

# 新疆克里雅河源流区径流变化 与气候因子关系的非线性分析

凌红波<sup>1,2</sup>, 徐海量<sup>1</sup>, 张青青<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态重点实验室,  
乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用克里雅河源流区兰干站 1957~2009 年的年径流量、气温和降水量实测数据, 借助小波分析和 R/S 分析等方法探讨了径流量、气温和降水量的变化趋势及多时间尺度相关性。结果表明: (1) 年径流量与气温和降水量存在明显的正相关关系并皆呈增加趋势, 结合 R/S 分析, 这种增加趋势在未来的 50a 仍将可能持续。(2) 研究区年径流量、气温和降水量均存在 9 年的年际变化周期, 而在年代际上由于气温和降水量周期性不同致使径流量的周期为 15 年。另外, 三者在未来的 20 年存在不同的周期性突变。(3) 克里雅河源流区径流量与气温和降水量存在显著的非线性相关关系。年径流量的变化是气温和降水量综合作用的结果。

**关键词:** 克里雅河; 径流; 气候变化; 非线性; 小波分析

**文章编号:** 1000-0585(2012)05-0792-11

## 1 引言

地表径流是自然水文循环的一个重要过程, 径流量的产生与大气降水、气温和蒸发等气候因子的变化密切相关<sup>[1]</sup>。特别在干旱与半干旱区, 径流变化对气候因子的响应更为敏感, 微小的气候波动即会引起径流较大幅度的波动<sup>[2]</sup>。近百年来, 全球气温迅速升高, 降水量增加显著, 受全球气候变化影响, 我国西北干旱区气候也呈现向暖湿化转变的强烈信号<sup>[3]</sup>。在西北干旱区, 径流与气候因子皆具有明显的非线性特征与多尺度相关依赖性, 包含着周期、突变、混沌与分形特征等<sup>[4~6]</sup>。

克里雅河位于中昆仑山北麓, 塔里木盆地南缘的于田县境内, 自南向北纵贯全县, 且西邻策勒, 东部为戈壁砾石与民丰相接, 由土米亚河、皮什盖河、阿羌河和苏克塔亚河等 11 条支流汇合而成, 是于田县第一大河, 和田地区仅次于和田河。流域处于内陆腹地, 远离海洋, 北面受沙漠气候影响, 北冰洋的冷湿气流难以到达, 而东西方向的太平洋和大西洋水汽及南面的印度洋暖湿气流也被高山阻挡, 属暖温带内陆干旱荒漠气候区。近 50 年来, 由于克里雅河中游地段人口与耕地面积迅速增加, 引起水资源过度开发利用, 用于维持区域下游荒漠绿洲生态系统稳定的生态环境用水得不到保证, 导致下游河流流程缩短, 胡杨、柽柳等植被大面积死亡, 天然绿洲日益萎缩, 生态环境恶化加剧<sup>[7]</sup>。以往对克

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2012-02-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2009CB421308); 水利部公益性行业科研专项 (201101049)

作者简介: 凌红波 (1983-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事生态水文研究。

E-mail: linghongbo0929@163.com

通讯作者: 徐海量 (1971-), 男, 江苏宝应人, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区生态环境研究。

里雅河气候变化与径流量非线性特征的研究较少,因此,本文选取克里雅河源流区为研究对象,借助小波变换与 R/S 分析的方法,从多时间尺度探讨克里雅河源流区径流变化及其对气候变化的响应,以期为该流域水资源的合理配置及生态保护提供科学依据。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

克里雅河流域北临塔克拉玛干沙漠,南北长约 466km,东西宽 30~120km,呈牛腿状。流域总面积  $3.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中山区面积  $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平原区面积  $0.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,沙漠面积  $2.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域空间跨度为东经  $81^\circ 09' \sim 82^\circ 51'$ 、北纬  $35^\circ 14' \sim 39^\circ 29'$  (图 1),是我国西部生态环境最为严重脆弱地区之一<sup>[8]</sup>。

克里雅河全长 438km,纵坡 3.4‰,多年平均径流量  $7.215 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其源流出口努努买买提兰干水文站以上集水面积  $7358 \text{ km}^2$ ,测站高程 1880m。流域源流区多年平均气温  $9.53^\circ \text{C}$ ,极端最高气温  $43.0^\circ \text{C}$ ,发生于 1984 年 8 月 6 日,极端最低气温  $-26.3^\circ \text{C}$ ,发生于 1984 年 12 月 23 日。气温的时空分布为山区低于平原、冬天寒冷、夏季凉爽;降水量多年平均值为 122.9mm,年内主要集中在 4~9 月,占全年降水量的 87%,其中 6 月降水最多,月平均降水量为 26.35mm,11 月降水最少,月平均降水量为 0.95mm。多年平均蒸发量 ( $\Phi 20 \text{ cm}$ ) 为 1839.9mm,蒸发量主要集中在 4~9 月,约占全年的 77.8%。

### 2.2 数据来源与研究方法

**2.2.1 数据来源** 本文采用克里雅河源流兰干站 1957~2009 年的年径流量、气温和降水量进行多时间尺度的相关分析,该站以上未经人为引流和灌溉,可看作天然径流量。

**2.2.2 小波变换与小波交叉谱** 本文利用 Morlet 小波变换探讨克里雅河流域源流区气候因子与年径流量的多时间尺度的变化特征<sup>[9,10]</sup>。

小波函数为一组震荡变换的伸缩平移基  $\psi(t)$ 。将小波母函数  $\psi(t)$  进行伸缩平移,可以得到一组函数序列  $\psi(t)$  :

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R, a > 0 \quad (1)$$

式中,  $a$  为伸缩因子,  $\tau$  为平移因子,  $\psi(t)$  为子小波。

Morlet 小波函数为复数小波,其表达式为:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

式中,  $c$  为常数;  $i$  表示虚部。

小波变换是把一称为基本小波的函数做位移后,再在不同的尺度域下对待分析信号做内积。将函数  $f(t) \in L(R)$  在小波基下展开,得到  $f(t)$  的连续小波变换表达式,则小波系数为:

$$W_f(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau \quad (3)$$

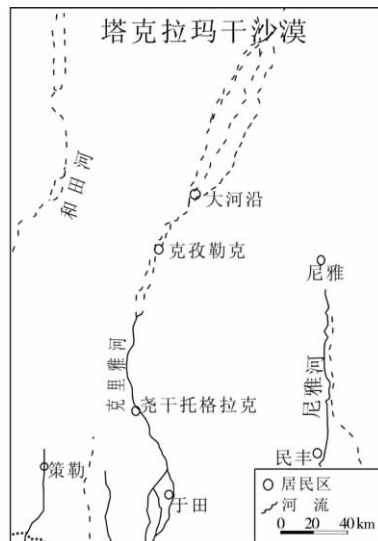


图 1 克里雅河流域

Fig. 1 Sketch map of the Keriya River Basin

交叉小波谱是将小波变换与交叉谱分析相结合产生的一种信号分析技术,它能够揭示出两个时间序列在多时间尺度上的相互关系。根据另一函数  $g(t)$  的小波变换  $W_g(a, t)$ , 则函数  $f(t)$ ,  $g(t)$  的交叉小波变换为:

$$G_{f,g} = W_f(a, t)W_g^*(a, t) \quad (4)$$

式中,  $a$  是尺度参数,  $t$  是平移参数, “\*” 表示共轭运算符。

**2.2.3 R/S 分析方法** R/S 分析法是由 Hurst 在分析尼罗河水文资料时提出的一种分形方法, Hurst 指数 ( $0 < H < 1$ ) 揭示了时间序列的分形特征<sup>[11~14]</sup>。对于不同的  $H$ , 表示序列有不同的趋势变化: 当  $H=0.5$  时, 表明时间序列是完全独立的, 没有相关性或只是短程相关; 当  $0 < H < 0.5$  时, 意味着未来的变化状况与过去相反, 即反持续性,  $H$  越小, 反持续性越强; 当  $H > 0.5$  时, 意味着未来的变化状况与过去一致, 这个过程具有持续性, 即过去的增长趋势意味着将来也具有增长趋势, 反之亦然,  $H$  越大持续性越强。

### 3 结果分析

#### 3.1 克里雅河径流与气候变化趋势分析

在干旱区, 气候因子是驱动区域水文循环的主要动力, 气温的变化影响着源流山区冰川与积雪的消融, 而大气降水是地表水资源的根本补给来源, 因此气温、降水量的变化对区域地表径流的形成与转化至关重要。利用 1957~2009 年克里雅河气温、降水量与径流量实测数据, 借助距平值以分析其变化特征 (图 2)。

由图 2, 53 年来克里雅河年径流量的总趋势表现为先降后升, 具体可分为 4 个阶段: (1) 1957~1967 年为径流量上升阶段, 5 年移动平均由负距平转变为正距平; (2) 1968~1972 年为下降阶段, 5 年移动平均由正距平转变为负距平; (3) 1973~1999 年为径流量波动时期, 并以负距平为主; (4) 2000~2009 年径流量为上升期且呈正距平。对于年均

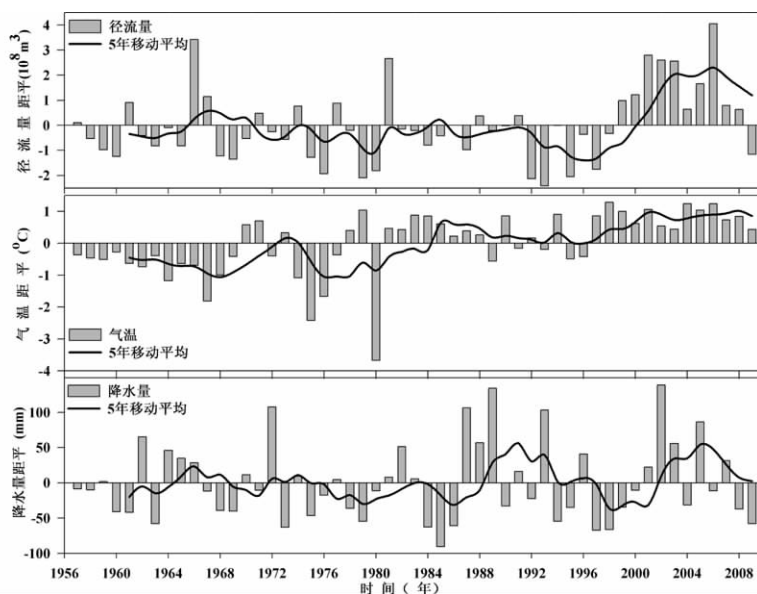


图 2 克里雅河径流与气候变化距平

Fig. 2 Anomalies of climate factors and annual runoff in the Keriya River

气温，克里雅河源流区 5 年移动平均表现为波动上升趋势，并在 1984 年由以负距平为主转变为以正距平为主。年均降水量在整个研究时段趋势变化不大，5 年移动平均正、负值呈周期性交替振荡，具体：1957~1974 年为平水期，1975~1986 年以负距平为主，为枯水期，而随后的距平值在 1987~1993、1994~2000 和 2001~2007 年以正~负~正为主，相应的表现为枯水期~丰水期~枯水期的转变。综合分析，克里雅河流域径流量与气温较降水量总体上保持较好的协调一致性，这在表 1 中也已证明。在表 1 中，通过参数 Pearson 关联检验和非参数 Kendall 关联检验，克里雅河年径流量与气温的关联系数皆大于降水量，并且两种检验结果均表明径流量与气温为显著的正相关。

表 1 克里雅河径流量与气候因子的相关分析

Tab 1 Correlation test between annual runoff and climate factors in the Keriya River

类别	Pearson 关联检验			Kendall 关联检验		
	相关系数	Sig. (two-tailed)	$H_0$	相关系数	Sig. (two-tailed)	$H_0$
气温	0.310*	0.024	R	0.210*	0.029	R
降水量	0.262	0.059	A	0.205*	0.031	R

注：“\*”表示相关性显著；“R”表示拒绝原假设，“A”表示接受原假设。

分析克里雅河以往径流量与气候因子的变化特征有利于了解研究区径流量与气候因子之间的相关关系。但对于水资源管理者而言，分析预测气候因子及径流量在未来的变化趋势，对实现研究区水资源的可持续利用具有重要意义。利用研究区实测数据进行线性拟合，并结合 R/S 分析得到表 2 和图 3。

表 2 克里雅河径流量与气候因子的 R/S 分析

Tab 2 R/S analysis of the annual runoff and climate factors in the Keriya River

类别	N	线性方程	平均值	变异系数	Hurst 指数
径流量 ( $10^8 \text{ m}^3$ )	53	$Y=0.0247x+6.6733$	7.34	0.198	0.6624
气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	53	$Y=0.0349x+8.4209$	9.4	0.105	0.8131
降水量 (mm)	53	$Y=0.2998x+115.13$	123.22	0.448	0.6563

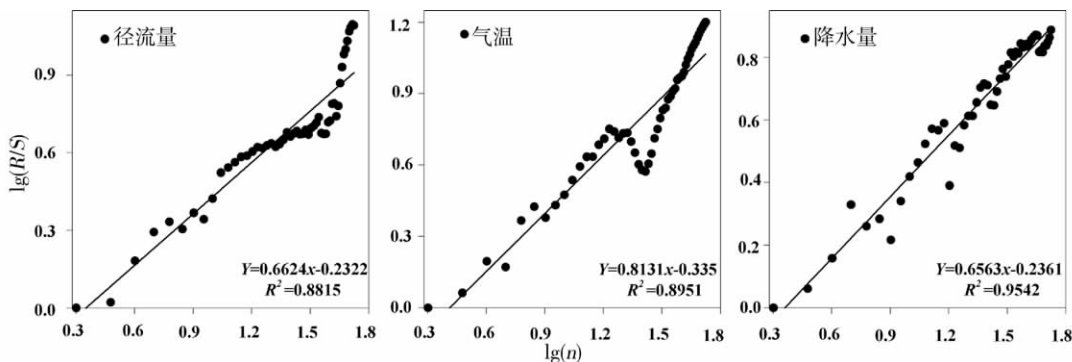


图 3 克里雅河径流量与气候因子的 R/S 分析

Fig.3 R/S analysis of annual runoff and climate factors in the Keriya River

由表 2 和图 3, 克里雅河年径流量 53 年的平均值为  $7.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 并以  $0.0247 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的速率增加, 经过 R/S 分析其 Hurst 指数为 0.6624, 大于 0.5, 具有持续性, 这意味着在未来的 50 年研究区径流量仍将可能保持增加趋势。与径流量相似, 气温与降水量分别以  $0.0349^\circ\text{C}/\text{a}$  和  $0.2998\text{mm}/\text{a}$  的速率上升, 其平均值分别为  $9.4^\circ\text{C}$  和  $123.22\text{mm}$ , 同时 Hurst 指数分别为 0.8131 和 0.6563, 皆大于 0.5, 这表明克里雅河气温、降水量在未来的 50 年亦仍将可能保持上升。另外, 从图 3 中还可以看出, 克里雅河年径流量与气温的 Hurst 指数分别在 1992 和 1983 年出现了明显的拐点, 因此以上述拐点为基准, 将径流量与气温各分为两个时段来验证利用 R/S 分析进行径流量与气温预测的可行性 (图 4 和表 3)。

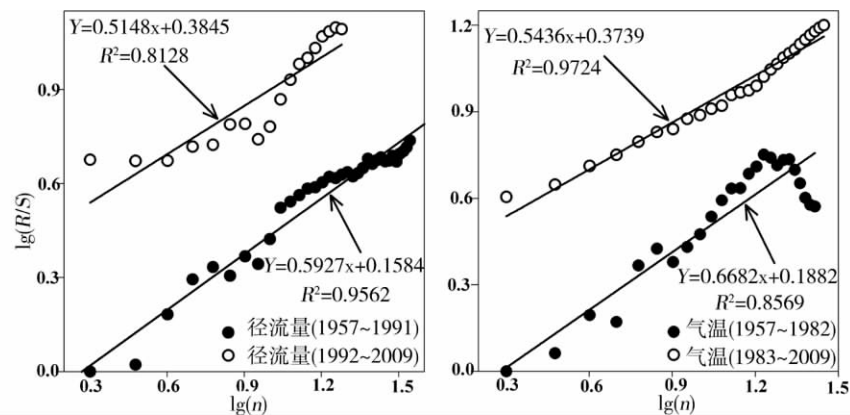


图 4 克里雅河径流量与气温的分段 R/S 分析

Fig 4 R/S analysis on different periods of annual runoff and temperature in the Keriya River

表 3 克里雅河径流量与气温的分段线性趋势和 R/S 分析

Tab. 3 Linear trend and R/S analysis of different periods of annual runoff and temperature in the Keriya River

类别	N	线性方程	平均值	变异系数	Hurst 指数
径流量 ( $10^8 \text{ m}^3$ )	1957~1991	$Y=0.001x+7.1011$	7.12	0.161	0.5927
	1992~2009	$Y=0.2019x+5.8516$	7.77	0.242	0.5148
气温 ( $^\circ\text{C}$ )	1957~1982	$Y=0.003x+8.7556$	8.8	0.117	0.6682
	1983~2009	$Y=0.0231x+9.5837$	9.9	0.054	0.5436

从表 3 和图 4 可知, 克里雅河径流量在 1957~1991 年的线性斜率为  $0.001 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 而 Hurst 指数为 0.5927, 这表明在未来的一段时段径流量仍将保持增加, 而在 1992~2009 年径流量的线性斜率为  $0.2019 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 大于 0, 从而验证了前一时段的预测。另外, 从该时段的 Hurst 指数为 0.5148 可预测, 在 2009 年后的一段时间径流量的这种增加趋势仍将可能持续, 这也与以上基于 53 年径流量时间序列的预测结果保持了较好的一致性。与径流量相似, 气温在 1957~1982 年呈上升趋势且 Hurst 指数大于 0.5, 这意味着在 1983~2009 年气温仍保持上升, 而该时段线性斜率为  $0.0231^\circ\text{C}$ , 也验证了利用 R/S 分析对研究区气温预测的正确性。同时, 其 Hurst 指数值在 1983~2009 年为 0.5436, 表明在未来的一段时间, 克里雅河气温仍将可能处于上升趋势, 这也与利用 R/S 分析对气温 53 年时间序列进行趋势预测的结论一致。因此, 这也在一定的程度上表明了利用 R/S 分

析对克里雅河径流量及气候因子进行趋势预测是可行和可信的。

### 3.2 克里雅河年径流量与气候因子的非线性分析

大量研究结果证明<sup>[13~15]</sup>，西北干旱区径流量、气温和降水量皆存在明显的非线性变化和相关性，而对于克里雅河三者的非线性相关关系如何却未见报道。鉴于此，利用克里雅河源流区 1957~2009 年的水文气象资料，拟合得到径流量随降水量、气温变化的三维图（图 5）。

在图 5 中，克里雅河径流量与气温和降水量存在明显的非线性相关关系。在降水量不变的情况下，径流量随气温的升高而升高，而在气温不变的条件下，径流量随降水量的增加而总体为先增后减。这是由于塔里木河流域高温少雨，径流主要依靠源流冰川融水补给，因此对气温的变化也较降水量更为敏感。克里雅河作为塔里木河的分支水系，其径流量补给来源中冰雪融水占 71%、降水量占 9%、地下水占 20%，因此流域径流量变化与气温的关联性优于降水量（表 1），这也与徐海量等对塔里木河流域气候因子与径流量相关关系的研究结论具有一致性<sup>[16]</sup>。同时，由于在研究区冰雪融水为径流量的主要补给来源且径流对气温的响应更为敏感，因此，在降水量偏多的低温多雨期，会因冰雪融水量的持续减少而致使流域径流来水量的相应减少。由图 5 可知，在克里雅河流域，当年均气温大于 9℃、降水量在 150~200mm 范围内，径流量处于较大值。

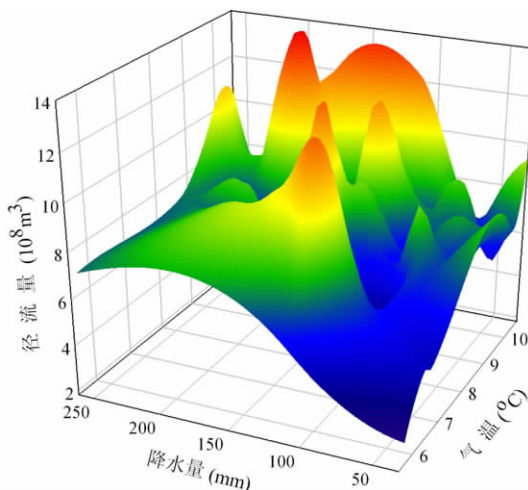


图 5 克里雅河源流区径流量与降水量、气温的三维图

Fig 5 Map of the relationship between annual runoff, precipitation and air temperature of headwater region of the Keriya River from 1957 to 2009

**3.2.1 克里雅河径流量与气候因子的小波分析** 小波分析可以较好的甄别出实测序列在多时间尺度下周期变化的位相和强度，并能够为短期气候及径流量预测提供科学依据<sup>[17,18]</sup>。利用研究区 53 年径流量、气温和降水量数据，借助 Morlet 小波函数得到其时间序列的时频分布图 6。图 6 中，小波系数值大于 0 时为正位相，表示径流量、降水量偏多或气温偏高，小于 0 为负位相，表示径流量、降水量偏少或气温偏低，0 点处表示突变年，意味着在该年径流量、降水量发生了由偏少（偏多）向偏多（偏少）的突变，气温发生了由偏低（偏高）向偏高（偏低）的突变。

由图 6，由小波方差图可知，克里雅河年径流量在年际和年代际分别存在 9 年和 15 年的显著周期。9 年周期处存在明显的高频振荡，其突变点分别在 1958、1960、1963、1965、1968、1971、1973、1976、1979、1981、1983、1986、1988、1990、1992、1994、1997、2000、2003、2005 和 2008 年，且位相呈负~正~...~负 21 次交替变化；15 年周期处的 1963~1971、1981~1989 和 1999~2007 年为正位相，径流量偏多，而其他时段为负位相，表明径流量偏少。

图 7 显示了克里雅河源流区气温与降水量小波系数的时频分布图。由图 7，气温存在

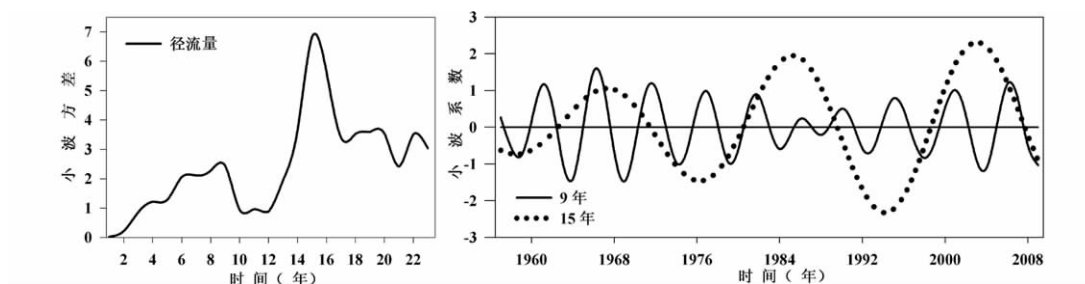


图 6 克里雅河年径流量的小波分析

Fig. 6 Wavelet analysis of annual runoff in the Keriya River

9 年和 22 年的显著周期。9 年周期处的 1959、1962、1966、1969、1972、1976、1979、1982、1985、1988、1993、1996、2000、2003 和 2007 年，其位相发生了负~正~...~负 15 次交替变化，且在 1984 年后小波系数数值较小，周期性不强；22 年周期处在 1984 年气温发生了由低向高的突变。

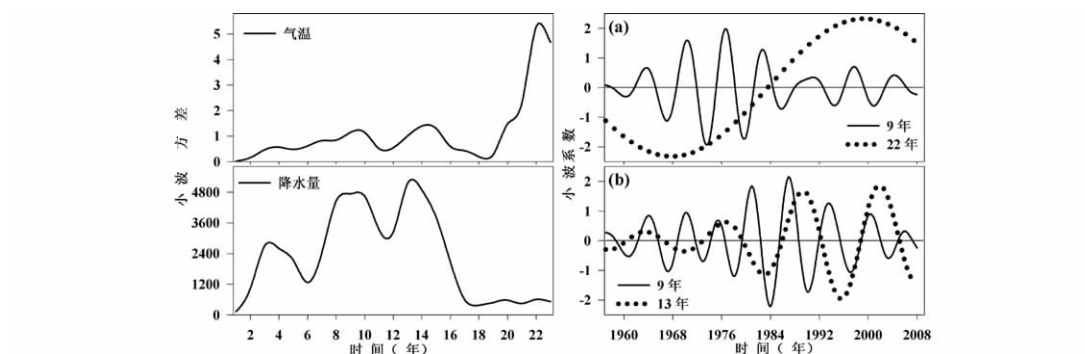


图 7 克里雅河源流区气温、降水量的小波分析

Fig. 7 Wavelet analysis of temperature and precipitation in the Keriya River

在年际变化上，与径流量和气温相似，降水量也存在 9 年的显著周期，而在年代际上以 13 年周期最为明显。降水量在 9 年周期处的 1959、1963、1966、1969、1972、1975、1977、1980、1983、1986、1989、1992、1996、1999 和 2003 年发生了偏少~偏多~...~偏少 15 次突变，13 年周期处的 1961、1967、1973、1980、1986、1993、1999 和 2006 年发生了偏多~偏少~...~少 8 次突变。

由以上分析可知，克里雅河年径流量、气温和降水量存在明显的周期性和趋势性，且大周期内包含小周期的高频振荡。综合 R/S 分析结果可知，研究区年径流量、降水量和气温在未来的一段时间将呈波动性增加和上升。根据已有的研究成果，在西北干旱区，降水量和夏季干旱指数皆存在 9~14 年的显著周期，这与克里雅河降水量的主周期是一致的，而气温 9 年与 22 年周期分别与北极涛动和太阳黑子的活动周期相同<sup>[19~22]</sup>。径流量与降水量、气温皆存在 9 年的一致性周期，而径流量 15 年周期与气温、降水量存在明显的差异，这是由于克里雅河径流量主要依靠源流山区积雪和冰川融水补给，温度升高时但冰雪消融需较长时间，同时山区降水量与冰雪融水的一部分还将首先进入地下水并经潜流溢出对径流进行补给，从而温度升高对径流的影响具有一定的滞后性，而降水量对径流的影

响较气温具有很强的时效性，特别在夏季，短时间的强降水即会引起河流径流量的迅速增加。因此，降水量 13 年周期与气温 22 年周期强度在不同时间尺度处相互叠加或抵消的综合作用致使克里雅河径流量出现 15 年的周期波动，而 Chen 等在塔里木河源流区的研究成果也证实了这一结论<sup>[23]</sup>。另外，鉴于克里雅河源流区径流量、气温和降水量皆存在 9 年的主周期，因此利用三者在该周期处的小波系数进行非线性拟合，得到如下方程：

$$Y(\text{年径流量}) = 0.0256 \times T(\text{年气温}) + 0.0211 \times P(\text{年降水量}) + 0.005 \quad R = 0.0353 \quad (5)$$

由方程可知，研究区气温对年径流量的拟合系数为 0.0256，大于降水量，因此在克里雅河源流区，气温对径流量的影响要大于降水量，这也进一步印证了表 1 中气温与径流量的相关关系较降水量更为密切的研究结论。

**3.2.2 径流量、降水量和气温未来局部周期内趋势和突变性预测** 以克里雅河径流量（15 年）、气温（22 年）和降水量（13 年）的最强主周期（小波方差最大值）为依据，对三者未来的周期性变化和突变进行预测，这可为研究区实现水资源的合理配置提供理论依据。利用研究区径流量、气温和降水量在 15 年、22 年与 13 年处的小波系数值，分别建立与年份  $t$  之间的回归方程：

$$\text{对于年径流量: } R(t) = 1.6761 \sin\left(\frac{\pi t}{9.09} + 4.1054\right) \quad R^2 = 0.8887$$

$$\text{气温: } T(t) = 2.3594 \sin\left(\frac{\pi t}{31.54} + 3.4567\right) \quad R^2 = 0.9999 \quad (6)$$

$$\text{降水量: } P(t) = 1.0896 \sin\left(\frac{\pi t}{6.42} + 3.7391\right) \quad R^2 = 0.7278$$

根据拟合方程，综合考虑研究区气温、年径流量和降水量主周期未来可能持续的时间长度，并借鉴姜世中研究成果<sup>[10]</sup>，选择 20 年为预见期，得到克里雅河年径流量与气候因子的变化特征（图 8）。由图 8 知，2010~2029 年的径流量在 2017 年和 2026 年发生了偏多、偏少 2 次突变，气温在 2017 年发生了由偏高向偏低的突变；降水量的突变点发生在 2013、2019 和 2026 年，且 2010~2012 年为负位相，降水量偏少，2013~2018 年为降水量偏多期，2019~2025 年转变为偏少期，而随后的 4 年进入降水量的偏多时期。

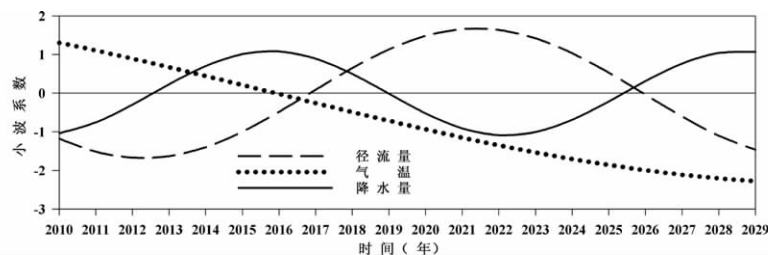


图 8 克里雅河径流量、气温和降水量在 2010~2029 年的小波系数

Fig 8 Wavelet coefficients of annual runoff, temperature and precipitation in the Keriya River from 2010 to 2029

### 3.3 径流量与气候因子之间的多尺度相关

为了进一步分析年径流量与气温、降水量之间的多尺度相关关系，本文利用交叉小波谱进行检验。交叉小波谱是通过不同时间序列的小波系数求积而得，它能够揭示两个时间序列在不同时间尺度下的相互关系，系数越大，相关性越好。图 9 反映了克里雅河源流区径流量与气温和降水量之间的多分辨率相关关系（图中，实线表示正相关，虚线表示负



相关, 粗虚线表示正、负位相转变点, 灰色区域代表显著区)。图中灰色显著区域为小波功率谱与置信水平为 95% 的红噪声总体谱的比值, 当比值大于 1 即表示相关性显著<sup>[24]</sup>。

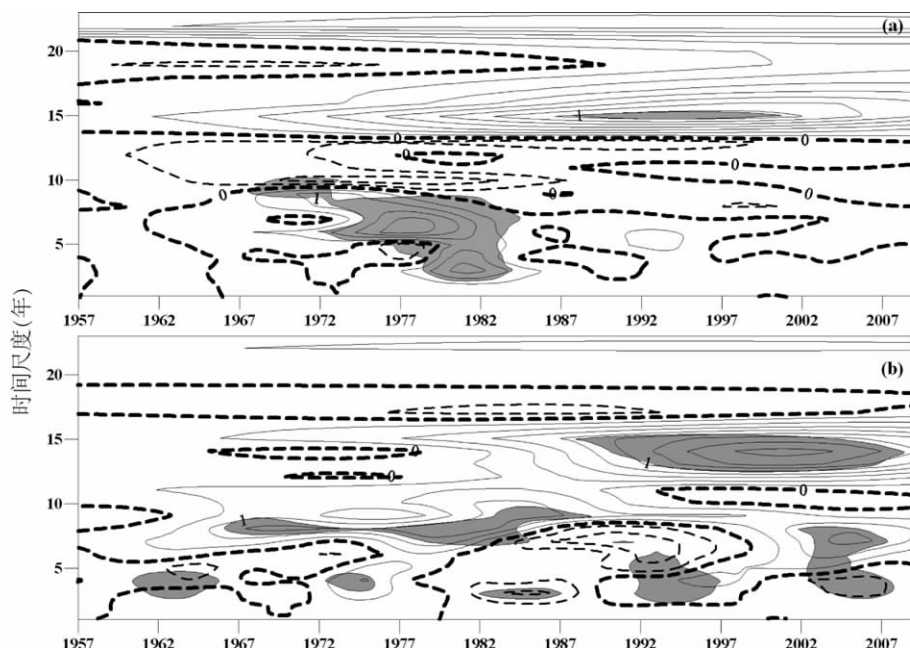


图 9 克里雅河径流量与气候因子的交叉小波分析 (a. 径流量与气温; b. 径流量与降水量)

Fig. 9 Cross-wavelet analysis of annual runoff and climate factors in the Keriya River  
(a. annual runoff and temperature; b. annual runoff and precipitation)

从年交叉小波谱看, 在图 9a 中, 53 年来克里雅河源流区径流量与气温在不同时间尺度主要以正相关为主。大于 15 年周期以正相关为主, 并在该时间尺度处贯穿整个时间序列, 同时在 1987~2002 年这一时段显著; 10~13 年时间尺度处相关性不明显; 正相关显著区在 2~10 年时间尺度处的 70 年代至 80 年代初期, 而其他时段相关性较弱, 这也反映了在干旱、半干旱区内陆河对气温变化的敏感性。由图 9b 可知, 径流量与降水量在大于 15 年时间尺度处相关性较差, 而 14 年时间尺度处的 80 年代后期至 2008 年呈显著正相关, 这种显著相关关系亦表现在 60 年代后期至 80 年代后期和 2002~2007 年的 6~8 年周期带处; 0~5 年时间尺度处的 60 年代初期, 1982~1987 年和 2002~2008 年为显著负相关, 而在 1972~1975 年和 1992~1997 年表现为显著的正相关关系。径流量与降水量存在显著的负相关, 这看似与现实不符, 究其原因, 一方面是由于原始序列带有明显的噪声, 而在多尺度下的小波变换时丢失了一部分信息; 另一方面, 降水量的增加导致气温降低, 进而致使径流量的减少, 这也进一步说明了克里雅河径流量的增加是气温和降水量增加综合作用的结果且与气温的关系更为密切。

#### 4 结论

本文利用小波分析、R/S 分析和交叉小波谱, 从多时间尺度探讨了径流及气候因子的非线性变化特征和相关关系, 其结论如下:

(1) 从单时间尺度看, 克里雅河源流区径流量与气温和降水量存在明显的正相关关系, 并且径流量与气温的相关性优于降水量。通过线性趋势分析, 1957~2009 年克里雅河年径流量、气温和降水量均为增加趋势, 结合 R/S 分析, 三者的 Hurst 指数皆大于 0.5, 具有持续性, 这表明在未来的 50 年三者仍可能将保持原来的变化趋势。

(2) 克里雅河源流区水文过程是一个复杂的非线性系统, 具有周期性和突变特性。根据小波分析, 在年际变化上, 研究区年径流量、气温和降水量均存在 9 年的变化周期, 而在年代际上径流量与气温和降水量周期性不同, 这是由于气温和降水量大小周期相互抵消和叠加的结果。

(3) 研究区年径流量、气温和降水量分别在 15 年、22 年与 13 年处周期性显著, 因此利用三者主周期处的小波系数值进行周期性拟合并预测, 未来 20 年径流量在 2017~2026 年处于偏多时期, 而其他时段为偏少期; 气温在 2017 年发生了周期性的减少突变, 而降水量在 2013、2019 和 2026 年发生了偏多、偏少和偏多的三次交替性突变。

(4) 从年交叉小波谱看, 53 年来克里雅河源流区径流量与气温在 15 年时间尺度处的 1987~2002 年和 2~10 年时间尺度处的 70 年代至 80 年代初期存在显著性正相关。径流量与降水量在 14 年时间尺度处的 80 年代后期至 2008 年, 6~8 年周期处的 60 年代后期至 80 年代后期和 2002~2007 年, 0~5 年时间尺度处的 1972~1975 年和 1992~1997 年皆表现为显著的正相关; 此外, 0~5 年时间尺度处的 1982~1987 年和 2002~2008 年为显著负相关。上述相关性表明, 研究区径流量的非线性变化是气温和降水量共同作用的结果。

#### 参考文献:

- [1] 李红军, 江志红, 刘新春, 等. 阿克苏河径流变化与北大西洋涛动的关系. 地理学报, 2008, 63(5): 491~501.
- [2] Gan T Y. Reducing vulnerability of water resources of Canadian prairies to potential droughts and possible climate warming. Water Resources management, 2000, 14(2): 111~135.
- [3] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥, 等. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219~226.
- [4] Xu Jianhua, Chen Yaning, Li Weihong, *et al.* An integrated statistical approach to identify the nonlinear trend of runoff in the Hotan River and its relation with climatic factors. Stoch Environ Res Risk Assess, 2011, 25: 223~233.
- [5] Xu Jianhua, Chen Yaning, Ji Minhe, *et al.* Climate change and its effects on runoff of Kaidu River, Xinjiang, China: A multiple time-scale analysis. Chinese Geographical Science, 2008, 18(4): 331~339.
- [6] Xu Jianhua, Chen Yaning, Li Weihong, *et al.* Long-term trend and fractal of annual runoff process in mainstream of Tarim River. Chinese Geographical Science, 2008, 18(1): 77~84.
- [7] 胡文康, 张立运. 克里雅河下游荒漠河岸植被的历史、现状和前景. 干旱区地理, 1990, 13(1): 46~51.
- [8] 陈锐, 邓祥征, 战金艳, 等. 流域尺度生态需水的估算模型与应用——以克里雅河流域为例. 地理研究, 2005, 24(5): 725~731.
- [9] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61~78.
- [10] 姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析. 地理研究, 2008, 27(1): 221~228.
- [11] Hurst H E, Black R P, Simaike Y M. Long-term Storage: An Experimental Study. London: Constable, 1965. 1~155.
- [12] 韦素琼, 陈艳华, 耿静媛. 基于相似系数和 R/S 分析方法的闽台产业同构性. 地理研究, 2010, 29(3): 491~499.
- [13] Jiang Yan, Zhou Chenghu, Cheng Weiming. Stream flow trends and hydrological response to climatic change in Tarim headwater basin. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(1): 51~61.

- [14] 鲁凤,徐建华,陈亚宁,等. 叶尔羌河源流区近 50 年来年径流变化及其对气候变化的响应. 第四纪研究,2010, 30(1): 152~158.
- [15] Xu Jianhua, Li Weihong, Ji Minhe, *et al.* A comprehensive approach to characterization of the nonlinearity of runoff in the headwaters of the Tarim River, western China. Hydrological Processes,2010,24: 136~146.
- [16] 徐海量,叶茂,宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探. 地理科学,2007,27(2): 219~224.
- [17] 张少文,丁晶,廖杰等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析. 四川大学学报: 工程科学版,2004,36(3): 32~37.
- [18] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析. 地理研究,2009,28(2): 354~362.
- [19] 王澄海,崔洋. 西北地区近 50 年降水周期的稳定性分析. 地球科学进展,2006,21(6): 576~584.
- [20] 杨金虎,杨启国,姚玉璧,等. 中国西北夏季干旱指数研究. 资源科学,2006,28(3): 17~22.
- [21] 何春,何金海. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究. 南京气象学院学报,2003,26(1): 1~7.
- [22] 曲维政,邓声贵,黄菲,等. 太阳磁场磁性指数异常变化对南北半球中纬度气候的影响. 地球物理学报,2004,47(3): 398~404.
- [23] Chen Yaning, Pang Zhonghe, Hao Xingming, *et al.* Periodic changes of stream flow in the last 40 years in Tarim River Basin, Xinjiang, China. Hydrological Processes, 2008, 22: 4214~4221.
- [24] 孙卫国,程炳岩,李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关. 地理学报, 2009,64(1): 117~127.

## Nonlinear analysis of runoff change and climate factors in the headstream of Keriya River, Xinjiang

LING Hong-bo<sup>1,2</sup>, XU Hai-liang<sup>1</sup>, ZHANG Qing-qing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the data observed of the temperature, precipitation and annual runoff at the Langan Hydrological Station of the Keriya River from 1957 to 2009, the paper studied the change trend and multi-time scale correlation between the annual runoff and climatic factors by using methods of wavelet analysis and R/S analysis. The results are shown as follows. (1) There is a positive correlation among the annual runoff, temperature and precipitation, which have the significant increasing trends; with R/S analysis, these increasing trends are likely to continue in the coming 50 years. (2) The interannual variations of runoff, temperature and precipitation present a cycle of 9 years, and the decadal variations of annual runoff have a 15-year cycle owing to different periods of temperature and precipitation. Besides, there would be different abrupt changes of the runoff, temperature and precipitation in the coming 20 years. (3) There are significant nonlinear correlations among the annual runoff, temperature and precipitation in the headstream of Keriya River. In addition, annual runoff change is due to the combined effects of temperature and precipitation.

**Key words:** Keriya River; runoff; climate change; nonlinear; wavelet analysis