

# 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析

杨明金, 张 勃

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘 要:** 以黑河干流出口径流控制站莺落峡水文站 1960 年—2004 年 45 年的径流序列为基础数据, 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口径流变化的影响。结果表明: ①全球变化对莺落峡站径流变化影响较大; ②莺落峡站年径流与太阳黑子相对数两序列在 2 年和 3.3 年两个振动周期上存在显著的相关关系, 但在这两个存在显著相关关系的振动周期上太阳黑子相对数的周期波动变化都落后于莺落峡站年径流的周期波动变化; ③ENSO 循环对莺落峡站年径流变化有一定的影响, 但是, EL Nino 事件和 La Nina 事件对莺落峡站年径流的影响时间持续较短, 对事件发生当年的径流变化影响较大, 对事件发生次年的径流变化影响较小; ④流域下垫面变化对莺落峡站年径流量的变化影响较小。

**关 键 词:** 黑河; 径流变化; 影响因素; 太阳黑子; ENSO 循环

河川径流的变化规律及其影响因素是水文水资源学研究的重要内容。河川径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的共同作用, 其演变过程存在确定性规律, 同时也表现出强烈的随机性。河川径流特征的变化必然影响水资源的开发利用, 并进而影响社会经济的发展。在全球变暖的大背景下, 研究河川径流特征, 认识其演化规律及影响因素, 不仅有助于深入了解流域水循环与水平衡以及流域的结构和功能, 而且对流域内水资源的开发利用与合理配置等都具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

黑河是我国西北地区第二大内陆河。黑河流域深居西北内陆, 受青藏高原隆起和周围几列高山系的影响, 山区流域降水较多, 冰川、积雪发育, 成为径流的形成区, 而山前的平原盆地, 降水稀少, 蒸发强烈, 成为径流的散失区。其中游的张掖盆地灌溉农业十分发达, 是甘肃省重要的商品粮生产基地, 而其下游的内蒙额济纳旗绿洲近 20 余年来由于入境地表径流大幅度减少, 生态环境严重恶化。故黑河流域像其它干旱区内陆河流域一样, 水资源问题已成为制约流域社会经济可持续发展的主要

因素。因此, 分析黑河出山径流变化规律及影响因素, 对制定区域社会经济发展战略、促进区域工农业生产和社会经济可持续发展都具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

综合以上分析, 可以看出, 对黑河出山径流产生和演化规律以及径流的影响因素等进行研究, 具有重要的理论和现实意义。目前, 分析降水、气温和蒸发等因素对黑河莺落峡站径流变化影响等方面已进行了不少研究<sup>[8-10]</sup>, 但在太阳活动、海—气相互作用以及流域下垫面改变对黑河莺落峡站径流变化影响等方面的研究还很少。鉴于此, 本文在前人的研究基础之上, 着重研究全球变化、太阳黑子活动、ENSO 循环和流域下垫面变化对黑河莺落峡站径流变化的影响。

## 1 研究区概况和基本水文特征

黑河是我国西北地区第二大内陆河, 发源于祁连山北麓中段, 流域范围介于 38°N~42°N, 98°E~101°30'E 之间, 流经青海、甘肃、内蒙古三省(自治区), 流域总面积  $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 东部子水系即黑河干流水系  $11.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 全长约 821 km, 并以莺落峡

收稿日期: 2009-05; 修订日期: 2009-09.

**基金项目:** 2008 年度公益性行业(气象)科研专项基金项目(GYHY200806021-07); 甘肃省自然科学基金项目(2007GS03634); 甘肃省生态经济学省级重点学科资助项目(5001-021); 西北师范大学地理与环境科学学院学生学术科研基金项目(2009DLXSKY-01-03)。

**作者简介:** 杨明金(1982-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源与水环境。E-mail: mingjin369@163.com

**通讯作者:** 张勃(1963-), 男, 甘肃华池人, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

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。黑河干流出山口径流控制站莺落峡水文站(38°48'N,100°11'E,海拔 1710m,1944 年设站观测)集水面积 10009 km<sup>2</sup>,占全流域 7.8%,莺落峡站多年平均径流量为 49.2259 m<sup>3</sup>/s,总径流量为 15.5239×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,径流模数为 4.9182 L/(s·km<sup>2</sup>)。黑河莺落峡站径流多年变化相对比较稳定,变差系数 C<sub>v</sub> 值为 0.1671,年极值比(最大与最小年流量的比值)为 2.0943,是我国和西北地区径流年际变化的低值区。黑河莺落峡站径流补给来源有大气降水、冰雪融水和地下水等,但大气降水是径流的主要补给来源,补给比例占到 92%左右,径流年内分配十分不均匀。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

黑河干流出山口径流控制站莺落峡水文站 1960–2004 年径流数据和黑河干流山区野牛沟和祁连气象站同期降水、气温数据均由“数字黑河”和“中国水文学水资源科学数据共享网”提供;太阳黑子相对数 1960–2004 年数据由美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供;Nino3 区(90~160°W,5°N~5°S)海表温度(Sea Surface Temperature,简称 SST)1960–2004 年数据由美国国家环境预测中心(NCEP)提供。

2.2 分析方法

首先对野牛沟和祁连气象站<sup>[12]</sup>平均降水、气温资料与莺落峡站径流量进行相关分析,分析全球变化对莺落峡站径流量变化的影响;对黑河莺落峡站年径流与太阳黑子相对数两时间序列“中心化”无量纲处理,然后采用交叉谱分析两时间序列对应频率分量之间的相互关系;采用 Nino3 区的 SST 指数标准判定 EL Nino 和 La Nina 事件,然后通过统计规律分析 EL Nino 和 La Nina 事件发生当年和次年与莺落峡站年径流丰枯变化的关系;最后用降水—

径流双累积曲线法对流域下垫面变化对莺落峡站年径流量变化作定性分析。

3 影响因素分析

河川径流受气候、地貌、土壤等自然条件以及人类活动的共同作用,其演变过程存在确定性规律,同时也表现出强烈的随机性。由于河川径流序列变化主要包括趋势变化、周期变化和随机变化,其中趋势变化主要受全球变化的影响,周期变化主要受太阳黑子活动和海—气相互作用的影响,而随机变化则主要受偶然事件的影响,同时这三种变化还受下垫面因素的影响<sup>[1-4]</sup>。因此,本文着重研究全球变化、太阳黑子活动、ENSO 循环和流域下垫面变化对黑河莺落峡站年径流的影响。

3.1 全球变化对径流的影响

已有研究资料<sup>[9-11]</sup>表明,在中国西北内陆地区气候由暖干向暖湿转型的大背景下<sup>[17-18]</sup>,黑河莺落峡站年径流量呈现稍微增加的趋势,这种现象是由祁连山区夏季降水量增多和冬春季气候变暖导致季节性冰雪融水增多所引起的。本文选取了黑河干流山区野牛沟和祁连气象站 1960–2004 年的平均降水、气温资料与莺落峡站径流量进行相关分析(见表 1)。从表 1 中可以看出,在汛期(5–10 月),莺落峡站径流量与降水资料的关系非常密切,相关系数均通过了 a=0.01 的显著性检验,在非汛期(11–4 月),除了 4 月的相关系数通过 a=0.05 的显著性检验外,其他月份相关性均不显著;12 月至次年 5 月,莺落峡站径流量与气温资料的相关系数较大,基本上都通过了 a=0.05 的显著性检验,冬春季气候变暖导致祁连山区融雪期提前和融雪期时间尺度上的扩大,致使冬春季融雪径流增加<sup>[11]</sup>。但是,总体上来看,莺落峡站径流量与降水资料全年的相关系数通过了 a=0.01 的显著性检验,但是径流量与气温资料全年的相关系数没有通过显著性检验,这就说明莺落峡站多年径流量的增加趋势,祁连山区汛期降水量增加起主导作用,冬春季气候变暖导致祁连山区

表 1 莺落峡站径流序列与野牛沟和祁连气象站平均降水、气温序列的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between the runoff of Ying Luo-xia Station and the average precipitation and air temperature of Ye Niu-gou & Qilian Weather Station

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
相关系数	-0.0540	0.0850	0.2615	0.3309*	0.3938**	0.7280**	0.5499**	0.7835**	0.5592**	0.3991**	0.1093	0.1334	0.8215**
	0.3287*	0.1008	0.3623*	0.4062**	0.3595*	0.0637	-0.1787	0.0202	0.1972	0.2992	0.1471	0.3185*	0.0647

注:第一行为降水相关系数,第二行为气温相关系数;\* 为 a=0.05 信度检验,\*\* 为 a=0.01 信度检验。

冰雪融水增加起辅助作用。综合以上分析,可以认为,中国西北内陆地区气候向暖湿转变是黑河莺落峡站径流量增加的主要原因,全球变化对黑河出山径流变化的影响较大。

3.2 太阳黑子活动对径流的影响

已有研究资料<sup>[7-8,19-20]</sup>表明,黑河莺落峡站径流的变化与太阳黑子活动有十分密切的关系。因此,本文在前人的研究基础之上,采用研究不同时间变量周期波动间相互关系的交叉谱分析<sup>[21]</sup>,进一步探讨莺落峡站年径流与太阳黑子相对数两时间序列对应频率分量之间的相互关系,如相关程度、相位差(超前、滞后关系)和比例(增益)关系等。

$$\begin{cases} P_{12}(k)=\frac{1}{m}\left\{r_{12}(0)+\sum_{j=1}^{m-1}[r_{12}(j)+r_{21}(j)]\cos\frac{k\pi}{m}j+r_{12}(m)\cos k\pi\right\}, \\ Q_{12}(k)=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m-1}[r_{12}(j)-r_{21}(j)]\sin\frac{k\pi}{m}j \end{cases}, \quad (k=0,1,2,\cdots,m)$$

(2)

利用汉宁窗平滑对协谱  $P_{12}(k)$  和正交谱  $Q_{12}(k)$  进行平滑得到  $P_{12}(k)$  和  $Q_{12}(k)$ ,平滑窗为  $<0.25, 0.5, 0.25>$ ,然后利用下式分别计算振幅谱  $C_{12}(k)$ 、相位谱  $\Theta_{12}(k)$  和凝聚谱  $R_{12}^2(k)$ :

$$\begin{cases} C_{12}(k)=\sqrt{\hat{P}_{12}^2(k)+\hat{Q}_{12}^2(k)} \\ \Theta_{12}(k)=\arctan\frac{\hat{Q}_{12}(k)}{\hat{P}_{12}(k)} \\ R_{12}^2(k)=\frac{\hat{P}_{12}^2(k)+\hat{Q}_{12}^2(k)}{\hat{P}_{11}(k)\hat{P}_{22}(k)} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\hat{P}_{11}(k)$  和  $\hat{P}_{22}(k)$  是  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的光滑功率谱。实际使用中,通常按式  $L(k)=\frac{m\Theta_{12}(k)}{\pi k}$  将相位谱  $\Theta_{12}(k)$  转化为落后时间长度谱  $L(k)$ 。

最后需要对凝聚谱  $R_{12}^2(k)$  值进行显著性检验。原假设:在某一频率上两序列振动的相关程度为 0,即凝聚谱为 0。计算统计量

$$F=\frac{(v-1)R_{12}^2(k)}{1-R_{12}^2(k)} \quad (4)$$

该统计量是遵从分子自由度为 2,分子自由度为  $2(v-1)$  的  $F$  分布。其中  $v=\frac{2n-(m-1)/2}{m-1}$ ,然后确定显著性水平  $\alpha$ ,查表得统计量  $F_\alpha$ ,若

为了消除随机变化和趋势变化的影响,对黑河莺落峡站年径流量序列  $x_1(t)$  和太阳黑子相对数序列  $x_2(t)$ “中心化”无量纲处理,然后再进行交叉谱分析。本次计算取最大时延  $m=10$ ,首先计算落后互相关函数  $r_{12}(j)$  和  $r_{21}(j)$ :

$$\begin{cases} r_{12}(j)=\frac{1}{n-j}\sum_{i=1}^{n-j}\left(\frac{x_{1i}-\bar{x}_1}{s_1}\right)\left(\frac{x_{2(i+j)}-\bar{x}_2}{s_2}\right) \\ r_{21}(j)=\frac{1}{n-j}\sum_{i=1}^{n-j}\left(\frac{x_{1(i+j)}-\bar{x}_1}{s_1}\right)\left(\frac{x_{2i}-\bar{x}_2}{s_2}\right) \end{cases} \quad (j=0,1,2,\cdots,m)$$

(1)

式中:  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  分别为  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的平均值,  $s_1$  和  $s_2$  分别为它们的标准差。然后计算协谱  $P_{12}(k)$  和正交谱  $Q_{12}(k)$ :

$F>F_\alpha$  则拒绝原假设,认为在某一频率上两序列振动的凝聚是显著的。交叉谱的所有计算结果列于表 2。

凝聚谱值类似于两序列的相关系数,它反映了两时间序列对应频率分量之间的相关程度,其变化范围介于 0 和 1 之间,凝聚谱愈接近于 1,则两序列在频率  $k$  处愈相关。从表 2 凝聚谱  $R_{12}^2(k)$  一栏可以看出,在 3.3 年左右周期,凝聚谱值达到了最大,为 0.664,其次是在 2 年周期,凝聚谱值也较大,为 0.464。根据交叉谱分析过程中设定的参数计算,上述两个振动周期所对应的统计量检验值分别为 16.82 和 7.35,均满足显著性水平  $\alpha=0.01(F_{0.01}=6.11)$  的检验要求,因此在上述两个振动周期上凝聚是显著的,也就是说莺落峡站年径流与太阳黑子相对数两序列在上述两个振动周期上存在显著的相关关

表 2 莺落峡站年径流与太阳黑子相对数的交叉谱  
Tab.2 Cross-spectrum between annual runoff of Ying Luo-xia Station and the relative number of sunspot

波数k	周期 $T(k)$ /年	凝聚谱 $R_{12}^2(k)$	相位谱 $\Theta_{12}(k)$	落后时间 长度谱 $L(k)$	统计量 $F$ 值
0	$\infty$	—	—	—	—
1	20.0	0.141	1.118	3.558	1.39
2	10.0	0.195	-1.458	-2.321	2.06
3	6.7	0.091	-1.378	-1.462	0.85
4	5.0	0.061	-1.044	-0.831	0.55
5	4.0	0.197	-0.796	-0.507	2.08
6	3.3	0.664	-1.229	-0.652	16.82
7	2.9	0.104	1.198	0.545	0.99
8	2.5	0.041	0.532	0.212	0.36
9	2.2	0.137	-0.014	-0.005	1.35
10	2.0	0.464	-1.118	-0.356	7.35



系。从交叉谱分析的结果可以看出,太阳黑子对莺落峡站年径流的影响主要表现在 2~3 年的短周期上,在这些周期附近两者具有较大的凝聚谱值,这与以往的研究结果黑河莺落峡站年径流具有 3 年左右的显著周期是相吻合的,但是太阳黑子对莺落峡站年径流的影响没有表现在 22 年的磁周期和 11 年的准周期上,这可能是因为莺落峡站年径流不仅仅受太阳黑子的影响,还受到其它比如 ENSO 循环和具有准 3 年周期的副高脊线位置变化等因素的影响<sup>[7-8,12-13,20]</sup>。

相位谱反映了两时间序列在各种频率波动结构中的相位差即超前、滞后关系,如果相位差为正,表示在某一频率振动上前一序列落后于后一序列,相位差为负,表示在某一频率振动上前一序列超前于后一序列<sup>[2]</sup>。表 2 中给出的相位谱和落后时间长度谱分别对应各个振动周期上黑河莺落峡站年径流与太阳黑子相对数之间的相位差和时间长度差。从表 2 的落后时间长度谱  $L(k)$  一栏可以查到上述两个高凝聚对应的落后长度,3.3 年振动周期对应的  $L(6)=-0.652$ ,并且  $\theta_{12}(6)=-1.229<0$ ,说明后一列落后于前一序列,也就是太阳黑子相对数的周期波动变化落后于莺落峡站年径流的周期波动变化 0.652 年时间,2 年振动周期对应  $L(10)=-0.356$ ,并且  $\theta_{12}(10)=-1.118<0$ ,同样也说明太阳黑子相对数的周期波动变化比莺落峡站年径流的周期波动变化落后 0.356 年时间。本文主要目的是分析太阳黑子相对数的变化对莺落峡站年径流的影响关系,即分析太阳黑子相对数变化后对莺落峡站年径流的滞后影响,但是本文分析的结果却表明在存在显著相关关系的两个振动周期上,太阳黑子相对数的周期波动变化都落后于莺落峡站年径流的周期波动变化,这可能是因为莺落峡站年径流除了受太阳黑

子的影响外,还受到其它比如 ENSO 循环等因素的影响,同时还存在两者空间尺度不一,以及在交叉谱计算中最大落后时间长度  $m$  的取值对其所产生的影响<sup>[23]</sup>。以上只是推测理论,这其中的原因还有待于进一步研究。

3.3 ENSO 循环对径流的影响

黑河出山径流的动态变化很大程度上取决于祁连山地区气候波动的自然过程,且这一过程随地气之间、海气之间的能量交换而不断变化。厄尔尼诺(EL Nino)和拉尼娜(La Nina)是赤道东太平洋海水异常增温和异常降温的现象,两者交替出现,反映了赤道东太平洋由暖水-冷水-暖水-冷水的循环,也是海洋和大气相互作用的过程。将 EL Nino 和与之相伴而生的南方涛动现象并称为恩索(ENSO)。我国科学家已经证实,赤道东太平洋区域海面温度(SST)的变异亦严重影响中国广大地区的天气和气候。由于 ENSO 循环的机理很复杂,对于其成因及其对气候的机制和过程的研究国际学术界虽已取得一定的进展,但离揭示其成因和影响过程的物理机制还相距甚远,直到目前还无法较准确的预报 EL Nino 和 La Nina 事件发生的时间、强度和持续的时间。因此,在分析海洋与大气、海洋与陆地相互作用时,利用统计规律来分析黑河出山径流对 ENSO 循环的响应不失为一种有效的方法<sup>[1-2,24]</sup>。

表 3 莺落峡站丰、平、枯水年划分标准  
Tab.3 Division standard for high and low water of annual runoff of Ying Luo-xia Station

丰、平、枯 等级	划 分 标 准	莺落峡站年径流划分标准 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
特 丰 水	$P \leq 12.5\%$	$w_i \geq 18.6$
偏 丰 水	$12.5\% < P \leq 37.5\%$	$16.4 \leq w_i < 18.6$
平 水 年	$37.5\% < P \leq 62.5\%$	$14.8 \leq w_i < 16.4$
偏 枯 水	$62.5\% < P \leq 87.5\%$	$12.9 \leq w_i < 14.8$
特 枯 水	$P > 87.5\%$	$w_i < 12.9$

注: $w_i$ 为莺落峡站某一年径流量; $P$ 为保证率(%)。

表 4 EL Nino 现象发生年及次年莺落峡站年径流丰枯情况统计

Tab.4 Current and next year statistics of high and low water of annual runoff of Ying Luo-xia Station when EL Nino occurring

事 件	年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	丰枯 划分	次年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	次 年 丰枯划分	事 件	年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	丰枯 划分	次年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	次 年 丰枯划分
1963	14.22	偏 枯	17.79	偏 丰	1991	12.87	特 枯	13.15	偏 枯
1965	14.85	平 水	15.39	平 水	1992	13.15	偏 枯	18.04	偏 丰
1969	13.88	偏 枯	11.45	特 枯	1993	18.04	偏 丰	14.07	偏 枯
1972	16.40	偏 丰	11.04	特 枯	1994	14.07	偏 枯	15.36	平 水
1976	16.34	平 水	15.67	平 水	1997	13.84	偏 枯	21.60	特 丰
1982	15.64	平 水	21.13	特 丰	1998	21.60	特 丰	16.21	平 水
1983	21.13	特 丰	16.21	平 水	2002	16.18	平 水	19.04	特 丰
1987	15.74	平 水	17.28	偏 丰	2004	11.41	特 枯	17.77	偏 丰

首先, 利用黑河莺落峡站年径流频率曲线, 采用一定保证率( $P$ )的年径流量作为划分径流丰、平、枯的标准(见表 3), 将莺落峡站 1960–2004 年 45 a 径流量划分为特枯、偏枯、平水、偏丰、特丰五个等级<sup>[25]</sup>, 然后将采用 Nino3 区的 SST 指数标准判定的 EL Nino 事件和 La Nina 事件共同列于表 4、5。

当 EL Nino 事件和 La Nina 事件发生时, 当年和次年径流出现状态(可归纳为丰、平、枯 3 种)概率

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j=1}^3 N_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $i=1, 2$  表示 EL Nino 事件和 La Nina 事件发生两种情况,  $j=1, 2, 3$  指事件发生后径流出现的 3 种状态,  $N_{ij}$  为  $i$  事件发生时, 径流出现  $j$  状态的次数, 且  $\sum_{j=1}^3 N_{ij}=1$ 。

表 4 给出了 1960–2004 年 45 年时间里发生的 16 次 EL Nino 现象及事件发生当年和次年黑河莺落峡站年径流丰枯统计情况。通过表 4 由(5)式计算可得, 在 EL Nino 现象发生的 16 a 中, 有 7 a 莺落峡站年径流为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 43.75%, 有 5 a 为平水年, 出现的概率为 31.25%, 有 4 a 为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 25%。在 EL Nino 事件出现的次年里, 有 4 a 莺落峡站年径流为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 25%, 有 5 a 为平水年, 出现的概率为 31.25%, 有 7 a 为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 43.75%。由此可见, 莺落峡站年径流在 EL Nino 年出现枯水的概率较大, 占到 43.75%, 但是在 EL Nino 年的次年出现枯水的概率却较小, 只占到 25%, 说明 EL Nino 事件对黑河莺落峡站年径流的影响时间持续较短, 对 EL Nino 事件发生当年的径流变化影响较大, 对 EL Nino 事件发生次年的径流变化影响较小<sup>[24]</sup>。

表 5 给出了 1960–2004 年 45 年时间里发生的 11 次 La Nina 现象及事件发生当年和次年黑河莺

落峡站年径流丰枯统计情况。通过表 5 由(5)式计算可得, 在 La Nina 现象发生的 11 a 中, 有 5 a 莺落峡站年径流为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 45.46%, 有 2 a 为平水年, 出现的概率为 18.18%, 有 4 a 为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 36.36%。在 La Nina 事件出现的次年里, 有 3 a 莺落峡站年径流为特丰年或偏丰年, 出现的概率为 22.28%, 有 4 a 为平水年, 出现的概率为 36.36%, 有 4 a 为特枯年或偏枯年, 出现的概率为 36.36%。由此可见, 莺落峡站年径流在 La Nina 年出现丰水的概率较大, 占到 45.46%, 但是在 La Nina 年的次年出现丰水的概率却较小, 只占到 22.28%, 说明 La Nina 事件和 EL Nino 事件一样, 对黑河莺落峡站年径流的影响时间持续较短, 对 La Nina 事件发生当年的径流变化影响较大, 对 La Nina 事件发生次年的径流变化影响较小<sup>[24]</sup>。

3.4 下垫面变化对径流的影响

人类活动对黑河莺落峡站水文过程的影响集中表现在对下垫面的改变上。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生变化<sup>[1–2]</sup>。降水—径流双累积曲线法是用分析年径流时间序列趋势性变化的一种常用方法, 即

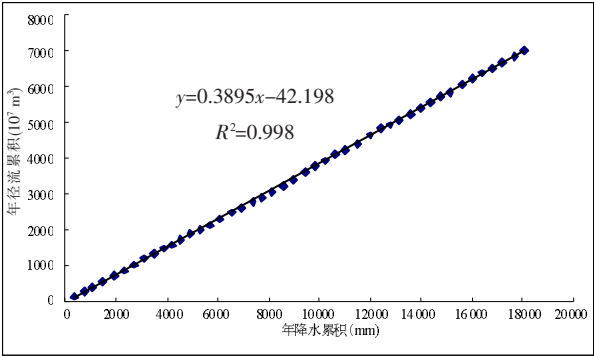


图 1 年降水量和年径流量双累积曲线图

Fig.1 Double mass curve for annual precipitation and annual runoff

表 5 La Nina 现象发生年及次年莺落峡站年径流丰枯情况统计

Tab.5 Current and next year statistics of high and low water of annual runoff of Ying Luo-xia Station when La Nina occurring

事 件	年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	丰枯 划分	次年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	次 年 丰枯划分	事 件	年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	丰枯 划分	次年径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	次 年 丰枯划分
1964	17.79	偏 丰	14.85	平 水	1975	16.46	偏 丰	16.34	平 水
1967	17.82	偏 丰	13.21	偏 枯	1988	17.28	偏 丰	23.12	特 丰
1970	11.45	特 枯	14.92	平 水	1989	23.12	特 丰	15.86	平 水
1971	14.92	平 水	16.40	偏 丰	1999	16.21	平 水	14.60	偏 枯
1973	11.04	特 枯	13.84	偏 枯	2000	14.60	偏 枯	13.09	偏 枯
1974	13.84	偏 枯	16.46	偏 丰	—	—	—	—	—

将流域年降水和年径流两时间序列资料按同一时间长度逐步累加,点绘成图<sup>[26]</sup>,若流域径流量只受到降水的影响(极端降水事件除外),则双累积曲线基本呈一条直线,若双累积曲线表现出明显的转折变化,说明流域下垫面状况发生了变化<sup>[27]</sup>。故本文采用双累积曲线法来分析流域下垫面变化对莺落峡站径流变化的影响。

根据黑河干流山区野牛沟和祁连气象站 1960–2004 年的平均降水资料<sup>[12]</sup>和莺落峡站年径流资料,建立相应的双累积曲线图(见图 1),其中数据点从左到右的年份依次为 1960、1961、1962、…、2003、2004 年。从图中可以看出,年降水量和年径流量双累积曲线变化比较平稳,没有表现出明显的转折变化,基本上呈线性关系(显著性水平超过  $\alpha=0.01$  信度检验),这就说明流域下垫面状况基本上没有发生变化。黑河上游地区至今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,流域下垫面状况稍有变化,但是这对上游径流量的影响不大,所以总体来说流域下垫面变化对莺落峡站年径流量的变化影响较小<sup>[28]</sup>。

## 4 结论与讨论

4.1 通过黑河干流山区野牛沟和祁连气象站 1960–2004 年的平均降水、气温资料与莺落峡站径流量相关分析表明,莺落峡站多年径流量的增加趋势,祁连山区汛期降水量增加起主导作用,冬春季气候变暖导致祁连山区冰雪融水增加起辅助作用。中国西北内陆地区气候向暖湿转变是黑河莺落峡站径流量增加的主要原因,全球变化对黑河出山径流变化的影响较大。

4.2 利用交叉谱分析,得出莺落峡站年径流与太阳黑子相对数两序列在 2 年和 3.3 年两个振动周期上存在显著的相关关系,但是两时间序列在这两个频率波动结构中对应的相位差值却都为负值,说明太阳黑子相对数的周期波动变化都落后于莺落峡站年径流的周期波动变化,这与本文的研究目的不相符,其中的原因还有待于进一步研究。

4.3 通过统计规律分析表明,ENSO 循环对莺落峡站年径流变化有一定的影响,但是,EL Nino 事件和 La Nina 事件对莺落峡站年径流的影响时间持续较短,对事件发生当年的径流变化影响较大:当

EL Nino 现象发生时莺落峡站年径流当年出现枯水年的概率为 43.75%,当 La Nina 现象发生时莺落峡站年径流当年出现丰水年的概率为 45.46%,但是,EL Nino 事件和 La Nina 事件对事件发生次年的径流变化影响较小。

4.4 通过对 1960–2004 年黑河干流山区野牛沟和祁连气象站平均降水资料和莺落峡站年径流资料建立的降水—径流双累积曲线图分析,双累积曲线变化比较平稳,基本上没有很明显的转折变化,这说明流域下垫面变化对莺落峡站年径流量的变化影响较小。

4.5 黑河出山径流量变化是各种因子综合作用的结果,其中全球变化,即降水和冰雪融水对黑河出山径流变化的影响最大,在后续的研究中,还应进一步开发研究宜于综合考虑各种因子对径流量共同作用的方法,以便于更加科学精确的研究河川径流变化与各种影响因子之间的综合关系。

致 谢:在文章的写作和数据收集过程中,得到了华侨大学数学科学学院汤龙坤教授和同门柳景峰师兄的大力支持与帮助,审稿专家在审稿过程中提出了十分宝贵的意见,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 赵雪花. 河川径流演变规律的挖掘与识别技术. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [2] 赵雪花, 黄强. 黄河上游径流变化的影响因素分析研究. 自然科学进展, 2004, 14(6): 700–704.
- [3] 施嘉扬. 水资源综合利用. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [4] 李占玲, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江流域径流特性变化分析. 地理研究, 2008, 27(2): 353–361.
- [5] 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型. 中国科学(D 辑), 1999, 29(增刊, 1): 47–54.
- [6] 丁永建, 叶佰生, 刘时银. 祁连山中部地区 40 a 来气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2000, 22 (3): 193–199.
- [7] 蓝永超, 康尔泗, 金会军, 等. 黑河出山径流量年际变化特征和趋势研究. 冰川冻土, 1999, 21(1): 49–53.
- [8] 蓝永超, 丁永建, 康尔泗, 等. 黑河流域水资源动态变化及其趋势的灰色 Markov 链预测. 中国沙漠, 2003, 23(4): 435–440.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 李林, 王振宇, 汪青春. 黑河上游地区气候变化对径流量的影响研究. 地理科学, 2006, 26(1): 40–46.
- [13] 曹玲, 董安祥, 窦永祥, 等. 黑河洪峰变化及其对全球气候变暖的响应. 干旱地区农业研究, 2007, 25 (2): 230–234.
- [14] 王钧, 蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素. 地理科学, 2008, 28(1): 83–88.
- [15] 杨明金, 张勃, 王海青, 等. 黑河流域 1950 年–2004 年出山径流变化规律分析. 资源科学, 2009, 31(3): 413–419.
- [16] 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.
- [17] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152–164.
- [18] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北地区气候由暖干向暖湿转型问题的评估. 北京: 气象出版社, 2003.
- [19] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 黑河出山径流的非线性特征分析. 冰川冻土, 2002, 24(3): 292–298.
- [20] 徐国昌, 董安祥. 我国西部降水量的准三年周期. 高原气象, 1982, 1(2): 11–16.

- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [22] 沈焕庭, 王晓春, 杨清书. 长江河口径流与盐度的谱分析. 海洋学报, 2000, 22(4): 17–23.
- [23] 王云璋, 薛玉杰, 彭子芳, 等. 太阳黑子活动与黄河径流、洪水关系初探. 西北水资源与水工程, 1997, 8(3): 30–38.
- [24] 蓝永超, 康尔泗, 张济世, 等. 近 50 年来 ENSO 与祁连山区气温降水和出山径流的对应关系. 水科学进展, 2002, 13(2): 141–145.
- [25] 陈得源. 黑河枯水年向下游调水难度分析. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(3): 223–225.
- [26] 孙宁, 李秀彬, 冉圣洪, 等. 潮河上游降水—径流关系演变及人类活动的影响分析. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41–47.
- [27] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响—基于经验统计模型的评估. 地理学报, 2008, 63(9): 958–968.
- [28] 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.

## The Study on Affecting Factors of Runoff Change at Ying Luo-xia Station of Heihe River

YANG Mingjin, ZHANG Bo

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

**Abstract:** Based on the runoff date for 45 years of Ying Luo-xia station at the main stream of Heihe River, studied the global change, sunspot activity, ENSO cycle and underlying surface variation affecting on the change of mountainous runoff at the main stream of Heihe River using correlation analysis, cross-spectrum analysis, statistical law analysis and precipitation-runoff double mass analysis. The results showed that: (1) The global change had influence on the runoff of Ying Luo-xia Station obviously; (2) The runoff of Ying Luo-xia Station and the number of sunspot had obvious relation on vibration period of 2 and 3.3 year, but vibration period change of the number of sunspot lagged behind the runoff of Ying Luo-xia Station; (3) The ENSO cycle had some influence on the runoff of Ying Luo-xia Station, but the influence of EL Nino and La Nina sustained shortly, influencing on the runoff of Ying Luo-xia Station when occurring obviously, but influencing the next year, runoff non-obviously; (4) The underlying surface variation had influence on the runoff of Ying Luo-xia Station non-obviously.

**Key words:** Heihe River; runoff change; affecting factors; the number of sunspot; ENSO cycle

本文引用格式:

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.