数字滤波法对呼图壁河流量过程进行了基流分割研究。在不同的时间尺度上探讨了呼图壁河年均基流量和基流指数（*BFI*）的变化特征，以及不同水平年基流量与 *BFI* 的变化特征，并按照不同水平年份的划分从气温和降水两方面剖析影响基流变化的因素。结果表明：研究区内平滑最小值法优于递归数字滤波法。呼图壁河基流量的年内分布表现为单峰型，7 月达到最大值，*BFI* 先减小后增加，5 月最小，枯水期 *BFI* 接近 1。呼图壁河年基流量呈现为增加的趋势，多年平均基流量为 3.67×10^8 m^3，多年平均 *BFI* 为 0.78，呈递减趋势。枯水年份的平均 *BFI* 为 0.78，平水年为 0.76，丰水年为 0.74。春秋两季气温和降水对呼图壁河基流量的影响最为显著，不同的水平年份相关系数也存在一定差异。各年份气温对春秋两季基流量的影响均大于降水，说明气温是呼图壁河基流变化的关键性因素。

关键词：基流；基流指数；平滑最小值法；呼图壁河；天山北坡；气候变化

文章编号：1000-694X(2017)04-0793-09 **DOI：**10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00067

中图分类号：TV121 **文献标志码：**A

0 引言

基流是指由地下水补给河川径流的水量，较为稳定，是枯水期径流的重要补给来源，也是水资源评价中十分重要的特征值[1-3]。对于水资源匮乏的西北干旱区而言，基流是干旱半干旱地区流域最重要的枯季水文特征，其变化规律与流域覆被、土壤类型、地质构造、地形和气候息息相关[4-5]。准确地对径流的基流量进行测算是水文模型运行及精度校验的重要环节[6-7]。同时，研究河流基流的演变过程、演变规律和影响因素，对了解流域水资源的特性、实行最严格的水资源管理、高效利用水资源和实现水资源优化配置，具有十分重要的意义。

基流分割研究一直是水文学研究的热点问题。基于不同理论与方法，国内外学者提出了多种基流分割方法。其中应用广泛的主要有加里宁法[8]、非线性水库假设法[9-10]、SWAT 模型分割法[11-12]、HYSEP 法[13]、滑动最小值法[14-16]、数字滤波法[17-19]等。Vogel 等[20]研究表明，径流基流量的变化受到流域面积、流域坡度、退水常数等因素影响。Arnold 等[21]利用径流、气象、土地利用、土壤分类等数据通过 SWAT 和数字递归滤波法对美国密西西比河盆地的基流进行了分割，并分析了基流对该地区地下水补给的作用。Smettem 等[22]研究显示，基流的时空变化与流域的水文地质地貌条件、人类活动及生态景观格局有关，并指出森林对基流量有显著影响。白乐等[23]利用近 60 年的实测径流数据，采用递归数字滤波法进行秃尾河基流分割，并对基流的趋势性、持续性等特征进行分析，结果显示人类活动是秃尾河基流演变的主要影响因素。陈利群等[24]基于改进的加里宁基流分割法对黄河源区的基流量进行了研究，并指出年降水量决定年基流量，气温与基流量的关系呈负相关。董薇薇等[25]将平滑最小值法与平滑数字滤波法应用于祁连山疏勒河流域并分析了基流变化特征，结果表明受全球变暖影响，冰雪融水的增加和冻土的退化影响基流的变化。

新疆是亚欧大陆桥的重要枢纽，在国家对丝绸之路经济带的规划中，新疆被定位为核心区，乌鲁木齐、昌吉等“一带一路”中的重要节点城市大多位于天山北坡。天山北坡是新疆经济最发达的地区，在生态、经济等方面对新疆都有着无法比拟的影响。呼图壁河是天山北麓中段第二大河流，目前对呼图壁河流域的研究不少，但大多数主要集中在径流过

收稿日期：2016-03-28；**改回日期：**2016-05-19
资助项目：水利部公益性行业科研专项(201301103)；国家自然科学基金面上项目(41171023)
作者简介：王敬哲(1992—)，男，河南郑州人，博士研究生，主要从事水文水资源方向的研究。E-mail：wjzf-682@163.com
通信作者：刘志辉(E-mail：lzh@xju.edu.cn)

程、泥沙规律以及气候相关影响[26-28]，关于对维持生态系统健康具有极其重要意义的基流却鲜有报道。鉴于此，本文选取呼图壁河石门水文站实测日径流数据和流域气象资料，按照不同的时间尺度对呼图壁河基流量和基流指数进行计算分析，并从气候变化的角度，按不同水平年份剖析基流变化的影响因素，以期对呼图壁河流域的生态环境建设，水资源的开发利用、科学管理提供科学参考。

1 研究区概况

呼图壁河流域位于东天山北麓中段、准噶尔盆地南缘，发源于天山支脉依连哈比尔尕山北坡，属天山北坡东段水系，地理位置为 43°07′—45°20′N、86°05′—87°08′E，河道总长度 176 km[26-27]。从河源至下游，大致可以分为山地、丘陵、冲积扇、冲洪积平原 4 个地貌单元。呼图壁河上游山区河网发育较好，支流呈树枝状分布，干流位居其中。左右两岸共有一级支流 20 多条，其中除 10 条支流有冰川和永久积雪分布外，其他支流大多源于中低山区，靠冬、春季节积雪消融和夏季降水补给，属于冰雪融水和雨水混合补给的河流。年平均径流量 4.812 亿 m^3，年最大径流量 6.335 亿 m^3，年最小径流量 3.633 亿 m^3。

2 数据资料与方法

2.1 数据来源及处理

呼图壁河石门水文站（43°45′N，86°34′E）是流域内唯一的水文观测站点，石门水文站以上河道长 88 km，集水面积1 840 km^2，平均海拔2 984 m，河道纵降比 23.3%，年径流量 4.71 亿 m^3，占全河地表水量的 93.6%[28]。以石门水文站控制断面为界，断面以上为主要径流形成区，本文选取石门水文站 1978—2011 年日径流量时间序列和气象数据时间序列作为研究数据；气象数据为石门站 1978—2011 年日降水及气温数据。研究中对日径流量进行基流分割得到日基流量，由此按时间累计到年、月基流量。

2.2 研究方法

2.2.1 递归数字滤波法

递归数字滤波法在国内外近年来的基流分割研究中应用广泛，Nathan 等[29]于 1990 年首次将这种技术应用于水文研究。它的原理是将日径流数据通过数字滤波器把信号分解为高频和低频，对应地将径流过程划分为地表径流和基流，从而完成基流分割的过程。该种方法易于计算机自动实现，实用性被 Arnold 等[21]、张革等[19]验证。

其滤波方程为：

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \tag{1}$$

基流为：

$$b_t = Q_t - q_t \tag{2}$$

式中：q_t为 t 时刻地表径流；Q_t为此时的实测河川径流量；b_t为 t 时刻的基流；t 为时间，单位为 d；β 为滤波参数（$0<\beta<1$）。

根据张文娜等[15]、林凯荣[17]等研究中采用的滤波参数与研究区的气候、地质、地下水补给特点等实际情况，本研究的滤波参数 β 取 0.85，并采用第一次正向滤波所得的基流量。

2.2.2 平滑最小值法

平滑最小值法是由英国水文研究所 1980 年提出的计算基流分割的方法[30]。其基本原理是先将连续日径流序列 Q_t（$t=1,2,3,\cdots,n$；n 为序列长度）按照 5 d 为步长化分成互不重叠的块，若 n 不是 5 的整数倍，则忽略最后一个块。然后将每个块中的最小值组成一个新的序列（$q_1,q_2,q_3,\cdots,q_m$），再将这个序列中相邻的 3 个值划分为 1 个块（q_1,q_2,q_3），（q_2,q_3,q_4），（q_{t-1},q_t,q_{t+1}）。若 $Kq_t \leqslant \min(kq_{t-1},kq_{t+1})$则 qt 即为基流过程线的一个拐点（t 为径流最小值序列的长度；qt 为径流最小值序列中的第 t 个径流值；K 为乘法因子，无特殊物理意义）。按照这种算法找出整个序列的所有拐点，将这些拐点连接起来进行线性插值，若计算结果大于径流量，则取基流值等于实际径流量。研究结果表明，$K=0.9$ 时分割结果较为合理[18,31]。

3 结果与分析

在基流研究中，一般以年基流量以及基流与实测径流量的比值（即基流指数，*BFI*）来量化基流与径流之间的关系并反映河流的水源补给特性。本研究采用上述两种方法计算并分析基流与 *BFI* 的变化规律。

3.1 基流量和 *BFI* 的年内变化特征

图 1 显示了平滑最小值法和递归数字滤波法计算所得的基流量与 *BFI* 的年内变化趋势。就多年平均径流量而言，年内径流量集中在 6—8 月，这 3

个月径流量占全年径流量的 69%左右。径流量自春季末期 5 月开始增加，至夏季 7 月达到最大，然后到秋季 8—9 月开始减少，至冬季径流量最小，同时径流量也达到稳定状态，占年径流量的 4.32%。就基流量而言，春季枯水期的基流量与径流量相差无几。春季气温的迅速回升，使得季节性积雪融化，冻土融通，形成春洪，其消融过程中的产汇流远远不及暴雨洪水，虽历时较长但洪峰相对较低且退水缓慢。

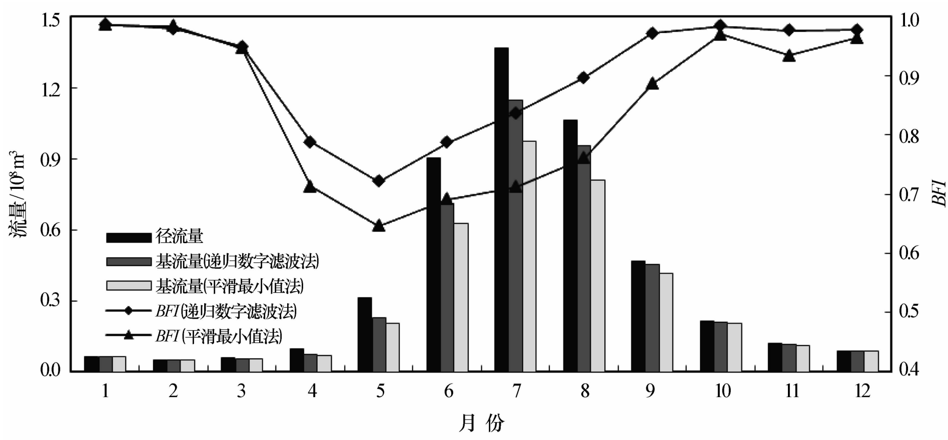

图 1　平滑最小值法与递归数字滤波法计算的基流量与 BFI 的年内变化

Fig. 1　Monthly variations of base flow and BFI from the minimum smoothing method and recursive digital filtering method

呼图壁河基流在 7 月达到峰值，秋季气温降低，可供分割的基流也随之减少，至冬季枯水期，径流量几乎等同于基流量，呈单峰型分布。每年的 4—11 月，平滑最小值法小于递归数字滤波法分割出的基流量，同时，*BFI* 也小于计算结果；12 月至翌年 3 月，这两种方法对基流的分割结果相对一致。两种方法计算所得的 *BFI* 均呈波动减小而后增加的趋势，但递归数字滤波法计算的 *BFI* 波动较小；而平滑最小值法计算的 *BFI* 波动较大。平滑最小值法与递归数字滤波法计算所得的 *BFI* 最小值均出现在 5 月，而以冬春两季为代表的枯水期，*BFI* 较大，甚至接近 1，表明枯水期的径流主要来源为基流。

3.2　基流量和 *BFI* 的年际变化特征

经过平滑最小值法与递归数字滤波法处理的呼图壁河基流变化过程及趋势如图 2 所示。由这两种方法分割所得的基流量存在一定差异，由平滑最小值法计算所得的多年平均基流量为 $3.67\times10^{8}\ m^{3}$，变化速率为 $0.23\times10^{8}\ m^{3}/10a$，而经过递归数字滤波法分割得的呼图壁河多年平均基流量为 $4.16\times10^{8}\ m^{3}$，变化速率为 $0.26\times10^{8}\ m^{3}/10a$。相对于呼图壁河年变化速率达 $0.32\times10^{8}\ m^{3}/10a$ 的径流量，基流量受包气带调蓄作用以及下渗过程等影响，年际变化相对比较缓和。呼图壁河基流量与径流量的

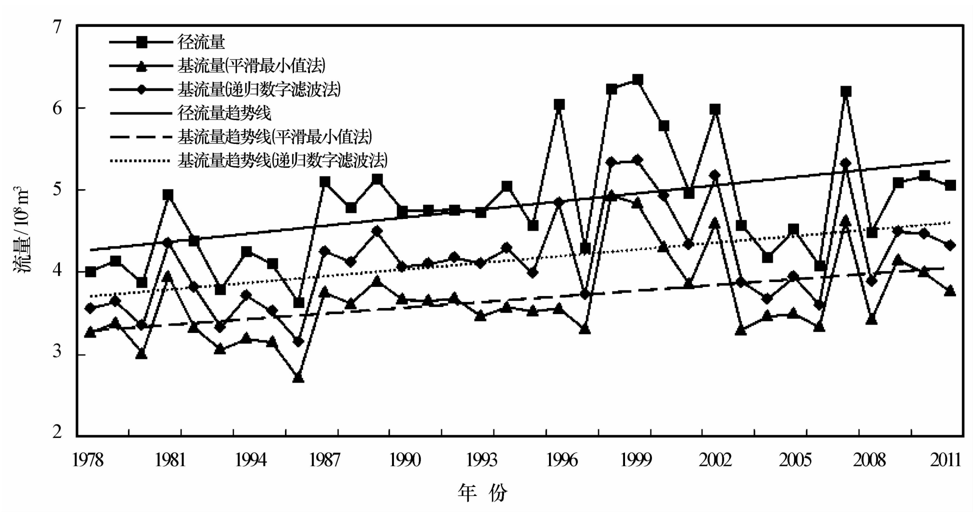

图 2　1978—2011 年呼图壁河径流量和基流量的年际变化

Fig. 2　Annual variations of runoff and baseflow in Hutubi River from 1978 to 2011

变化趋势基本一致，均呈现出缓慢增加的态势。两种方法分割出的年平均基流量与呼图壁河实际年平均径流量的 pearson 相关系数分别为 0.914 和 0.982，两种方法分割出的结果的相关系数高达 0.950（上述相关系数均通过置信水平 $\alpha=0.01$ 的显著性检验）。

两种方法计算所得的呼图壁河多年平均 *BFI* 分别为 0.78 和 0.87。*BFI* 的变化过程存在一定差异，但均呈缓慢递减的趋势（图 3）。相对于递归数字滤波法，平滑最小值法的年 *BFI* 变化幅度较大，变幅为 0.59～0.82。而递归数字滤波法分割所得呼图壁河的 *BFI* 变幅为 0.80～0.88，除了 1996 年，

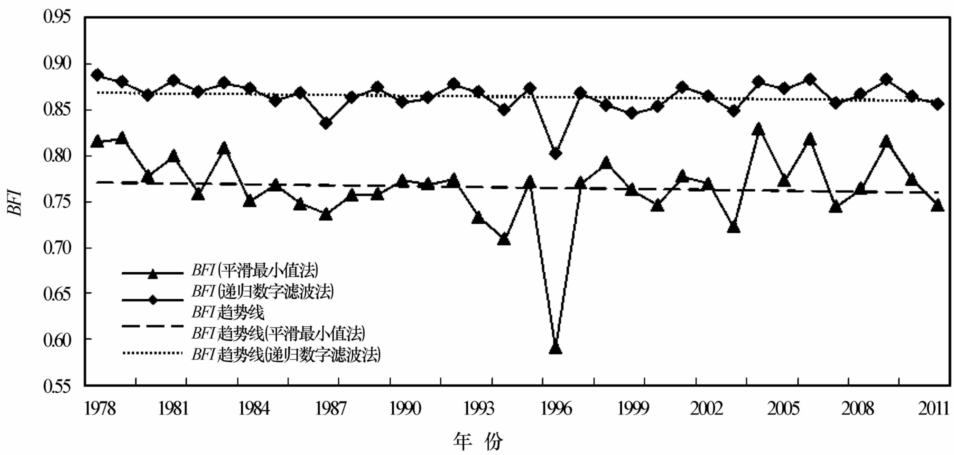

图 3　1978—2011 年呼图壁河 BFI 的年际变化

Fig. 3　Annual variations of BFI in Hutubi River from 1978 to 2011

其余年份皆在 0.87 附近变化，基流指数十分稳定。

3.3　不同水平年的基流量和 *BFI* 的变化特征

结合平滑最小值法与递归数字滤波法对呼图壁河基流分割的结果可知，两种方法分割所得的基流量与 *BFI* 存在一定差异。相对于平滑最小值法，递归数字滤波法滤波参数 β 值是通过与人工分割结果对比后给出的，只是从数值上试图使用数字滤波法来分离直接径流和基流，不能够确定不同流域的产流机制对径流的影响。因此，其物理意义有限，且受滤波参数与滤波次数的影响较大，计算结果与呼图壁河流域的实际情况存在较大差异。在呼图壁河流域，选取经过平滑最小值法计算的基流值更为准确，下文所采用的基流数据也为平滑最小值法分割所得。

根据呼图壁河径流量年际变化过程以及模比系数 K_p 值（K_p＝某年的年径流量/多年平均径流量），小于 1 为枯水年、等于 1 为平水年、大于 1 为丰水年。呼图壁河丰枯水年划分结果及平滑最小值法分割计算的年均基流量和 *BFI* 见表 1。呼图壁河的年均基流量在枯水年为 3.28×10^8 m^3，平水年和丰水年的多年平均值分别为 3.65×10^8 m^3 和 4.11×10^8 m^3。枯水年 *BFI* 最大多年平均值可达 0.78；丰水年 *BFI* 最小，其多年均值为 0.74；平水年的 *BFI* 处于两种水平年之间，多年平均 0.76。

4　基流变化的影响因素

影响基流的因素是多种多样的，从水量平衡的角度来看，区域基流量主要受水文地质条件、降水、蒸散发状况、冰雪融化过程、地表植被覆盖程度、人类活动等因素的综合影响。结合呼图壁河流域的实际情况，按照不同水平年的划分，从降水和大气温度两个方面分析其对平滑最小值法分割的呼图壁河基流的影响。

4.1　气温对基流的影响

流域内气候条件的变化在一定程度上控制着基流的变化趋势。近年来，呼图壁河流域的气候发生了较明显的变化，变化速率远大于全国及新疆同期平均值[4]。由表 2 可知，不同水平年呼图壁河春秋两季基流与气温的相关系数最大，且各年份的秋季相关系数大于春季。春秋两季，季节性冻土性状、冰川融化、积雪形态存在大幅度变化的时段，气温的变化对呼图壁河基流产生最大影响。而夏季由于大气降水补给径流，冬季河面封冻以及降水形态的原因，气温对基流的影响微弱。

而从不同的水平年分来看，丰水年的春季的相关系数最大，达 0.731，枯水年的相关系为 0.712。枯水年的秋季相关系数为0.895，呈显著相关，丰水

表 1 平滑最小值法计算的呼图壁河不同水平年的年均基流量及 *BFI*

Table 1 Annual baseflow and *BFI* in Hutubi River calculated by minimum smoothing method

枯水年	年均基流量/10^8 m^3	*BFI*	平水年	年均基流量/10^8 m^3	*BFI*	丰水年	年均基流量/10^8 m^3	*BFI*
1978	3.27	0.81	1987	3.75	0.74	1996	3.56	0.59
1979	3.39	0.82	1988	3.62	0.76	1997	3.31	0.77
1980	3.01	0.78	1989	3.89	0.76	1998	4.93	0.79
1981	3.95	0.80	1990	3.67	0.77	1999	4.83	0.76
1982	3.32	0.76	1991	3.65	0.77	2000	4.31	0.75
1983	3.06	0.81	1992	3.68	0.77	2001	3.86	0.78
1984	3.19	0.75	1993	3.47	0.73	2002	4.60	0.77
1985	3.15	0.77	1994	3.58	0.71	2007	4.62	0.74
1986	2.71	0.75	1995	3.52	0.77	2008	3.42	0.76
2003	3.30	0.72	—	—	—	2009	4.15	0.82
2004	3.46	0.83	—	—	—	2010	4.00	0.77
2005	3.49	0.77	—	—	—	2011	3.77	0.75
2006	3.34	0.82	—	—	—	—	—	—
多年平均	3.28	0.78		3.65	0.76		4.11	0.74

表 2 不同水平年基流与气温的相关系数

Table 2 The correlation relationship between baseflow and air temperature

	春季	夏季	秋季	冬季
枯水年	0.712**	0.210	0.895**	−0.037
平水年	0.689**	0.463*	0.792**	0.287
丰水年	0.731**	0.232	0.818**	0.101

** 表示相关系数通过 0.01 水平检验。

年次之达 0.818。平水年的春秋两季相关系数均为各水平年份的最小值。

各个水平年份呼图壁河流域春秋两季的气温与基流呈对数关系(图 4)，随着春季流域内气温的逐渐升高，冬季累积的大量积雪融化，季节性冻土开始融化，融雪水为该时期径流的主要补给方式。随时间推移，流域内的积雪融化完毕，冻土完全融通已至夏季。径流主要由流域内的大气降水进行补充，此时基流也达到年内的最大值。秋季则由于温度降低，蒸散发条件的改变、季节性冻土逐渐形成，大气降水的形态也由降雨转为降雪，基流随着温度的持续下降而逐渐减小。

4.2 降水对基流的影响

根据已有的研究成果[28]，呼图壁河多年降水量呈下降趋势，突变点出现在 1986 年。1978—1986 年降水量总体呈波动上升趋势，1987—2011 年降水量总体呈现波动下降趋势，且 1987—2011 年比 1978—1986 年年平均降水量增加 17.60 mm。

从表 3 可以看出，在每年的春秋两季，呼图壁河的基流与流域内降水的相关性比较大，枯水年春季降水与基流的相关系数最高(0.682)，丰水年次之(0.646)；丰水年秋季降水与基流呈显著相关，相关系数为 0.589，枯水年为 0.565，与气温对基流的影响一样，各个水平年中平水年的春秋季相关系数最小。各个水平年呼图壁河基流与降水也呈对数关系，但相关系性均弱于基流同温度的相关性(图 5)。呼图壁河呈现出明显的干旱区河流特征，即降水在夏季是基流的重要影响因素。但不同水平年份的基流与夏季降水的相关性均不甚显著，这是因为呼图壁河是主要由冰川、积雪和雨水共同进行补给的，流域内共有大小冰川 239 条，冰川总面积 72.07 km^2，冰川储量 2.353 km^3，年消融量达 0.524×10^8 m^3[27]，每年春季随着气温升高，融雪水增加，至 7 月夏季季风影响形成大面积降雨，基流量达到年内峰值。而冬季则因为气温较低，河面封冻以及降水形态的改变，导致降水与基流的相关性较低。相对降水对呼图壁河基流变化的贡献率，温度对基流量变化的影响更为显著，说明基流的补给更依赖于每年春夏两季流域山区的冰雪融水，气温是呼图壁河基流变化的关键性因素。

5 结论

本文选用平滑最小值法和递归数字滤波法对呼

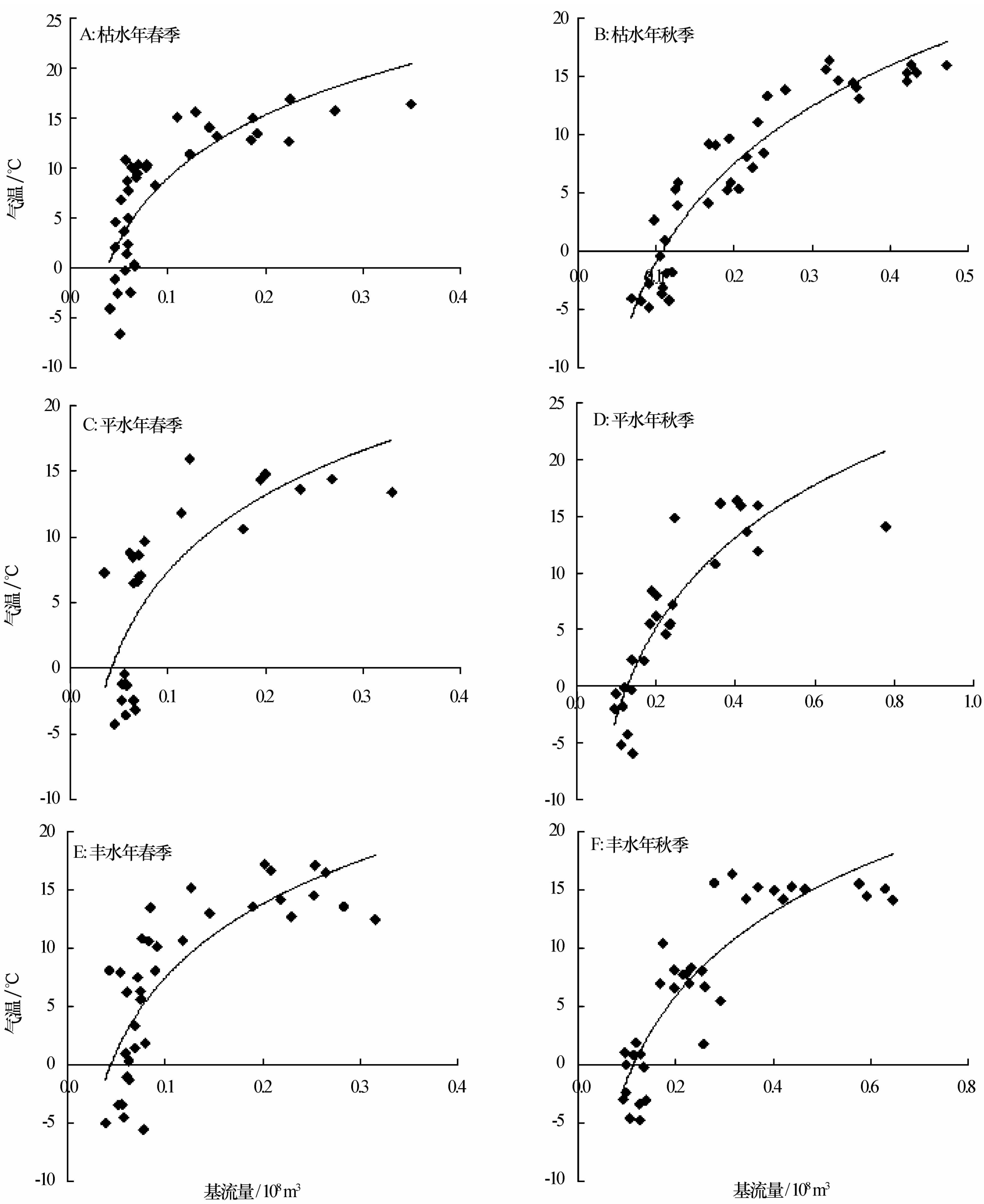

图 4 春季秋季基流与气温的关系

Fig. 4 Relationships between base flow and temperature of Hutubi River

表 3 不同水平年基流与降水的相关系数

Table 3 The correlation relationship between baseflow and precipitation

	春季	夏季	秋季	冬季
枯水年	0.682**	0.093	0.565**	0.075
平水年	0.412*	0.376	0.480*	0.062
丰水年	0.646**	0.146	0.589**	0.411

** 表示相关系数通过 0.01 水平检验。

图壁河 1978—2011 年的天然径流进行了基流分割，获得了呼图壁河的基流过程，并分析了其年均基流量、*BFI* 的年际年内变化过程，并从气温和降水两个方面分析影响呼图壁河基流变化的主要因素。

平滑最小值法与递归数字滤波法对呼图壁河基流分割的结果存在一定差异，但通过对比平滑最小值法与递归数字滤波法的分割出基流指数与基流过线，结合呼图壁河流域的实际情况，发现平滑最小值法优于递归数字滤波法。

两种方法计算的基流量和 *BFI* 的年内变化趋势相同，基流量的年内分布表现为单峰型，峰值与径流量的峰值在每年的7月同时间出现；*BFI*年内变

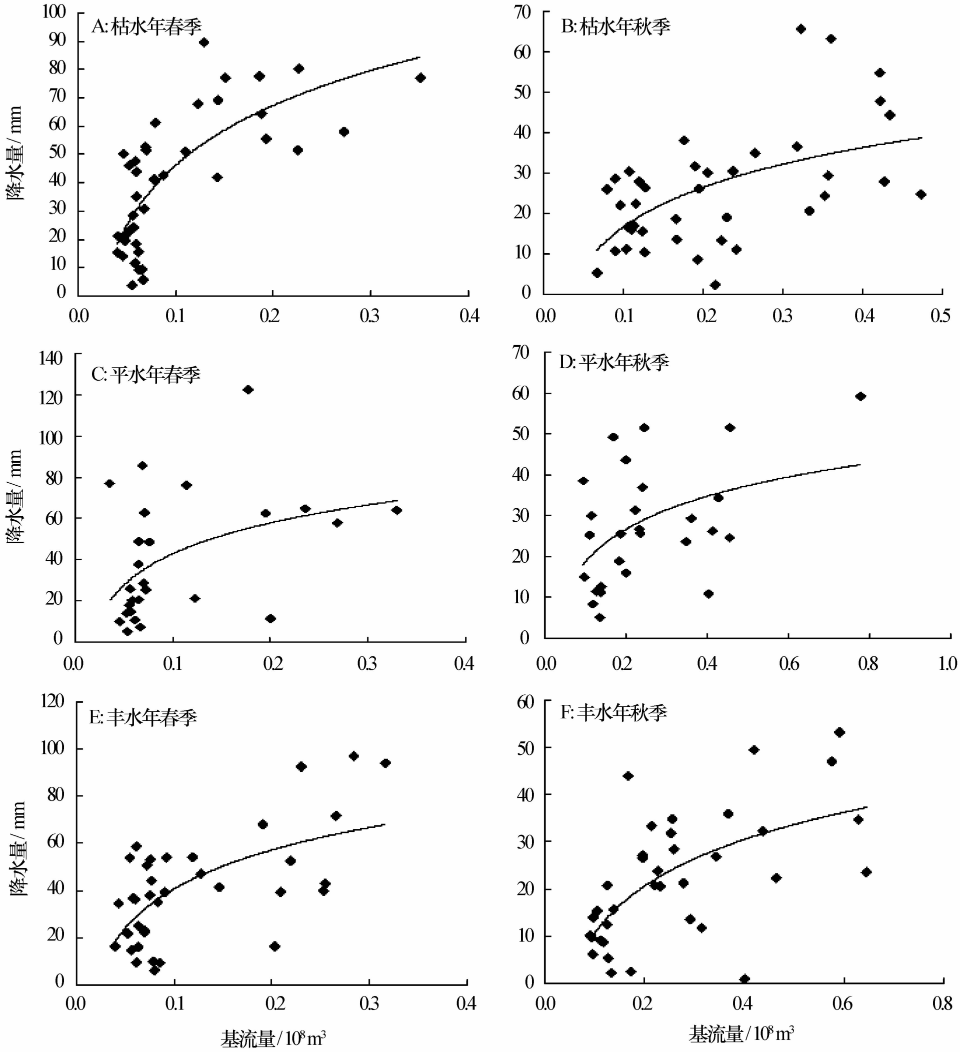

图 5　春季秋季基流与降水的关系

Fig. 5　Relationships between baseflow and precipitation of Hutubi River

化规律是先减小后增加，5 月 *BFI* 值达到年内最低，枯水期 *BFI* 较大，甚至接近 1。呼图壁河年均基流量均呈现为增加的趋势，但基流指数年际变化过程明显不同。平滑最小值法计算多年的平均基流量为 3.67×10^8 m^3，多年平均 *BFI* 为 0.78，*BFI* 的年际变化存在较大幅度的波动；递归数字滤波法分割的多年平均基流量为 4.16×10^8 m^3，其多年平均 *BFI* 为 0.87，*BFI* 较为稳定。

以平滑最小值法的计算结果为例，对呼图壁河不同水平年的基流量与基流指数进行分析，结果明显不同。呼图壁河的年基流量在枯水年、平水年和丰水年的多年平均值分别为 3.28×10^8 m^3、3.65×10^8 m^3 和 4.11×10^8 m^3；丰水年 *BFI* 最小为 0.74，枯水年为 0.78，平水年位于二者之中为 0.76。

春秋两季流域内的气温对呼图壁河基流量的影响最大，呈明显对数关系，且各年份的秋季相关系数大于春季。春季，丰水年的相关系数为 0.731，枯水年为 0.712。秋季枯水年的相关系数为 0.895，丰水年为 0.818。平水年的相关系数均为各水平年份的最小值。各个水平年呼图壁河基流与降水也呈对数关系，但其的相关系性均弱于基流与温度的相关性，说明气温是呼图壁河基流变化的关键性因素。

参考文献：

[1]　党素珍，王中根，刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. 资源科学，2011，33(12)：2232－2237.

[2]　Mwakalila S, Feyen J, Wyseure G. The influence of physical catchment properties on baseflow in semi-arid environments [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(2): 245－258.

[3]　Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods

[J]. Journal of Hydrology,2008,352(1):168－173.

[4] 陈利群,刘昌明,李发东.基流研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):1－15.

[5] 雷泳南,张晓萍,张建军,等.窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J].生态学报,2013,33(5):1559－1568.

[6] Abdulla F A,Lettenmaier D P,Liang X. Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data[J]. Journal of Hydrology,1999,222(1):37－54.

[7] 刘希胜,李其江,段水强,等.黄河源径流演变特征及其对降水的响应[J].中国沙漠,2016,36(6):1721－1730.

[8] 陈利群,刘昌明,杨聪,等.黄河源区基流估算[J].地理研究,2006,25(4):659－665.

[9] 林凯荣,张文华,郭生练.流量过程线分割的新方法——应用分析[J].水文,2006,26(4):15－20.

[10] 熊立华,郭生练.采用非线性水库假设的基流分割方法及应用[J].武汉大学学报:工学版,2005,38(1):27－29.

[11] 李成六.基于SWAT模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D].兰州:兰州大学,2011.

[12] 程磊,徐宗学,罗睿,等.SWAT在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例[J].地理研究,2009 (1):65－73.

[13] 李姝蕾,鲁程鹏,李伟,等.长江螺山站50年来基流演变趋势分析[J].水资源与水工程学报,2015,25(5):128－131.

[14] 豆林,黄明斌.自动基流分割方法在黄土区流域的应用研究[J].水土保持通报,2010,30(3):107－111.

[15] 张文娜,刘志辉,王荣军,等.数字滤波法在天山北坡军塘湖河流域流量基流分割中的应用[J].干旱区研究,2015,32(1):35－39.

[16] 黄国如.流量过程线的自动分割方法探讨[J].灌溉排水学报,2007,26(1):73－78.

[17] 林凯荣,陈晓宏,江涛,等.数字滤波进行基流分割的应用研究[J].水力发电,2008,34(6):28－30.

[18] 崔玉洁,刘德富,宋林旭,等.数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J].水文,2011,31(6):18－23.

[19] 张革,刘德富,宋林旭,等.不同基流分割方法在香溪河流域的应用对比研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):164－171.

[20] Vogel R M,Kroll C N. Estimation of baseflow recession constants[J]. Water Resources Management,1996,10(4):303－320.

[21] Arnold J G,Muttiah R S,Srinivasan R,et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin[J]. Journal of Hydrology,2000,227(1):21－40.

[22] Smettem K,Underwood S,Callow N. Impacts of land use and climate change on baseflow in catchments along the south coast of Western Australia[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts. 2014,16:3187.

[23] 白乐,李怀恩,何宏谋.降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J].自然资源学报,2014,29(12):2078－2088.

[24] 陈利群,刘昌明,郝芳华,等.黄河源区基流变化及影响因子分析[J].冰川冻土,2006,28(2):141－148.

[25] 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):661－669.

[26] 王敬哲,刘志辉,姚俊强,等.呼图壁河水沙年内分配特征及同步性变化分析[J].水土保持研究,2016,23(5):152－157.

[27] 耿峻岭,高玲,陈建江,等.新疆呼图壁河流域水文特征分析[J].干旱区研究,2005,22(3):371－376.

[28] 聂敏,刘志辉,刘洋,等.基于PCA和BP神经网络的径流预测[J].中国沙漠,2016,36(4):1144－1152.

[29] Nathan R J,Mc Mahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses [J]. Water Resources Research,1990,26:1465－1473.

[30] Aksoy H,Kurt I,Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method[J]. Journal of Hydrology,2009,372(1):94－101.

[31] 董晓华,邓霞,薄会娟,等.平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较[J].三峡大学学报:自然科学版,2010,32(2):1－4.

Variation of the Baseflow and Its Causes of Hutubi River

Wang Jinzhe[1ab], Liu Zhihui[1acd], Tashpolat·Tiyip[1ab], Zhang Wenna[2]

(1.a.*School of Resources and Environment Science*/b.*Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education*/c.*Institute of Arid Ecology and Environment*/d.*International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*; 2.*Xinjiang Environmental Monitoring Centre, Urumqi* 830011, *China*)

Abstract: Based on daily runoff data of Hutubi River Shimen station, the smoothed minimum method and recursive digital filter were used for base flow separation, the recursive digital filter and smoothed minimum method were used for base flow separation. Annual and interannual variations in baseflow, baseflow index (*BFI*), and the variations in *BFI* for different water level years in Hutubi River basin as well as the main controlling factors (temperature and precipitation) were investigated in different time scales. It is found that the smoothed minimum method is more suitable than recursive digital filter in the study area. Annual distribution of baseflow is in unimodal type, with the maximum value appearing in July, the *BFI* distribution in a year , with the minimum *BFI* value in May. *BFI* is close to 1 in dry year. The average annual base flow is 3.67×10^8 m^3. The base flow is increasing in the Hutubi river. The base flow index is 0.78 in the study area, it is in slowly decreasing trend. Averaged *BFI* from the smoothed minimum method in dry years, average years, and wet years were 0.78, 0.76 and 0.74, respectively. Temperature and precipitation are two important factors, and their importance to baseflow varies with seasons in different water level years. The results implied that the effect of temperature on baseflow was higher than that of precipitation in spring and autumn. Temperature plays a leading role in the effects on baseflow in spring and autumn, and temperature is a key affecting factor on baseflow of Hutubi River.

Key words: baseflow; base flow index; smoothed minimum method; Hutubi River; Northern Slope of the Tianshan Mountains; climate change