



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.005

赵韦, 李占玲, 王月华. 黑河流域上游山区基流量分割及其变化[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 26-31. ZHAO Wei, LI Zhan ling, WANG Yue hua. Separation and characteristics of base flow in the upper reaches of Heihe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 26-31. (in Chinese)

黑河流域上游山区基流量分割及其变化

赵 韦, 李占玲, 王月华

(中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 基于黑河上游莺落峡站 1954 年- 2011 年径流资料, 采用数字滤波法多种滤波方程对月流量资料进行基流分割; 在此基础上, 借助 Mann Kendall、Pettitt、流量不稳定系数、累积距平等方法分析研究区基流和基流指数(BFI) 在年内、年际以及多年时间尺度上的变化特征。结果表明, 数字滤波法分割的基流能较好地反应出不同月份之间基流量的差异及其年内变化特征; 研究区夏季基流量最大, 其次是春季和秋季, 冬季基流量最小; BFI 最小值出现在夏季, 冬季 BFI 最大; 基流量和径流量的年际变化趋势大体一致, 均呈缓慢增长趋势, 但基流变化相对缓和, 且比较平稳; 基流量序列在 1979 年存在显著变点, 变点后基流量较变点前增加 16%; 多年变化中基流对径流的贡献变化幅度不大, BFI 基本维持在 0.27 左右。

关键词: 基流; 基流分割; 基流指数; 黑河流域

中图分类号: P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0026-06

Separation and characteristics of base flow in the upper reaches of Heihe River Basin

ZHAO Wei, LI Zhan ling, WANG Yue hua

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Base on the monthly runoff data from 1954 to 2011 in the upper reaches of Heihe River Basin, the digital filter method was used for the base flow separation, together with the traditional methods of minimum monthly average flow rate in the last 10 years and the 90% guarantee rate of the minimum average flow. The inner annual, inter annual and decadal variations in base flow and base flow index were investigated by means of Mann Kendall test, Pettitt test and cumulative departure curve methods. The results showed that the digital filter method could give a satisfactory result of base flow separation over the study area. The inner annual base flow index increased first and then decreased and had a big degree of variability. In the inter-annual variations, the trends of the base flow were consistent with those of the runoff, and the degree of discretization of the base flow was relatively low. Although the base flow had a rising trend, the change was relatively mild, and relatively stable. A significant change point was found for the base flow time series in 1979, and the average base flow after the change point increased by 16% compared with the former period. In the decadal scales, the contribution of the base flow to the runoff was not variable, with the decadal base flow index approaching 0.27.

Key words: base flow; base flow separation; base flow index; Heihe River Basin

收稿日期: 2016-12-30 修回日期: 2016-03-15 网络出版时间: 2016-08-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.1933.004.html>

基金项目: 北京高等学校青年英才计划项目(YETP0654); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(35832015028)

Fund: Beijing Higher Education Yong Elite Teacher Project (YETP0654); Fundamental Research Funds for the Central University (35832015028)

作者简介: 赵 韦(1989), 女, 山东人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 2105140008@cugb.edu.cn

通讯作者: 李占玲(1980), 女, 内蒙古人, 副教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zhanling.li@cugb.edu.cn

基流是地下水补给河流的水量,对维持河川径流和流域水量平衡、开展流域水资源规划等方面都具有重要作用。在干旱半干旱地区,基流也是流域最重要的枯季水文特征之一。黑河流域位于我国西北干旱地区,黑河上游是黑河流域的主要产水区,分析黑河上游山区基流的变化趋势,不仅对于揭示当地地表水和地下水相互作用过程具有重要意义,同时,对深入了解内陆河流域水资源特性、合理开发利用和保护水资源、促进干旱区生态环境保护等方面都具有重要的指导意义^[1-2]。

基流分割是水文学研究的重点。基流分割的方法多种多样。近年来,数字滤波法、平滑最小值法、基流指数法、时间步长法和水文模型法等逐渐成为基流分割的主要方法^[3-7]。源于信号处理技术的数字滤波法,虽然参数物理意义不明确^[8],但由其计算得到的基流量值满足基流所具备的基本特征,并且该方法具有客观、可重复、易操作的特点,因此在实践中大量应用并得到认可^[9]。Liu等^[10]基于递归数字滤波法对美国密歇根州17个流域的年基流量进行了分析和讨论;Fan等^[11]在中国西北的阿克苏河采用数字滤波法对流域径流序列进行了基流分割;董薇薇^[12]等应用递归数字滤波法分析了祁连山疏勒河上游的基流量变化;党素珍^[13]等采用数字滤波法对黑河上游进行了基流分割并分析了基流的变化特征;豆林等^[14]在对黄土区流域内的河流进行基流分割时发现,数字滤波法分割的基流过程与实际基流状况更为相符,可作为黄土区流域基流分割的最优方法;董晓华等^[15]利用平滑最小值法和数字滤波法对三峡水库日入库流量进行基流分割,结果表明,数字滤波法优于平滑最小值法,所得的地下径流更平滑,更符合流量过程线退水段的物理规律;张文娜等^[16]也认为,从分割后基流指数的稳定性和基流过程线的合理性来看,数字滤波法较平滑最小值法更优。Teimouri等^[17]在阿塞拜疆省西部河流用双参数数字滤波法估计基流指数,结果表明该方法的计算结果比其他方法更适合研究区。本文结合前人的研究经验,运用数字滤波法对黑河上游山区径流量进行基流分割,并与其他传统方法进行比较;在此基础上,对研究区基流量的变化特征进行探讨。

1 研究区概况和数据资料

黑河是我国西北地区第二大内陆河,地处干旱、半干旱区。发源于祁连山北麓,流域范围介于38°N-42°N,98°E-101°30'E之间,干流全长821

km,流域面积14.29万km²。黑河出山口莺落峡水文站以上为流域上游地区,是流域的产流区,集水面积约1.0万km²。上游地区下垫面植被良好,气候阴寒湿冷,为典型的大陆性季风气候,年降水量350mm,多年平均气温不足2℃;降水量随高程的增加而增加,气温随高程的增加而递减。春季上游山区径流以积雪融水和地下水补给为主;夏、秋季以降水补给为主,同时随气温升高,少量冰川融水加入;秋末、冬季部分降水则以固态形式存储在流域内。根据地下水形成条件、储存特点和分布规律,黑河上游地下水分为多年冻土水和基岩裂隙水,是该流域基流的主要来源^[8]。

以黑河流域上游莺落峡水文站(38°48'N,100°11'E,高程1710m)1954年-2011年月径流资料(1988年-1989年资料缺失)为基础,对黑河上游山区的流量过程进行基流分割,并分析其变化特征。

2 研究方法

数字滤波技术是将流域降雨-径流过程中快速响应和慢速响应信号通过数字滤波器分解为高频信号和低频信号,对应地将径流过程划分为地表径流和基流^[18-21]。Nathan和McMahon在1990年首次将数字滤波技术应用到基流分割中^[16,22-25]。基流分割方程(F1)为:

$$Q_{dt} = f_1 Q_{d(t-1)} + \frac{(1+f_1)}{2} [Q_t - Q_{(t-1)}] \\ Q_{bt} = Q_t - Q_{dt} \quad (1)$$

式中: Q_{dt} 和 $Q_{d(t-1)}$ 分别为第 t 和 $t-1$ 时刻的地表径流; Q_t 和 $Q_{(t-1)}$ 分别为第 t 和 $t-1$ 时刻的径流; Q_{bt} 为第 t 时刻的基流; f_1 为滤波系数,通常取值为0.95。Chapman于1991年对方法(F1)进行了改进,改进后的基流分割方程(F2)为:

$$Q_{dt} = \frac{3f_1-1}{3-f_1} Q_{d(t-1)} + \frac{2}{3-f_1} (Q_t - f_1 Q_{(t-1)}) \\ Q_{bt} = Q_t - Q_{dt} \quad (2)$$

Chapman和Maxwell于1996年把基流假定为同时刻的地表径流和前一时刻基流的加权平均,提出了以下基流分割方程(F3):

$$Q_{bt} = \frac{f_1}{2-f_1} Q_{b(t-1)} + \frac{1-f_1}{2-f_1} Q_t \quad (3)$$

为使基流分割更为平滑,Chapman又对方程(F3)进行了改进,改进后的基流分割方程(F4)为:

$$Q_{bt} = \frac{f_1}{1+f_2} Q_{b(t-1)} + \frac{f_2}{1+f_2} Q_t \quad (4)$$

式中: f_2 为固定值,文中取0.15。在采用数字滤波法进行基流分割时,需要结合基流和径流性质,即需

要满足 $Q_{u_i} \geq 0, Q_{d_i} \geq 0, Q_t \geq Q_{b_i}, Q_t \geq Q_{d_i}$ 。为了提高计算精度, 往往需对流量数据进行多次反复滤波。第一次滤波是以第二个记录数为起点依次向后做正向运算, 第二次滤波是在第一次滤波基础之上, 以倒数第二个数据为起点做反向计算, 第三次滤波同理正向运算, 依次滤波。

3 结果分析与讨论

3.1 基于数字滤波法的基流分割

采用滤波方程 F1、F2、F3、F4 分别对黑河上游莺落峡水文站的流量序列进行基流分割。四个滤波方程每次正反滤波得到的研究区多年平均基流量如图 1 所示, 图中横坐标“正、反”分别表示“正向运算”和“反向运算”, 数字则表示滤波次数。可以看出, 每次滤波后得到的基流量都有所减少。F1 方程第四次反向滤波得到研究区多年平均基流量 $14.97 \text{ m}^3/\text{s}$, F4 方程第二次反向滤波得到多年平均基流量 $15.76 \text{ m}^3/\text{s}$, F2 和 F3 滤波方程经过一次反向滤波即可得到较小的基流量 ($10.74 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $12.41 \text{ m}^3/\text{s}$)。由此可见, F2 和 F3 滤波方程可以更加快速、高效地从总流量序列中分割出基流量。根据赵良菊等人^[26]的研究结果, 黑河上游山区冬季地表径流量主要以基流为主, 因此可以以该区冬季地表径流量的多年平均值为依据来推估基流量的大小。通过计算, 研究区冬季地表径流量的多年平均值为 $14.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 与文中 F1 滤波方程正反四次滤波结果、F2 和 F3 方程正反一次滤波结果以及 F4 方程正反两次滤波结果接近。为避免单一方程对基流分割结果的影响, 文中以四个滤波方程基流分割结果的算术平均值作为研究区最终基流量。

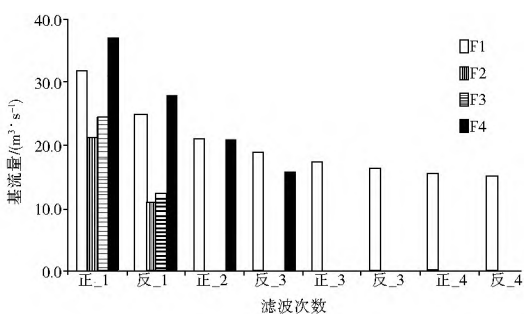


图 1 基于数字滤波法四种滤波方程不同滤波次数的黑河上游山区多年平均基流量

Fig. 1 Average annual base flow in the upper reaches of Heihe River basin from four filtering equations and different filtering times with the digital filter method

表 1 给出了由数字滤波法以及传统方法确定的研究区基流量。近 10 年最小月平均流量法得到的

研究区基流量是 $13.29 \text{ m}^3/\text{s}$, 90% 保证率最小月平均流量法得到的基流量是 $12.95 \text{ m}^3/\text{s}$ 。数字滤波法得到的基流量最小值 $12.56 \text{ m}^3/\text{s}$, 出现在 1 月份; 最大值 $13.92 \text{ m}^3/\text{s}$, 出现在 7 月份, 全年平均月基流量 $13.47 \text{ m}^3/\text{s}$ 。比较而言, 数字滤波法分割的基流能更好地反应出不同月份之间基流量的差异性及其年内变化特征。

表 1 黑河上游多年平均月基流量
Tab. 1 Average monthly base flow in the upper reaches of Heihe River basin

月份	数字滤波法	近 10 年最小月平均流量法	90% 保证率最小月平均流量法
1	12.56	13.29	12.95
2	12.91	13.29	12.95
3	13.37	13.29	12.95
4	13.61	13.29	12.95
5	13.73	13.29	12.95
6	13.85	13.29	12.95
7	13.92	13.29	12.95
8	13.89	13.29	12.95
9	13.75	13.29	12.95
10	13.55	13.29	12.95
11	13.37	13.29	12.95
12	13.16	13.29	12.95

3.2 基流量和 BFI 年内变化特征

图 2 给出了研究区多年平均月基流量的年内变化。可以看出, 研究区基流量在年内表现为先微小增加、然后微小减小的过程; 夏季基流量最大, 其次是春季和秋季, 冬季基流量最小。相比径流量的年内变化, 基流量的年内变化更为平稳。图 2 还给出了研究区多年平均月基流指数 (Base Flow Index, 简称 BFI) 的年内变化过程线。其中, BFI 是指流量序列中的基流量与总径流量的比值, 它可以反应河流的水源补给特性; 基流指数大, 说明河流受地下水和壤中流的补给量大。研究区 BFI 的年内变化过程是先减小后增加; 冬季 BFI 最大, 其次是春季和秋季, 夏季最小; 表明冬季基流量对径流总量的贡献大, 河流受地下水和壤中流的补给量大, 受降水影响相对较小。

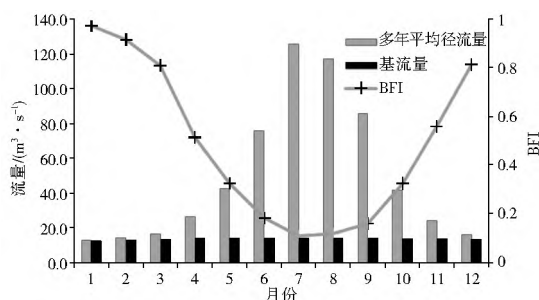


图 2 基于数字滤波法的黑河上游地区多年平均月基流量和 BFI 的年内变化

Fig. 2 Inner annual variations of average monthly base flow and BFI in the upper reaches of Heihe River basin with the digital filter method

3.3 基流量和 BFI 年际变化特征

图 3 显示了研究区基流量的年际变化特征。可以看出,基流量呈现缓慢增长趋势。进一步根据 Mann-Kendall 方法对研究区基流量的单调变化趋势进行检验,结果表明,基流量序列在 0.01 显著性水平下呈现上升趋势。同时,对径流量序列的年际变化进行趋势性检验,结果表明径流与基流变化趋势大体一致,也呈增长趋势;但相对于径流量,基流量的变化幅度较小。这是由于径流对外界条件的变化比较敏感,而基流主要受包气带调蓄作用和地下水补给的影响,对外界条件的变化相对不敏感。为进一步分析基流量序列和径流量序列在年际变化方面的差异性,文中分别计算了这两个时间序列的离差系数 C_v 和不稳定系数。 C_v 可以用来表示随机变量对其均值的相对离散程度,系数越大则越为离散^[27]。不稳定系数是最大年径流量(或最大年基流量)与最小年径流量(或最小年基流量)的比值,可以用来表征流量序列年际变化的稳定性,该系数越大,说明流量序列年际变化越不稳定。通过计算得到研究区基流量序列和径流量序列的离差系数分别为 0.10 和 0.16,不稳定系数分别为 1.58 和 2.12。这说明虽然基流量序列和径流量序列在年际变化上均呈上升趋势,但基流量的年际变化相对缓和,且比较平稳。研究区基流量和径流量序列呈上升趋势与我国西部地区降水增加是密不可分的^[28]。除了降水增加对径流的影响外,气温升高也对径流变化有着重要影响。有研究表明,在黑河上游山区,气温升高对径流的影响程度与降水增加对径流的影响程度相当,均高达 40% 以上^[29]。一方面,气温升高加速黑河上游冰川消融,从而形成更多融雪径流;另一方面,气温升高还会导致黑河上游冻土活动层增厚,从而增加土壤蓄水容量,进一步影响流域的径流量和基流量变化^[29]。研究区多年平均 BFI 为 0.27,变幅为 0.20~0.31,变化相对稳定,表明在年际尺度上,基流量对径流总量的贡献变化不大。

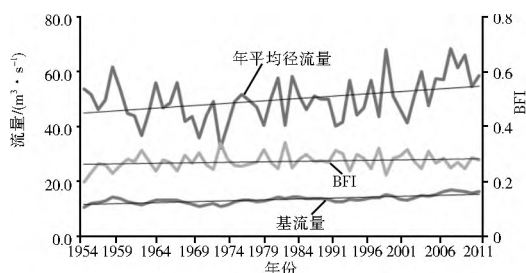


图 3 黑河上游径流量、基流量和 BFI 年际变化

Fig. 3 Inter annual variations of runoff, base flow and BFI in the upper reaches of Heihe River basin

图 4 给出了采用 Pettitt 方法对研究区基流量进行变点特征检验时统计量 $U_{i,N}$ 随时间变化的曲线。图中两条虚线对置信度水平为 95% 的临界值。可以看出,在 1979 年统计量 $U_{i,N}$ 出现最大值,且超出了 95% 置信度水平下的临界值,因此研究区基流量序列在 1979 年存在显著变点。通过计算得到 1954 年-1979 年研究区多年平均月基流量为 $12.41 \text{ m}^3/\text{s}$,1980 年-2011 年多年平均月基流量为 $14.39 \text{ m}^3/\text{s}$,变点后基流量序列较变点前呈现较明显的增长趋势,增加幅度达到 16%。

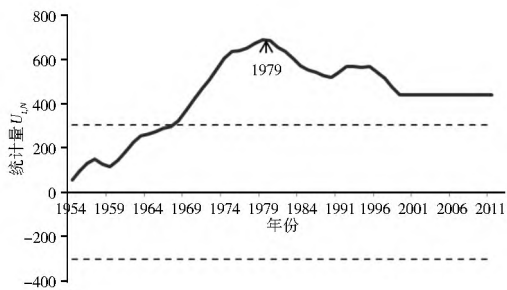


图 4 黑河上游基流量时间序列的突变检验

Fig. 4 Change point tests of base flow in the upper reaches of Heihe River basin

3.4 基流量和 BFI 多年变化特征

通过分析研究区基流量的累积距平曲线(图 5),也可以发现 1979 年前后研究区基流量序列存在明显的变化。由图 5 可以看出,基流量序列大体可以分为 1 个偏少期和 1 个偏多期;1954 年-1979 年累积距平曲线波动下降,为基流量偏少期,持续 26 年,负距平占 92.3%,1979 年负距平为历史最低值;1980 年-2011 年累积距平曲线波动上升,为基流量偏多期,持续 32 年,正距平占 75%,2011 年正距平达历史最高值。

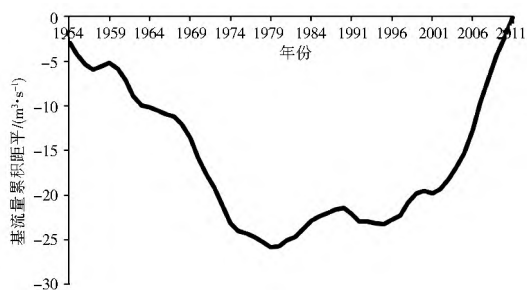


图 5 黑河上游莺落峡站基流量时间序列的累积距平变化曲线

Fig. 5 Cumulative departure curve of base flow in the upper reaches of Heihe River basin

黑河上游径流量、基流量以及 BFI 的年代际变化特征见表 2。20 世纪 60 年代和 70 年代研究区径流量和基流量偏少,其余年代偏多。除 20 世纪 90 年代外,70 年代以后研究区径流量和基流量的年代际均值总体呈现上升趋势。2000 年-2009 年径流

量和基流量比多年平均值增加了 9% 和 10%; 2010 年- 2011 年径流量和基流量比多年平均值增加了 11% 和 16%, 达到了历史最高值。BFI 在 20 世纪

50 年代偏小, 其余年代比较接近且较为稳定; 在多年变化中, BFI 基本维持在 0.27 左右, 表明基流对径流的贡献变化幅度不大。

表 2 黑河上游径流量、基流量以及 BFI 的年代际变化特征

Tab. 2 Decadal variations of runoff, baseflow and BFI in the upper reaches of Heihe River basin

要素	20 世纪					2000 年- 2009 年	2010 年- 2011 年
	50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代		
年均径流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	52.83	46.37	44.00	50.67	49.93	55.66	56.54
年均基流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	12.67	12.53	12.13	13.99	13.64	15.15	15.96
BFI	0.24	0.27	0.28	0.28	0.27	0.27	0.28

4 结论

本文选用数字滤波法对黑河流域上游莺落峡水文站多年月径流量进行基流分割, 得到了莺落峡站基流过程序列, 并讨论了不同时间尺度上研究区基流量序列以及 BFI 的变化特征。

数字滤波法中四个滤波方程在基流分割结果上比较接近, 但滤波效率存在较大差异, 文中综合四个滤波方程基流分割结果的算术平均值作为研究区的基流量; 与近 10 年最小月平均流量法、90% 保证率最小月平均流量法相比, 数字滤波法分割的基流能更好地反应出其年内变化趋势。在年内变化上, 夏季基流量最大, 冬季基流量最小; BFI 年内变化与基流年内变化相反, 夏季 BFI 最小, 而冬季 BFI 最大。在年际变化上, 基流量呈现缓慢增加趋势, 与径流量的变化相比, 基流量变化更为缓和。研究区基流量和径流量的增加与我国西部地区近些年来降水增多、气温升高等因素密不可分。基流量序列在 1979 年突变最为明显, 1979 年以前基流量处于偏少期, 1979 年以后基流量处于偏多期。在多年时间尺度上, 1970 年代以后研究区基流量的年代际均值呈现上升趋势; BFI 基本稳定在 0.27 左右, 多年变化幅度不大。

参考文献(References):

[1] 李占玲, 徐宗学. 黑河上游山区径流变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 51-55. (LI Zhan ling, XU Zong xue. Characteristics of runoff time series for the upper reaches of heihe river basin. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9): 51-55. (in Chinese))

[2] 陈学林. 2000-2004 年黑河流域生态调水[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 104-108. (CHEN Xue lin. The ecological water dispatching in the Heihe River from 2000 to 2004[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 104-108. (in Chinese))

[3] 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. (CHENG Li qun, LIU Chang ming, LI Fa dong. Reviews on base flow researches[J], 2006, 25(1): 1-15. (in Chinese))

[4] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49: 175-179. (YU Song yan, XU Zong xue, WU Wei. Ecological base flow in the Guanzhong reach of the Wei river estimated by using different hydrological methods[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49: 175-179. (in Chinese))

[5] 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. (BAI Le, LI Hua en, HE Hong mou. Assessing the Impacts of Precipitation and Human Activities on Base Flow in the Middle Tuwei River Basin of the Yellow River[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2078-2088. (in Chinese))

[6] 靳美娟. 渭河宝鸡段河流生态需水量估算[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 65-68. (JIN Mei juan. Estimation analysis of ecological water demand in Baoji section of Weihe River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 65-68. (in Chinese))

[7] 徐德伟, 单威, 孙皓, 等. 黄河源区基流变化及其植被响应研究[J]. 地下水, 2014, 36(5): 120-122. (XU De wei, SHAN Wei, SUN Hao, et al. Changes of base flow in the source region of Yellow river and the response of its vegetation[J]. Groundwater, 2014, 36(5): 120-122. (in Chinese))

[8] Zhang R, Li Q, Chow T L, et al. Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(18): 2659-2665.

[9] 钱开铸, 吕京京, 陈婷, 等. 基流计算方法的进展与应用[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 20-25. (QIAN Kai zhu, LV Jing jing, CHEN Ting, et al. A review on base flow calculation and its application[J]. 2011, 38(4): 20-25. (in Chinese))

[10] Liu J, Zhang Y, Ahlstrom L, et al. Regression Modeling of Baseflow and Baseflow Index for Michigan USA[J]. Water, 2013, 5(4): 1797-1815.

[11] Fan Y, Chen Y, Li W. Increasing precipitation and baseflow in Aksu River since the 1950s[J]. Quaternary International, 2014, 336: 26-34.

[12] 董薇薇, 丁永健, 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. (DONG Weiwei, DING Yongjian, WEI Xia. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule River in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 661-669. (in Chinese))
- [13] 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. (DANG Suzhen, WANG Zhonggen, LIU Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin[J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese))
- [14] 豆林, 黄明斌. 自动基流分割方法在黄土区域的应用研究[J]. 水土保持通报, 2010, 03: 107-111. (DOU Lin, HUANG Mingbin. Applied study of baseflow separation methods in watersheds of loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 107-111. (in Chinese))
- [15] 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. (DONG Xiaohua, DENG Xia, BO Huijuan, et al. A comparison between smoothed minima and digital filtering methods applied to catchment baseflow separation[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(2): 1-4. (in Chinese))
- [16] 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, 34(1): 35-39. (ZHANG Wenana, LIU Zhihui, WANG Rongjun, et al. Application of digital filtering theory in baseflow separation of Juntanghu River Watershed in Northern Slope of the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2015, 34(1): 35-39. (in Chinese))
- [17] Teimouri M, Ghanbarpour M R, Bashirgonbad M, et al. Comparison of Baseflow Index in Hydrograph Separation with Different Methods in Some Rivers of West Azarbaijan Province[J]. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 2011, 16(57): 219-228.
- [18] 祖明娟, 管仪庆, 张丹蓉, 等. 海流兔河近 50 年来基流变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 38-42. (ZU Mingjuan, GUAN Yiqing, ZHANG Danrong, et al. Analysis of base flow variation characteristic in Hailitu River in past 50 years[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(3): 38-42. (in Chinese))
- [19] 陈蕊, 邵东国, 吴俊校, 等. 广东省河道生态基流定量分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 92-95. (CHEN Han, SHAO Dongguo, WU Junxiao, et al. Research on the quantitative analysis of ecological base flow in Typical River sections of Guangdong Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 92-95. (in Chinese))
- [20] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量研究[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 1-11. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 1-11. (in Chinese))
- [21] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4826-4834. (ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River Basin with hydrological alterations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4826-4834. (in Chinese))
- [22] 朱明勇, 党海山, 谭淑端, 等. 湖北丹江口水库库区降雨侵蚀力特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 837-842. (ZHU Mingyong, DANG Haishan, TAN Shuduan, et al. Rainfall erosivity in the Danjiangkou Reservoir Region, Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(9): 837-842. (in Chinese))
- [23] Santhi C, Allen P M, Muttiah R S, et al. Regional Estimation of Baseflow for the Conterminous United States by Hydrologic Landscape Regions[J]. Journal of Hydrology, 2008, 35(1-2): 139-153.
- [24] Arnold J G, Allen P M. Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge from Streamflow Records[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 411-424.
- [25] 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. (CUI Yujie, LIU Defu, SONG Lixu, et al. Application of digital filtering theory in baseflow separation in Xiangxi River watershed of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 18-23. (in Chinese))
- [26] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. 科学通报, 2011, 56(1): 58-67. (ZHAO Liangju, YIN Li, XIAO Honglang, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin[J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(1): 58-67. (in Chinese))
- [27] 姚晓蔚, 唐晓丹, 董静, 等. 徐州市降水特征及频率分析[J]. 赤峰学院学报: 自然科学版, 2011, 27(10): 103-105. (YAO Xiaowei, TANG Xiaodan, DONG Jing, et al. Precipitation characteristics and frequency analysis of Xuzhou City[J]. Journal of Chifeng College: Natural Science Edition, 2011, 27(11): 103-105. (in Chinese))
- [28] 郭慧, 李栋梁, 林纾, 等. 近 50 多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1165-1175. (GUO Hui, LI Dongliang, LIN Shu, et al. Temporal and spatial variation of precipitation over western China during 1954-2006[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1165-1175. (in Chinese))
- [29] 王宇涵, 杨大文, 雷慧阁, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析[J]. 水力学报, 2015, 46(9): 1064-1071. (WANG Yuhuan, YANG Dawen, LEI Huijie, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1064-1071. (in Chinese))