

# 黑河流域莺落峡站河道内生态需水研究

邹悦, 张勃

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:**生态需水是当前水问题研究中的一个热点问题,对于生态环境急剧恶化的内陆干旱区来说,这一研究尤为紧迫。气候变化及人类活动导致水文变异,进而改变了当地生态系统的水文及生态平衡状况。文章采用黑河流域莺落峡站1947-2006年月径流序列资料,运用差积曲线-秩检验联合法来识别水文过程变异点并分析变异成因,然后对各月平均流量序列用线性矩法推求GEV分布参数,求出概率密度最大流量,将其视为相应月河道内生态流量,可以得到黑河流域莺落峡站河道内生态需水情况。结果表明,基于水文变异情况分析河道内生态需水的计算方法在黑河上游是可行的;水文变异前后,站点满足生态需水频率会发生显著变化,因气候原因而导致的径流量变化是很难避免的,科学合理计算生态需水对干旱区河流生态管理和经济社会可持续发展有重要作用和意义。

**关键词:**河道内生态需水;水文变异;差积曲线-秩检验联合法;黑河

## 1 引言

水文循环与水量平衡是水文学的两大基本规律<sup>[1]</sup>,而全球气候变化加剧了水循环的变化,迫使降水以及地表水资源量的时空分布发生了极大地改变,目前人类活动对地表水文过程的影响日益加剧,使地表水文过程在气候变化与人类活动双重影响下发生了显著变异<sup>[2]</sup>,而且流域生态系统也会受到严重影响。运用新的理论和技术方法,科学识别水循环的演变规律及其驱动机制,对水循环的研究起着重要作用,同时也是水文学研究的核心内容。

生态需水研究始于20世纪40年代,主要集中在河流生态需水研究。90年代以来,生态系统需水量研究成为全球关注的焦点。国内生态需水研究多着眼于河流地貌学、水文和水资源,河道内生态需水主要包括3个方面:河道基本生态环境需水、输沙需水量和入海水量,且主要集中在水资源综合开发和利用的研究<sup>[3]</sup>。王雁林等<sup>[4]</sup>从流域生态环境现状及未来需求出发建立了流域生态环境需水量计算模型。李丽娟等<sup>[5]</sup>把河流最小月平均实测径流量的多年平均值视为河流基本生态环境需水。万东辉等<sup>[6]</sup>提出基于水文循环分析的生态需水量计算

流程图和方法,通过野外现场查勘和室内遥感分析,总结研究区生态需水特征。宋兰兰等<sup>[7]</sup>根据生物种群和环境因子之间的关系,通过筛选主要水文指数计算生态环境需水。郭斌等<sup>[8]</sup>采用定额法、潜水蒸发法和地下水储量变化法估算了塔里木河干流的生态需水量。国外关于河流生态环境需水量的研究根据其机理可分为历史流量法、水力学法和栖息地法等。

对于西北干旱区内陆河流域来说,严重的生态环境问题迫使生态需水随着西部开发受到广泛关注<sup>[9]</sup>。由于平原缺少降水,平原植被系统依赖于出山口径流,干旱区水资源消耗可分为3个部分:社会经济用水、生态用水和干旱区特有的盐碱地无效耗水<sup>[10]</sup>。因此,对于西北干旱地区来说,水在生态系统中起着至关重要的作用,特别是干旱区河道内生态需水研究<sup>[11]</sup>显得尤为重要。黑河是西北第二大内陆河,黑河流域缺水日益严重,不同时空尺度的水资源状况、水循环过程及水平衡状态等成为黑河流域研究的热点问题<sup>[12-13]</sup>。而国内目前大部分生态需水研究主要集中在黑河中游植被生态需水<sup>[14]</sup>和下游额济纳绿洲生态需水的研究<sup>[15]</sup>,在黑河上游基于水文变异的河道内生态需水的研究较少,因

收稿日期:2011-10; 修订日期:2012-02.

基金项目:国家自然科学基金项目(40961038);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q10-4);公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806021-07);生态经济学省级重点学科项目(5001-021)。

作者简介:邹悦(1985-),女,汉族,河北唐山人,硕士研究生,主要从事区域生态环境与水资源开发、水文模拟方面的研究。

E-mail: zouyue521@yahoo.com.cn

通信作者:张勃(1963-), E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

此,本文以黑河上游为研究区,利用莺落峡水文站的月径流资料获得的水文变异来计算河道内生态需水,从而有助于揭示各种影响因素对河流生态需水的影响。事实上,受气候变化和人类活动的双重影响,水文状况会发生急剧变化,使水文变异前后的总体分布显著不同,进而对生态需水量产生影响,这有助于对黑河流域生态需水问题进行更深层的分析。

2 黑河流域概况

黑河流域是中国西北地区第二大内陆河,位于河西走廊中部介于 $98^{\circ}\sim 101^{\circ}30'E$ , $38^{\circ}\sim 42^{\circ}N$ 之间,流域面积为 $13\times 10^4\text{ km}^2$ 。东部子水系即黑河干流水系 $11.56\times 10^4\text{ km}^2$ ,并以莺落峡和正义峡为界,划分为上、中、下游,莺落峡以上祁连山区为上游,是径流的主产流区;莺落峡至正义峡为中游,是水资源的主利用区;正义峡以下为下游,是河湖尾间消失区。黑河上游莺落峡水文站( $38^{\circ}48'N$ , $100^{\circ}11'E$ ,海拔1710 m,1944年设站观测)集水面积10009  $\text{km}^2$ ,占全流域总面积的7.8%,多年平均径流量为 $49.2259\text{ m}^3/\text{s}$ ,总径流量为 $15.5239\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ,径流模数为 $4.9182\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ 。其径流补给来源有大气降水、冰雪融水和地下水等,径流年内分配十分不均匀(图1)。

3 资料来源与研究方法

3.1 数据

黑河流域莺落峡水文站为黑河上游的祁连山地出山径流的主控水文站,因此在整个黑河流域有一定的代表性,因此,本文选用1947-2006年黑河上游莺落峡水文站月径流观测数据来识别水文过程变异点并用月平均径流数据计算河道内生态需水量。径流数据来源于甘肃省水文局。

3.2 研究方法

水文分析计算需要“一致性”,水文序列在变异前后是不一致的,根据生态适宜性理论<sup>[16]</sup>可以知道:生物适应于频率出现较高的环境因子,因而出现频率最大的流量最适合河道内生态系统。所以本文主要分析变异前水文序列的概率分布情况,并根据分析得出的径流变化特征计算河道内生态需水。下面简要介绍水文变异分析的步骤与所用的

分析方法。

3.2.1 水文变异分析方法

本文采用差积曲线-秩检验联合识别法<sup>[17-19]</sup>来分析水文变异点。差积曲线-秩检验联合识别法的主要过程是:利用差积曲线公式得到差积曲线图,从中找出最大值点和最小值点,然后假设最大值和最小值所对应的横坐标为可能的变异点。最后对初步识别得到的两个变异点,利用秩检验法进行精确识别。由秩统计量“ $U$ ”公式计算统计量“ $U$ ”,当 $|U|>U_{0.05/2}=1.96$ 时,则该点是序列的变异点,反之则不是变异点。

秩检验中秩统计量“ $U$ ”的公式如下:

$$U = \frac{W - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2}{\sqrt{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)/12}} \tag{1}$$

它表示将一个序列 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 分成了 $(y_1, y_2, \dots, y_r)$ 和 $(y_{r+1}, y_{r+2}, \dots, y_n)$ 两个序列,其中序列中样本个数较小者为 $n_1$ ,较大者为 $n_2$ ,即 $n_1 < n_2$ ,再由 $n_1$ 、 $n_2$ ,得出秩统计量“ $U$ ”。 $W$ 为 $n_1$ 中各数值的秩之和,即将原序列 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 按从小到大排序,然后把序列 $(y_1, y_2, \dots, y_r)$ 在原序列 $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 对应的秩相加就可以得到 $W$ 值。 $U$ 服从标准正态分布,若 $|U| < U_{0.05/2} = 1.96$ ,表明变异点不显著;否则,表明变异点显著。

3.2.2 河道内生态需水计算方法

根据径流变化特征,若水文序列存在变异点,可认为当地生态系统适应了变异前的水文状态,变

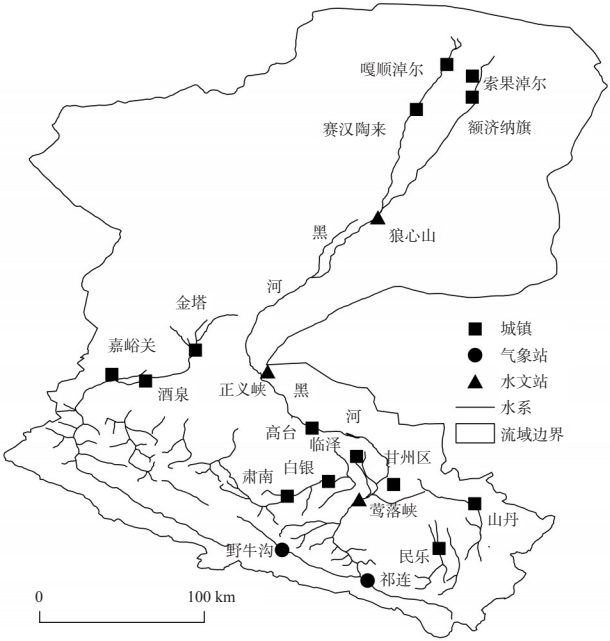


图1 黑河流域概况图

Fig.1 Sketch map and the location of Heihe River

异后的水文变化已影响了当地的生态平衡。所以计算河道内生态需水量时,只考虑变异点前水文序列。若水文序列不存在变异点,则当地生态系统适应该水文状态,故计算河道内生态需水时,需考虑全系列水文资料。

根据生态水文学理论,出现频率(也叫重现期)最大处流量最适合河道内生态系统。同一站点不同月份的河道内流量具有不同的时间变化规律,本文求出各个月份出现频率最大流量作为相应月份生态流量,即可求出一年内不同月份生态流量曲线。由李剑锋等<sup>[20]</sup>的研究成果可知,通过与P-III型分布比较,GEV分布<sup>[21]</sup>更符合河道内月平均流量。本文采用李剑锋等<sup>[20]</sup>的研究方法,通过计算GEV概率分布函数,采用线形矩法<sup>[22]</sup>对GEV分布进行参数估计,得到的线性矩 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 及GEV参数值为:

$$l_1 = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2)$$

$$l_2 = 2n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j - n^{-1} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3)$$

$$l_3 = 6n^{-1} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_j - 6n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j + n^{-1} \sum_{j=1}^n x_j \quad (4)$$

$$t_3 = l_3 / l_2 \quad (5)$$

$$\xi = - \left[ 7.8590 \left( \frac{2}{3+t_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \right) + 2.9554 \left( \frac{2}{3+t_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{l_2 \xi}{(1-2^{-\xi}) \Gamma(1+\xi)} \quad (7)$$

$$\mu = l_1 + \frac{\sigma [\Gamma(1+\xi) - 1]}{\xi} \quad (8)$$

式中: $x_j$ 为序列中第 $j$ 个值; $\sigma$ 是尺度参数; $\xi$ 是形状参数; $\Gamma(1+\xi)$ 是伽玛函数<sup>[23]</sup>; $t_3$ 是L-偏态系数。经计算可以得到出现频率最大处流量为:

$$x = \frac{\sigma}{\xi} [(\xi+1)^{-\xi} - 1] + \mu \quad (9)$$

式中: $x$ 是各月河道内生态流量。用此方法计算1-12月河道内生态流量,即可求出年内河道内生态流量曲线。

## 4 水文变异结果及成因分析

利用黑河上游莺落峡站60年年径流数据可以得到年径流序列变化趋势图(图2)。从图2中可以看出,莺落峡站1947-2006年径流年际变化规律,径

流量趋势线斜率为0.0258,说明黑河莺落峡站的年径流量总体上呈增加趋势,这主要是由于祁连山区夏季降水量增多和冬春季气候变暖导致的季节性冰雪融水增多引起的<sup>[24-25]</sup>。20世纪80年代莺落峡站径流量最大,为17.43亿 $\text{m}^3$ ,70年代径流量最小,为14.38亿 $\text{m}^3$ 。莺落峡站径流丰水年和枯水年交替出现,丰枯转化较平衡,这也可以表明莺落峡径流量的变化受人类活动影响较小。

### 4.1 初步识别变异点

根据已有研究成果<sup>[26]</sup>,黑河上游莺落峡水文站60年(1947-2006年)的年径流序列变化趋势图如下(图2)。图2显示了该序列在较长时间段上经历了一个缓慢上升的过程,初步判定该序列可能存在1到2个变异点。

### 4.2 差积曲线-秩检验方法识别变异点

首先根据差积曲线方法计算黑河上游莺落峡水文站年径流序列曲线(图3)。图3表明,最大值点和最小值点分别在1959年和1979年,因此,可假设1959年和1979年是变异点,变异点1959年将整个序列分为1947-1959年和1960-2006年两个序列,变

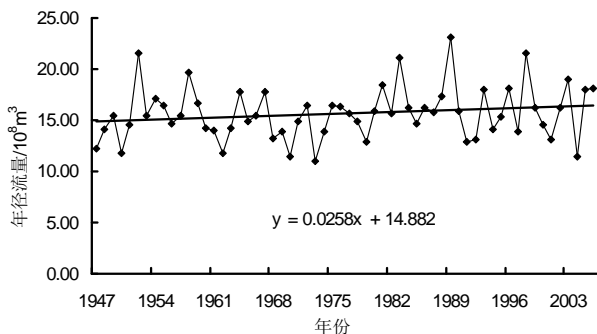


图2 黑河莺落峡站年径流量变化趋势特征

Fig.2 Trends in runoff at Yingluoxia station in Heihe River basin

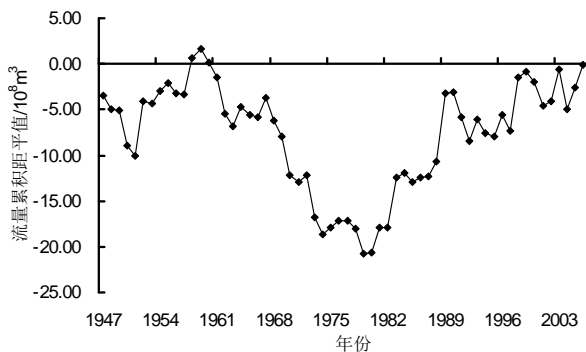


图3 黑河流域莺落峡站1947-2006年径流量差积曲线

Fig.3 Difference curve of annual runoff (1947-2006) of Yingluoxia in Heihe River



异点 1979 年将整个序列分为 1947-1979 年和 1980-2006 年两个序列。其次利用秩检验法对 1959 年和 1979 年两个变异点进行检验(表 1)。1959 年的统计量  $U$  为 2.736, 1979 年的统计量  $U$  为 2.653, 两个可能变异点的统计量  $|U| > 1.96$ , 检验结果显著, 表明了 1959 年和 1979 年都是该序列的变异点。

4.3 变异点成因分析

在自然条件下, 气候变化表现出明显的年际变化特征, 郭巧玲等<sup>[27]</sup>用不均匀系数、集中度、变化幅度等方法指标分析了黑河流域径流年内变化规律。杨明金等<sup>[28]</sup>采用相关分析、交叉谱分析、统计规律分析、降水-径流双累积曲线法等研究了全球变化、太阳黑子活动、ENSO 循环和下垫面变化对黑河干流出山径流变化的影响。而近年来人类活动的不断加强使流域下垫面条件发生改变, 造成水文过程在时空上发生明显突变, 使黑河年径流序列存在着多时间尺度变异。这些因素导致了水文要素过程发生“非一致性”改变。

4.3.1 气候变化因素

从多年气候变化来看<sup>[29]</sup>, 黑河流域莺落峡站径流量的变化主要是受到气温、降雨和蒸发量的影响, 而降雨是流量变化的最主要因子。

降水受下垫面、气象等间接因素的影响, 形成了地表径流、浅层地下径流、深层地下径流以及冰雪融水径流等水源, 共同构成了径流过程<sup>[30]</sup>。综合黑河上游降水量的变化可知, 20 世纪 40 年代末期到 50 年代末期, 此区域的降雨为丰水期, 降雨量增加导致径流量增加, 使径流量发生阶段性改变; 60 年代初期到 70 年代末期, 降雨进入枯水期, 相应的降雨量减少, 径流量减少, 而进入 80 年代以后, 降雨量转为丰水期, 降雨量缓慢增加, 径流量开始增多, 变异点正好位于丰枯周期的末期。整个黑河流域莺落峡站 60 年以来径流量是成缓慢增加的趋势, 这一点是由于气候变暖造成了上游山区祁连山冰川的不断萎缩和雪线的持续升高, 使得冰雪融化, 祁连山区夏季降水量增加, 蒸发量对流量的影响实际上是气温升高加剧流域蒸散量的增大, 进而导致径流量增加<sup>[31]</sup>。

4.3.2 人类活动因素

黑河莺落峡站水文过程的影响主要表现在人类活动对下垫面的改变上。下垫面条件发生改变, 水文过程的各环节也相应发生变化, 如蒸发、入渗、产流量会增加或减小, 水循环的路径和速率也会发

表 1 变异点分析结果

Tab.1 Analytical result of the change point			
可能变异点	统计量 $U$	显著性	是否是变异点
1959 年	2.736	显著	是
1979 年	2.652	显著	是

生变化。根据多年平均降水资料和莺落峡水文站月径流资料, 说明流域下垫面变化对莺落峡水文站天然年径流量的变化影响较小。出现这种情况的原因主要是黑河上游地区只有个别几个小型的水库, 没有建设大型的水利工程项目, 祁连山区由于人类活动的影响植被生态系统遭到一定程度的破坏, 近些年来祁连山区森林草场退化严重, 但对上游天然径流量的影响不大, 总体来说莺落峡水文站径流量的变化受人类活动的影响较小<sup>[32]</sup>。

5 河道内生态需水量计算

根据径流变化特征, 通过以上方法计算出来的变异点把水文序列进行分段, 选择序列发生变异前的序列计算河道生态需水。莺落峡站水文变异分段情况是: 1947-1959、1960-1979、1980-2006 年。

但是由于莺落峡站以上为黑河上游地区, 受人类活动影响较少, 所以, 径流系列出现变异情况是属于正常的水文随机性的表现, 其生态系统也适应这种变化。所以本文采用一个完整的径流系列进行径流最大出现频率分析计算, 并得出黑河莺落峡站河道内生态需水量, 该计算得出的生态需水量并没有考虑人类活动所利用的水量。

首先对莺落峡站(1947-2006 年)1 月份平均流量序列进行线形矩参数估计, 得到以下参数:

$$\xi = -0.2818, \sigma = -1.4881, \mu = 9.9002 \tag{10}$$

由(6)式计算 1 月份出现频率最大流量为

$$x = \frac{\sigma}{\xi} \left[ (\xi + 1)^{-\xi} - 1 \right] + \mu = 11.37 \text{ m}^3/\text{s} \tag{11}$$

用同样方法可计算出其他月份生态流量(图 4)。图中显示的是把 3 段径流时间序列和生态需水量进行的对比。其中 3 段时间序列是由径流发生变异的两个变异点划分成的。从莺落峡站各月生态流量图中可以看出, 针对 1959 年变异前分析来看, 生态流量基本上小于变异前序列月平均流量, 非汛期的减少幅度不大, 而汛期 7-9 月份的减少幅度较大。变异后月平均流量普遍减少, 6 月份前平均流量与生态流量相当, 基本满足生态流量, 7-8 月

份平均流量均小于生态流量,不能满足生态流量需求,且平均流量减少幅度较大。但9月份以后基本可以满足生态流量。但以1979年为变异点进行分析看出,变异前生态流量均大于变异前平均流量,不能满足生态流量需求,而变异后基本能满足生态流量,5-9月即汛期平均流量涨幅较大,非汛期基本与生态流量持平。莺落峡站各月河道内生态流量见表2。如果某年某月平均流量大于或等于对应月的生态流量,则认为该年该月满足了河道内生态流量。把各月满足生态流量的年份数除以总年数则求出满足生态流量的出现频率(表3)。

1959年为变异点,变异前满足出现频率一般在

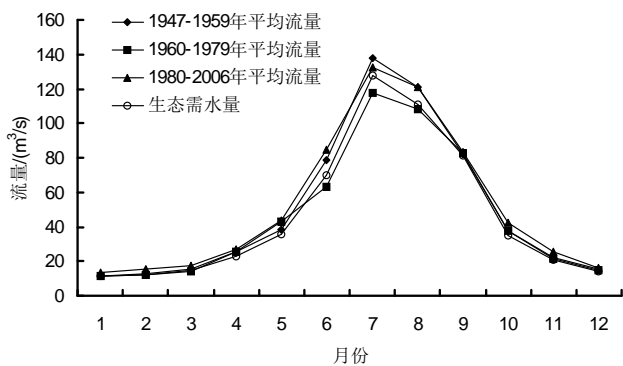


图4 莺落峡站各月份生态流量曲线

Fig.4 The ecological flow curve at Yingluoxia station

表2 黑河莺落峡水文站各月河道内生态流量  
Tab.2 Ecological instream flow at Yingluoxia station in Heihe River basin

月份	生态流量/(m³/s)	月份	生态流量/(m³/s)
1	11.378	7	127.871
2	12.216	8	110.645
3	14.895	9	81.413
4	23.115	10	35.276
5	35.819	11	20.869
6	70.234	12	14.413

50%以上,变异后满足出现频率基本下降。河道内生态环境情况恶化。一般情况下,6-8月是汛期。从表3可以看出,汛期下降幅度比非汛期大,这是由于随着经济社会发展,人类用水量增加,总体上河道内流量减少。同时由于水利工程的调蓄作用,汛期拦截上游来水进行蓄水,导致河道内流量减少,而非汛期则增加了河道内流量。但是部分站点非汛期满足出现频率甚至升高。例如4、5月和10月,4、5月份由于温度回升,进入雨季,冰雪融水使河道内径流量增加,尽管用水增加但是也能满足河道生态用水需求。10月份是正处于汛期与非汛期的过度时期,上游蓄水储量使河道内径流量能满足生态需水要求,更深层的原因有待进一步研究。

1979年为变异点的变化与之前刚好相反,变异后满足出现频率基本都上升,在汛期上升幅度较大,而在2、3月份也有较大幅度的上升,这主要与冬季降雪导致冰雪融水补给增加有关,只有9月份变异后满足出现频率下降,这可能由于汛期刚过降雨量突然减少导致径流量减少,致使平均流量暂时不能满足生态流量需求。

根据以上计算结果,如果考虑人类活动用水,可以允许人类利用一部分径流进行生产与生活活动,所以最多有60%~70%的流量作为生态需水,进而得到的生态需水量要比不考虑人类活动的生态需水量少,而径流量基本可满足生态需水量,这样就得到较好的生态需水保证率。黑河上游莺落峡水文站受人类活动影响较小<sup>[33]</sup>,水文发生变异的主要原因是气候变化,故变异后,满足出现频率减少幅度不大。

在河流生态需水管理中,生态流量满足出现频率并不需要达到尽可能高,这是不现实的。实际上,只需要把变异后满足出现频率保持与变异前相当即可。

表3 黑河上流莺落峡站满足生态流量频率及涨降比率(%)

Tab.3 The frequency and rate of monthly flows meeting ecological flows at Yingluoxia station													
变异点	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1959	变异前	69	62	69	54	46	62	54	54	54	62	62	62
	变异后	60	45	50	75	65	35	35	40	45	65	60	60
	降幅率	13	27	28	-39	-41	44	35	26	17	-3	5	3
1979	变异前	60	45	50	75	65	35	35	40	45	60	65	60
	变异后	89	96	96	85	78	70	59	48	41	63	85	74
	涨幅率	48	113	92	13	20	100	69	20	-9	5	31	23

## 6 结论

(1) 本文选择黑河流域莺落峡水文站作为研究对象,利用差积曲线-秩检验联合法来识别变异点并找出变异原因。利用线性矩法推求 GEV 分布参数求出概率密度最大流量,计算出莺落峡站各月份河道内生态流量。运用该法计算河道内生态流量更能反映出各月份的流量变化规律,具有很深的物理意义。因此,基于水文变异的河道内生态需水计算方法推广到黑河流域地区是可行的。

(2) 变异点前后河道内生态需水和满足生态需水出现频率变化显著。1959 年为变异点的河道内生态流量小于变异前平均流量,非汛期减少幅度不大,汛期减少幅度较大,变异后平均流量普遍下降,满足河道内生态流量出现频率下降,只有个别月份有所上升,这一阶段年径流量降低是导致出现频率降低的原因。年径流量减少主要有两方面原因:气候变化和人类活动。在气候变化方面,黑河上游 20 世纪 60-70 年代降雨量呈下降趋势,导致天然年径流量的减少。而农业用水增加也会使河道内径流量减少。黑河上游水利工程兴建较少,山区主要是砍伐森林和超载放牧等人类活动的不合理利用土地导致黑河水文状况发生变化,人类影响加速了水文循环中的水量损失。

1979 年为变异点河道内生态流量普遍大于变异前平均流量,而变异后平均流量基本上大于生态流量,满足河道内生态流量出现频率大部分提高,基本上可以满足河道内生态流量,5-9 月涨幅较大,而其他月份基本与生态流量持平。这一阶段主要是 20 世纪 80 年代以后降雨量增加导致径流量增加,气候变暖造成了上游山区祁连山冰川的不断萎缩和雪线的持续升高,使得冰雪融化,祁连山区夏季降水量增加,蒸发量对流量的影响实际上是气温升高加剧流域蒸散量的增大,进而导致径流量增加。由于黑河上游人口不断增加导致生态系统逐渐遭到人类破坏,政府不断加强管理措施,由此批准建立了祁连山国家级森林和野生动物类型自然保护区,从而有效保护了祁连山植被生态系统和生物多样性,这些措施都发挥了拦洪调蓄的作用,人类活动对莺落峡站径流量的变化影响减小,对生态系统有一定的保护和优化作用,这样就使径流量能基本满足河道内生态流量需求。黑河上游生态系统水环境主要受到气候因素的影响,而人类活动的

影响力较小。

(3) 生态流量满足出现频率是河道内水流状况的一个衡量指标。在河流生态需水管理中,生态流量满足出现频率并不需要尽可能高,只需要把变异后满足出现频率保持与变异前相当即可。由于气候原因而导致的径流量变化是很难避免的。应允许变异后满足出现频率略小于变异前,但幅度不能过大。对于干旱地区来说紧缺的是水,因此水资源问题显得尤为重要,科学合理计算生态需水,提高节水意识和用水效率,适当地水利调度等措施对于旱区河流生态管理和经济社会可持续发展有重要作用和意义。

致谢:感谢甘肃省水文局提供数据。

## 参考文献

- [1] 徐宗学, 李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望. 水科学进展, 2010, 21(4): 450-459.
- [2] Zhang Q, Xu C Y, Singh V P. Multi-scale variability of sediment load and streamflow of the Lower Yangtze River basin: Possible causes and implications. Journal of Hydrology, 2009, 368(1-4): 96-104.
- [3] 张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等. 流域生态需水的理论及计算研究进展. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.
- [4] 王雁林, 王文科, 杨泽元. 陕西省渭河流域生态环境需水量探讨. 自然资源学报, 2004, 19(1): 69-78.
- [5] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500.
- [6] 万东辉, 夏军, 宋献方, 等. 基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算. 水利学报, 2008, 39(8): 994-1000.
- [7] 宋兰兰, 陆桂华. 水文指数法确定河流生态需水. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341.
- [8] 郭斌, 王新平, 李瑛, 等. 基于生态恢复的塔里木河干流生态需水量预测. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1121-1128.
- [9] 陈敏建, 王浩, 王芳, 等. 内陆河干旱区生态需水分析. 生态学报, 2004, 24(10): 2136-2142.
- [10] 鲍超, 方创林. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望. 地理科学进展, 2008, 27(3): 38-46.
- [11] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算: 以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129-134.
- [12] 肖生春, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 近 50a 来黑河流域水资源问题与流域集成管理. 中国沙漠, 2011, 31(2): 529-535.
- [13] 宁宝英, 何元庆, 和献中, 等. 黑河流域水资源研究进展. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1180-1185.
- [14] 何志斌, 赵文智, 方静. 黑河中游地区植被生态需水量估



- 算. 生态学报, 2005, 25(4): 705-710.
- [15] 李强坤. 额济纳地区绿洲恢复生态需水量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [16] Mackenzie A, Ball A S, Virdee S R. Instant Notes in Ecology(Instant Notes Series). 2nd ed. UK: BIOS Scientific Publishers Ltd., 2001: 20-63.
- [17] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [18] 赖景耀, 王春林. 概率与统计. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.
- [19] 于延胜, 陈兴伟. 水文序列变异的差积曲线-秩检验联合识别法在闽江流域的应用: 以竹岐站年径流序列为例. 资源科学, 2009, 31(10): 1717-1721.
- [20] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究. 地理学报, 2011, 66(1): 99-110.
- [21] Embrechts P. Modelling Extrernal Events for Insurance and Finance. New York: Springer, 1997: 152-168.
- [22] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [23] 季学武, 王俊. 水文分析计算与水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [24] 李栋梁, 冯建英, 陈雷, 等. 黑河流量和祁连山气候的年代际变化. 高原气象, 2003, 22(2): 104-110.
- [25] 张凯, 王润元, 韩海涛, 等. 黑河流域气候变化的水文水资源效应. 资源科学, 2007, 29(1): 77-83.
- [26] 邹悦, 张勃, 戴声佩, 等. 黑河流域莺落峡站水文过程变异点的识别与分析. 资源科学, 2011, 33(7): 1264-1271.
- [27] 郭巧玲, 杨云松, 畅祥生, 等. 1957-2008年黑河流域径流年内分配变化. 地理科学进展, 2011, 30(5): 550-556.
- [28] 杨明金, 张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析. 地理科学进展, 2010, 29(2): 166-172.
- [29] 张利平, 陈小凤, 赵志鹏, 等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展. 地理科学进展, 2008, 27(3): 60-67.
- [30] 赵雪花. 河川径流演变规律的挖掘与识别技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [31] 李栋梁, 刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应. 中国沙漠, 2004, 24(4): 385-391.
- [32] 冯建英, 李栋梁. 甘肃省河西内陆河流量长期变化特征. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 478-484.
- [33] 姜晓勇. 黑河上游地区径流量的变化趋势及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008.

## The Study of Ecological Water Demand at Yingluoxia Station of Heihe River

ZOU Yue, ZHANG Bo

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** It is a hot issue of ecological water demand in the study of water problem in recent years, especially in arid areas where the ecological environment deteriorated rapidly. Climate changes and human activities can lead to hydrological change, which means the local hydrological condition has changed and broke the ecological balance. The authors adopted monthly runoff series data of 60 years at hydrological monitoring station of Yingluoxia in the Heihe River basin during the period 1947-2006. The difference plot curve-combined method of rank test was used to identify the change point of hydrological processes and causes of these changes. On this basis, L-moment is used to evaluate the parameters of generalized extreme value (GEV) distribution of the monthly flow series before hydrological change, and to calculate the maximum probability density runoff, which is the ecological water demand of that month. The result shows that the ecological calculating method which takes the hydrological change into consideration is practicable in the Heihe River. Before and after the hydrological variability, the frequency to meet the ecological water demand will change significantly at Yingluoxia station. The climatic reasons inevitably exert influence on the volume of the runoff. So it is important to get a better understanding of ecological water demand in river ecosystem management and socio-economic sustainable development in arid areas.

**Key words:** ecological water demand; hydrological change; difference plot curve-combined method of rank test; Heihe River

本文引用格式:

邹悦, 张勃. 黑河流域莺落峡站河道内生态需水研究. 地理科学进展, 2012, 31(5): 625-631.