

# 窟野河流域径流变化及人类活动对其的影响率

郭巧玲<sup>1</sup>, 陈新华<sup>1</sup>, 刘培旺<sup>2</sup>, 方海军<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 黄河中游水文水资源局, 山西 榆次 030600; 3. 河南安宏信息科技有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 利用王道恒塔、温家川 2 个水文站的实测降水、径流资料, 应用 M—K 秩相关系数、R/S 分析、降水—径流双累积曲线法等多种数值模型方法, 分析了窟野河径流年际变化特征、径流变化趋势、降水变化以及人类活动对径流变化的影响。结果表明: (1) 窟野河流域多年径流变化呈下降趋势, 20 世纪末以来尤为明显。(2) 王道恒塔和温家川 2 个水文站的 Hurst 指数分别为 0.853 和 0.803, 表明未来一段时间内窟野河年径流变化趋势将与过去保持同一态势, 有持续递减的特征。(3) 不同历史阶段, 人类活动的剧烈程度不同, 对径流量减少的影响亦不同。影响最剧烈的阶段为 1997—2010 年, 该阶段人类活动对径流减少的影响所占比例在 2 个水文站分别高达 80.48% 和 93.62%。人类活动的加剧是导致窟野河径流量锐减的主要原因。

**关键词:** 窟野河流域; 径流变化; M—K 突变检验; R/S 分析; 人类活动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0110-04

中图分类号: P333, TV121

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.034

## Variation of Runoff and Influence of Human Activity Rate in Kuye River Basin

GUO Qiao-ling<sup>1</sup>, CHEN Xin-hua<sup>1</sup>, LIU Pei-wang<sup>2</sup>, FANG Hai-jun<sup>3</sup>

(1. Institute of Resource & Environment, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454003, China; 2. Hydrology and Water Resources Bureau of the Middle Reaches of Yellow River, Yuci, Shanxi 030600, China; 3. He'nan Anhong Information Technology Co., Ltd, Zhengzhou, He'nan 450000, China)

**Abstract:** Based on historical records from two hydrological stations of Wangdaohengta and Wenjiachuan, the runoff variation characteristics and influence factors, which include runoff inter-annual variation characteristics, changing trend, precipitation change, and the impact of human activities, were analyzed by using different analyzing methods, such as Mann—Kendall trend analysis, R/S analysis, and double mass curve for annual rainfall stream flow. The results showed that the multi-year change of runoff had a distinctive decreased tendency, especially since the end of the 20th Century. The Hurst index were 0.853 and 0.803 for the Wangdaohengta and Wenjiachuan stations, respectively, which indicates that the decreasing trends of runoff in Kuye River would continue in the future. The rainfall and human activities had a different influence on runoff in different periods. During 1997—2010, the runoff descending proportions caused by the human activities are as high as 80.48% and 93.62% in Wangdaohengta and Wenjiachuan stations, therefor aggravating human activities were the main reason for runoff descending in Kuye River.

**Keywords:** Kuye River basin; runoff variation; Mann—Kendall trend analysis; R/S analysis; human activity

径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用, 其演变过程既表现出确定性的规律, 同时也有强烈的随机性<sup>[1]</sup>。随着全球变暖和人类活动影响的加剧, 河川径流发生了显著的时空变化, 直接影响了流域水资源的配置、开发与利用, 以及河

流生态系统的物理、化学和生物过程<sup>[2]</sup>。窟野河流域随着黄河沿岸能源化工基地建设步伐的加快, 该流域径流过程发生了巨大变化, 水资源供需矛盾日益突出, 流域甚至出现严重的断流现象。而以往的研究工作, 主要集中在窟野河产沙特性<sup>[3-4]</sup>和洪水特征的分

收稿日期: 2013-08-31

修回日期: 2013-09-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“煤矿开采对地表径流影响机理及评价模型研究”(41201020)

作者简介: 郭巧玲(1978—), 女(汉族), 陕西省华阴县人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的教学和研究工作。E-mail: guoqiaoling@hpu.edu.cn.

析<sup>[5-6]</sup>,较少涉及径流变化及人类活动影响的研究,仅有赵晓坤等<sup>[7]</sup>分析了1954—1993年间的径流量变化。因此,很有必要对窟野河近年来的径流变化及人类活动对径流的影响进行系统分析,深入认识窟野河径流演化规律和人类活动影响程度,为流域水资源合理开发利用提供依据,同时为黄河中游治理提供科学依据。

## 1 研究区概况

窟野河发源于内蒙古自治区伊克昭盟东胜市,从神木县石圪台进入陕西省境内,于陕西省神木县贺家川乡沙峁头村汇入黄河,干流全长241.8 km,流域面积8 706 km<sup>2</sup>。支流倬牛川与干流的交汇口以上为乌兰木伦河,交汇口以下称窟野河<sup>[7]</sup>。流域地处黄河中游干旱、半干旱地区,多年平均气温7.9℃,平均降水量410 mm左右,无霜期280 d。受大陆性季风影响,春季干旱少雨、夏季多有暴雨、秋季降霜早冻、冬季严寒稀雪。流域地形、地貌可分为风沙区和黄土丘陵沟壑区两大类,窟野河神木以上位于毛乌素沙漠的南缘,属风沙区,地势平坦,地表大部分为沙层覆盖,区内沙丘连绵,滩地、海子星罗棋布;神木以下为黄土丘陵沟壑区,区内丘陵起伏,沟壑纵横,地形破碎,黄土土质疏松,植被稀少<sup>[3]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

窟野河流域现有王道恒塔、新庙、神木、温家川等4个基本水文站。其中,温家川是窟野河流域的出口

控制站。本研究以王道恒塔站和温家川站为代表,选用王道恒塔站1960—2010年和温家川站1953—2010年逐月实测径流资料和2个水文站1960—2010年的降水观测资料,数据来自黄河流域水文年鉴。

所用的研究方法包括累积距平法,滑动平均法, Mann—Kendall法, R/S分析法等<sup>[8-14]</sup>。

## 3 径流变化分析

### 3.1 径流年际变化特征分析

变差系数 $C_v$ 和年极值比常用来反映河流径流年际变化的总体特征。从表1可知,王道恒塔站历年最大径流量 $5.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最小径流量 $3.80 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,多年均值为 $1.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,径流年际极值比为13.82,变差系数1.33。温家川站历年最大径流量 $1.37 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,最小径流量 $1.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,多年均值为 $5.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,径流年际极值比为10.97,变差系数0.57。各站点的径流年际极值比和变差系数都比较大,说明窟野河径流丰枯变化比较剧烈,而且径流年际极值比和变差系数从上游至下游呈减小的趋势。

表2显示了窟野河2水文站自20世纪60年代以来的年代际平均径流量。由表2可以看出,2个水文站的年代际平均径流量始终处于减少状态。对于王道恒塔站,径流减少幅度持续增加。21世纪初平均年径流量是多年均值的38%,仅为20世纪60年代平均年径流量的26%。就温家川站而言,21世纪初的径流量减少幅度最大,其径流量是多年均值的30%,仅为20世纪60年代平均年径流量的23%。

表1 窟野河径流量年际变化特征

$10^8 \text{ m}^3$

站名	多年均值	变差系数	最大年径流量			最小年径流量			极值比
			年份	径流量	与多年均值比	年份	径流量	与多年均值比	
王道恒塔	1.73	1.33	1961	5.25	3.03	2000	0.38	0.22	13.82
温家川	5.31	0.57	1959	13.71	2.58	2009	1.25	0.23	13.71

表2 窟野河各水文站年代际平均径流量  $10^8 \text{ m}^3$

年代	1960—1969年	1970—1979年	1980—1989年	1990—1999年	2000—2010年	多年平均
王道恒塔	2.54	2.42	1.84	1.31	0.66	1.75
温家川	7.33	7.23	5.36	4.48	1.66	5.48

### 3.2 径流变化趋势分析

图1为窟野河2个水文站的年径流量变化趋势。由图1可以看出,近几十年来2个水文站的年径流量均表现出递减的趋势,王道恒塔站线性趋势系数为-0.045,温家川站线性趋势系数为-0.125。为了更

明显地分析径流量年际变化的阶段,分别绘制了王道恒塔水文站1960—2010年和温家川水文站1953—2010年天然径流量累积距平曲线(图2)。由图2可以看出,王道恒塔站1960—1985年,径流量基本处于上升趋势;1986—1995年该站径流量出现一定的下降趋势;1996—2010年,径流量下降幅度显著增大。温家川站1953—1979年,径流量基本处于上升趋势;1980—1997年,径流量出现一定的下降趋势;1998—2010年,径流量下降幅度显著增大。2站都是在20世纪末出现径流量大幅减少的现象。

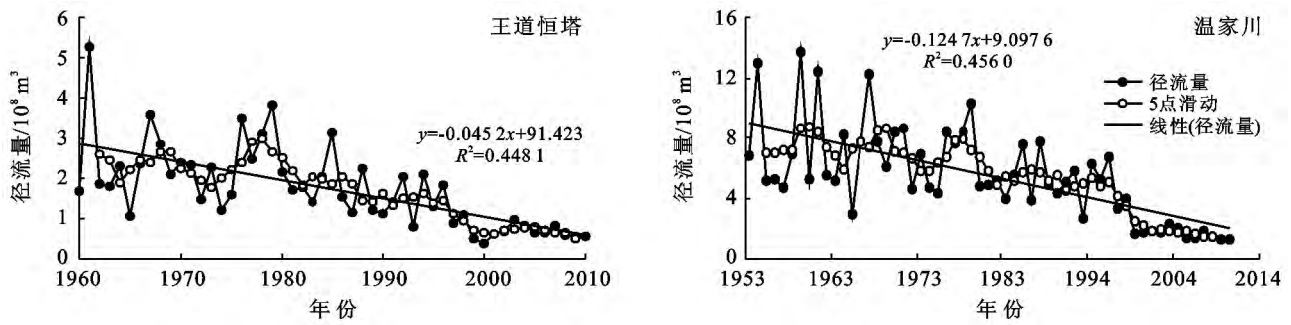


图 1 窟野河各水文站年径流量变化趋势

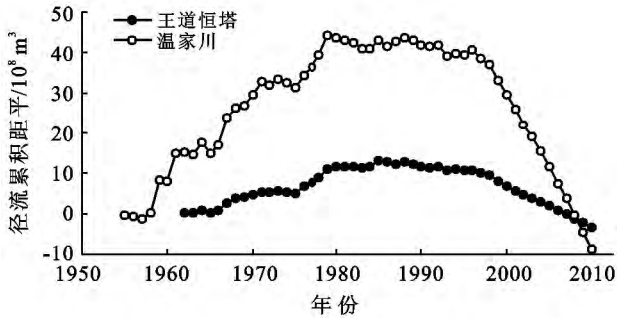


图 2 窟野河流域年径流累积距平曲线

采用  $R/S$  分析法对窟野河 2 个水文站的年径流量序列进行分析来说明径流量序列未来的变化趋势。由分析结果可知,王道恒塔和温家川 2 个水文站的 Hurst 指数( $H$ )分别为 0.853 和 0.803,  $H$  值均大于 0.5,说明 2 个水文站未来的年径流变化趋势与过去相同,呈持续递减的特征。若气候变化和人类活动依然按照现在的趋势发展,窟野河年径流量将继续呈现递减趋势。

### 3.3 径流变化突变点分析

利用  $M-K$  突变检测方法对流域径流序列进行突变分析。分析结果表明,在 0.05 显著性水平下,王道恒塔站 1985 年之前,  $UF$  值绝大多数大于零,说明在该时段径流量呈增加趋势;1985—1995 年,  $UF$  值均小于零,说明在该段时间径流量呈减少趋势;  $UF$  与  $UB$  曲线交叉点发生在 1995 年,且交点超过信度线,说明 1995 年是其径流突变开始年份,出现了径流量的大幅显著下降。对于温家川站,1983 年之前,  $UF$  值绝大多数大于零,说明在该时段径流量呈增加趋势;1983—1998 年,  $UF$  值均小于零,说明在该段时间径流量呈减少趋势;  $UF$  与  $UB$  曲线交叉点发生在 1998 年,且交点超过信度线,说明 1998 年是其径流突变的开始年份,径流量出现显著下降。

## 4 径流变化影响率计算

### 4.1 径流变化影响率计算方法

双累积曲线法是进行时间序列分析的一种常用

方法。其基本思想是两个变量按同一时间长度逐步累加,一个变量作为横坐标,另一个变量作为纵坐标,其拐点可作为分析变量阶段性变化的依据<sup>[15]</sup>。当只有降水的变化而无其它因素影响时,双累积曲线应为一曲线;当受到人类活动等其它因素影响时,曲线将会发生偏移,可根据双累积曲线发生偏移的年代确定下垫面受人类活动影响的剧烈程度。因此,降水—径流双累积曲线可以揭示人类活动对径流影响的阶段性变化。

### 4.2 计算结果分析

图 3 是利用 1960—2010 年的同期降水、径流量资料建立的王道恒塔站和温家川站降水—径流双累积曲线,曲线分别在 1968 和 1971 年发生偏移,因此,可以确定 1960—1967 年和 1960—1970 年分别为王道恒塔站和温家川站的基准期,并以此将两个水文站径流序列划分为几个阶段(表 3)。对基准期累积降水量和累积径流进行回归分析,建立基准期内累计年降水量  $\sum P$  和累积年径流量  $\sum R$  序列的相关方程,其方程为:

$$\text{王道恒塔站: } \sum R = 0.0059 \sum P + 1.3403 (r^2 = 0.9783)$$

$$\text{温家川站: } \sum R = 0.0170 + \sum P + 0.3152 (r^2 = 0.9979)$$

依据基准期内两个水文站年降水和年径流资料,建立基准期内的降水序列和径流序列的相关方程,其方程为:

$$\text{王道恒塔站: } R = 0.0050P + 0.4734$$

$$\text{温家川站: } R = 0.0186P - 0.6858$$

根据年降水量与年径流量的相关方程可得 2 站不同时段理论平均径流量,将其作为天然径流量的近似值。基准期实测值与各时段计算值的差值即为此时段降水变化对径流变化的影响值;基准期实测值与各时段实测值的差值减去降水变化的影响值即为人类活动对径流变化的影响值;影响值与总减少值的百分比即为影响率。由表 3 可知,1968—2010 年王道恒塔站降水对径流量的影响率为 -3.03%,是因为该时期的降水量相对于基准期有所增加,导致降水影

响差值为负;但是,该时期径流量总减少量占其实测径流量的 55.8%,主要是人类活动导致流域径流量减少。对比不同阶段,各阶段人类活动和降水对径流的影响程度亦不同。1968—1978 年和 1985—1996 年 2 个阶段,由于降水量相对于基准期有所增加,导致降水影响差值为负。1997—2010 年,人类活动对径流量减少的影响率达到 80.48%,远远超过降水的影响。对于温家川站,1971—2010 年人类活动对径流量减少的影响率是 81.92%,是降水对径流量减少的影响率的 4 倍多,说明人类活动是导致流域径流量减少的主要原因。对比不同阶段,人类活动对径流量减少的影响率基本处于增加趋势,到 1997—2010 年,人类活动对径流量减少的影响率高达 93.62%。自 20 世纪 60 年代以来,2 个水文站径流量都出现了显著减少的现象,且导致径流量减少的主要原因都是人类活动的影响。

在窟野河流域,改变径流的人类活动方式以矿产资源开采和水土保持措施为主。水土保持措施主要包括梯田建设、造林、种草和修筑淤地坝等。根据赵晓坤等<sup>[7]</sup>调查,20 世纪 70—80 年代,梯田、坝地、造林和种草等水土保持措施的蓄水量分别达到

$1.19 \times 10^7 \text{ m}^3$  和  $2.54 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,80 年代窟野河流域水保措施减水量约为  $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[6]</sup>,水土保持措施发挥了较大的减水作用。20 世纪 90 年代以来,煤炭大规模开采等人类工程活动成为径流量减少的主要因素之一。1991 年窟野河流域原煤产量为  $6.26 \times 10^6 \text{ t}$ ,2011 年窟野河原煤产量为  $1.73 \times 10^8 \text{ t}$ ,为 1991 年的 27.59 倍。煤炭开采破坏了水资源形成与储存环境及排泄途径和方式,水资源的产、汇、补、径、排等发生变化,直接表现为地表径流减少,根据蒋晓辉等<sup>[16]</sup>研究成果,窟野河流域开采吨煤对径流的影响大约为  $5.27 \text{ m}^3$ 。

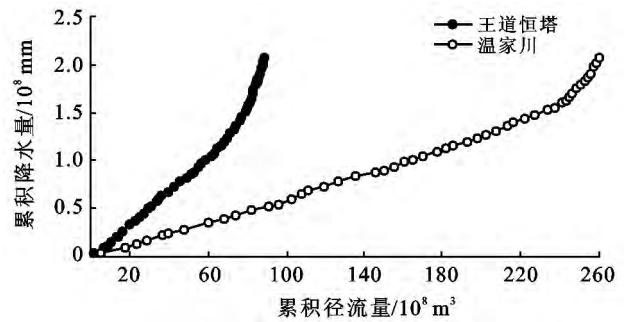


图 3 窟野河流域水文站降水—径流双累积曲线

表 3 降水和人类活动对窟野河径流影响

站名	起止年份	降雨/ mm	径流		总减少/ $10^8 \text{ m}^3$	降水因子		人类活动因子	
			计算值/ $10^8 \text{ m}^3$	实测值/ $10^8 \text{ m}^3$		影响值/ $10^8 \text{ m}^3$	影响率/ %	影响值/ $10^8 \text{ m}^3$	影响率/ %
王道恒塔	1960—1967	405.8		2.485					
	1968—1978	407.8	2.512	2.298	0.187	-0.027	-14.4	0.214	114.4
	1979—1984	372.9	2.338	2.153	0.332	0.147	44.3	0.185	55.7
	1985—1996	442.0	2.683	1.720	0.765	-0.198	-25.9	0.963	125.9
	1997—2010	393.5	2.136	0.697	1.788	0.349	19.5	1.439	80.5
	1968—2010	407.8	2.512	1.595	0.890	-0.027	-3.0	0.917	103.0
温家川	1960—1970	437.8		7.465					
	1971—1978	432.9	7.367	6.696	0.769	0.098	12.7	0.671	87.3
	1979—1987	367.1	6.143	5.518	1.947	1.322	67.9	0.625	32.1
	1988—1996	414.2	7.019	5.402	2.063	0.446	21.6	1.617	78.4
	1997—2010	419.2	7.112	1.930	5.535	0.353	6.4	5.182	93.6
1971—2010	409.1	6.924	4.472	2.993	0.541	18.1	2.452	81.9	

## 5 结论

(1) 近 50 a 来,窟野河径流年际变化表现出递减的趋势,尤其自 20 世纪末以来,呈现出显著减少的趋势。王道恒塔站径流突变年份为 1995 年,温家川站径流突变年份为 1998 年。

(2) 在现有气候变化和人类活动保持不变的情况下,窟野河径流量的递减趋势在未来一段时间内将会持续。

(3) 导致窟野河径流量减少的主要原因是人类活动,其次是降水。不同历史阶段,人类活动的剧烈程度不同,对径流量减少的影响亦不同。影响最剧烈的阶段为 1997—2010 年,该阶段人类活动对径流量减少的影响率在 2 个水文站分别高达 80.48%和 93.62%。

(4) 气候变化是河川径流变化的重要原因之一。由于资料所限,本研究在气候要素中,仅考虑了降水,今后还应进一步研究蒸发、气温等对径流的影响。

(下转第 117 页)

六枝特区以不显著负相关和正相关为主;植被 NDVI 与年降水量呈显著正相关的区域主要分布在六盘水市北部和中部,海拔一般在 1 400 m 以上;呈负相关区域主要分布在六盘水市东部和南部,这些区域地形起伏相对较小。

(5) 本研究针对典型喀斯特地区,在分析区域气候与植被覆盖变化的基础上,从像元尺度研究了植被 NDVI 与气候要素之间的相关关系,得出了典型喀斯特区域植被对气候变化的响应模式。今后,需开展具体植被类型在不同季节内对气候变化响应的研究,全面剖析喀斯特区域植被与气候间的关系。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孙红雨,王常耀,牛铮,等. 中国植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于 NOAA 时间序列数据[J]. 遥感学报, 1998,2(3):204-210.
- [2] 喻梅,高琼,高素华. 全球变化条件下植物个体的生理生态学模型[J]. 植物学报,1997,39(9): 811-820.
- [3] 王宗明,国志兴,宋开山,等. 中国东北地区植被 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2009,28(6):1041-1048.
- [4] 信忠保,许炯心,郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学(D 辑):地球科学, 2007,37(11):1504-1514.
- [5] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001,21(4):294-302.
- [6] 毛德华,王宗明,宋开山,等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学,2011,31(2):283-292.
- [7] 蒙古军,王钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J]. 地理研究,2007,26(5): 857-866.
- [8] 李旭谱,张福平,胡猛. 基于 SPOTNDVI 的植被覆盖时空演变规律分析:以西北五省为例[J]. 干旱地区农业研究,2012,3(5):180-184.
- [9] 贵州省农业地貌区划[M]. 贵州 贵阳:贵州人民出版社,1989.
- [10] Maisongrande P, Duchemin B D, Dedieu G. VEGETATION/SPOT: An operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(1):9-14.
- [11] 罗玲,王宗明,宋开山,等. 1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究[J]. 西北植物学报,2009,29(4):800-808.
- [12] 毛德华,王宗明,罗玲. 基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析[J]. 遥感技术与应用,2012,27(1):77-84.
- [13] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2002.
- [14] 神祥金,吴正方,杜海波. 东北地区植被 NDVI 变化及对气象因子的响应[J]. 东北师大学报:自然科学版, 2013,45(1):123-130.

(上接第 113 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [2] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区 1956—2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展,2007,18(1):29-33.
- [3] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等. 窟野河季节性断流及其成因分析[J]. 资源科学,2008,30(3):475-480.
- [4] 马文进,慕明清,陈鸿,等. 窟野河产沙特性分析[J]. 人民黄河,2008,30(1):22-27.
- [5] 赵晓坤,王随继. 窟野河洪水特性及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(4):92-96.
- [6] 王璨,周秀平,王文圣. 窟野河洪水序列变异点综合诊断[J]. 水电能源科学,2012,30(7):50-53.
- [7] 赵晓坤,王随继,范小黎. 1954—1993 年间窟野河径流量变化趋势及其影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):32-36.
- [8] 裴宇航,孙爽,王春丽,黑龙江省近 50 年日照时数变化特征分析[J]. 黑龙江农业科学,2012(8):41-43.
- [9] 张群,径流资料系列分析在实践中的运用[J]. 水利科技与经济,2010,16(9):1000-1001.
- [10] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [12] 徐宗学,李占玲,史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学,2007,29(5):121-128.
- [13] 赵晶,王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理,2002,25(1):90-95.
- [14] 张晓伟,沈冰,黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报,2007,22(6):975-979.
- [15] Yue S, Pilon P, Phinney B. Canadian streamflow trend detection: Impacts of serial and cross correlation[J]. Hydrological Science Journal, 2003,48(1):51-63.
- [16] 蒋晓辉,谷晓伟,何宏谋. 窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究[J]. 自然资源学报,2010,25(2):300-307.