

# 近50年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响

徐浩杰, 杨太保, 张晓晓

(兰州大学 资源环境学院 冰川与生态地理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 以1961—2010年疏勒河上游山区气温、降水和径流数据为基础, 采用Mann—Kendall和R/S分析法, 在年、季节尺度上研究了气温、降水和径流的变化特征, 并采用多元线性回归分析法揭示了径流变化的主控因素。研究结果表明, 近50a来研究区年均气温上升趋势显著且持续性极强。20世纪60—70年代气温偏低, 1986年以后快速上升, 并在1990年左右发生暖突变。降水量在研究时段内增加趋势明显且持续性较强。20世纪60—70年代降水偏少, 80年代开始偏多, 90年代偏少, 1998年左右发生由少到多的突变。研究区气候在20世纪80年代中期由暖干向暖湿转型, 受气候变化影响上游地区径流量显著增加, 其年际和季节变化特征与降水变化相似。冬季和秋季径流变化主要受地下水影响, 而春季和夏季径流变化主要受降水和冰雪融水的控制。

**关键词:** 祁连山; 疏勒河; 气候变化; 径流变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0039-07

中图分类号: P467, S157

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.022

## Climate Change in Upstream Area of Shule River and Its Effects on Runoff-yield in Last 50 Years

XU Hao-jie, YANG Tai-bao, ZHANG Xiao-xiao

(Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The seasonal and annual variation characteristics of air temperature and precipitation as well as runoff-yield in the upstream area of Shule River were analyzed based on meteorological and hydrological data during 1961—2010 by using Mann—Kendall test and R/S analysis. Linear multi-regression of monthly runoff model was used to evaluate effects of temperature and precipitation in runoff-yield. The results showed that the annual mean temperature had risen very significantly with very strong persistency since 1960s. It is low from 1960s to 1970s and increased fast after 1986. The climatic warming had accelerated after temperature mutation in 1990. The annual precipitation presented a very significantly increasing tendency with strong persistency in the studied period and the fluctuation of annual precipitation was quite obvious. It experienced a changing trend that was lower(the 1960s and 1970s)—higher(the 1980s)—lower(the 1990s)—higher(after 2000). The strong signals of climatic shift to warm humid pattern appeared since mid-1980s and runoff-yield increased very significantly due to climatic mutation. The annual and seasonal variation characteristics of runoff-yield were consistent with precipitation. The runoff-yield was mainly affected by underground water in winter and autumn, and was controlled by precipitation and ice-snow melt water in spring and summer.

**Keywords:** Qilian Mountains; Shule River; climate change; runoff variation

中国西北干旱区地处欧亚大陆腹地, 在过去半个多世纪里气温上升速率达 $(0.36 \pm 0.03) ^\circ\text{C}/10\text{a}$ , 明显高于中国和全球平均值, 是气候变化极度敏感区<sup>[1-3]</sup>。西北干旱区以山地和绿洲荒漠为主体, 水资源是制约该区社会经济发展、影响生态安全的关键要素<sup>[4]</sup>, 而干旱区水资源主要来源于山区降水和冰雪融水, 其变化

对山前中游绿洲带的社会经济发展与下游荒漠带的生态环境演变有至关重要的作用<sup>[5]</sup>。随着气候变化和人类活动影响的不断加剧, 该区干旱化和水资源问题将日益凸显, 因此研究干旱区山地气候变化及其对径流变化的影响对指导该区经济社会和生态环境的可持续发展具有重要意义。疏勒河发源于祁连山境内的疏勒

收稿日期: 2013-08-28

修回日期: 2013-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河上游晚更新世河流阶地和冰川演化对千年尺度气候变化的响应”(41271024); 酒泉市科技计划项目

作者简介: 徐浩杰(1988—), 男(汉族), 江苏省无锡市人, 硕士研究生, 研究方向为全球植被生态学和水文水资源学。E-mail: xuhj2011@lzu.edu.cn。

通信作者: 杨太保(1962—), 男(汉族), 山西省平陆县人, 教授, 博士生导师, 主要从事地理环境变化研究。E-mail: yangtb@lzu.edu.cn。

南山和陶勒南山之间的沙果林那穆吉木岭,是河西走廊三大内陆河之一,其上游山区位于西北干旱区中部,祁连山区西部,是季风气候区与干旱气候区的过渡地带。疏勒河地表水资源变化直接与山区气候相联系,其数量和质量制约着玉门、瓜州乃至敦煌等中下游地区社会经济的发展规模和水平,进而影响着与地表水、地下水密切相关的生态环境条件的变化<sup>[6]</sup>。基于此,本文研究了疏勒河上游山区气候要素平均值的年际和季节变化趋势、波动性、突变性和持续性。在径流变化成因分析中,考虑了地下水对径流变化的影响以及径流对气候要素变化的响应,对理解气候变暖背景下出山径流变化规律具有重要意义,研究结果可服务于区域水资源管理和经济社会发展决策。

## 1 数据与方法

研究区为疏勒河干流出山口昌马堡水文站( $96^{\circ}51' E, 39^{\circ}49' N$ , 海拔 2 080 m, 1946 年设站观测)以上流域,流域面积  $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。选取 1961—2010 年昌马堡水文站月流量数据用于径流变化特征分析,该数据由甘肃省水文与水资源局提供。为了保证气象资料的同步性和一致性,选取 1961—2010 年研究区及周边 25 个标准气象站(未迁站)逐月平均气温和降水量数据,该数据来自中国气象数据共享服务网(<http://ede.ema.gov.cn>)。为了模拟研究区气温和降水量在整个空间上的分布,引入经度、纬度、海拔 3 个影响气温和降水量时空分布的主要变量,采用 AMMR(多元线性回归+残差分析)法对气象要素进行空间插值<sup>[7]</sup>,并利用 ArcGIS 的空间分析模块,统计研究区气温和降水量的平均状况。按 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至翌年 2 月为冬季,1—12 月为全年对气象要素和径流进行时间划分,研究其年际和季节变化特征。Mann—Kendall(M—K)法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少

数异常值的干扰,更适用于类型变量与顺序变量,计算比较简便,可量化序列变化趋势的显著性并明确突变开始时间,被广泛运用于气象和水文要素等的时间序列分析<sup>[8]</sup>。本研究采用 M—K 法研究气温、降水和径流时间序列的年际变化特征及突变性。为了明确时间序列突变开始时间,同时采用 5 a 滑动  $t$  检验法<sup>[9]</sup>对 M—K 突变检测中存在多个明显交叉点的时间序列进行显著性突变检测。 $R/S$  分析法(rescaled range analysis)是一种处理时间序列分形结构的分析方法,常用于气象和水文要素时间序列的变异点和持续性分析<sup>[10]</sup>。采用  $R/S$  分析法研究气温、降水和径流的持续性特征,并预测其未来可能的变化趋势。多元线性回归研究因变量与多个自变量之间的线性关系。采用此方法研究气温、降水与基流对径流变化的影响。由于径流、气温、降水数据量纲不同,使其不具可比性,影响径流变化的权重分析,因此在回归分析前采用标准差标准化消除各变量的量纲。变量经标准化处理后不影响彼此之间的相关性,且自变量线性回归系数的大小在一定程度上反映其对因变量贡献的强弱。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温变化特征

1961—2010 年疏勒河上游山区年均温整体呈波动上升趋势(图 1),增温速率为  $0.455^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ ,气温变化趋势的 M—K 值为  $6.11 > 2.57$ ,表明近 50 a 来研究区气温呈极显著上升趋势( $p < 0.01$ )。从气温的年际波动来看,1961—1966 年气温呈不显著上升趋势( $p > 0.05$ ),并在 1966 年达到气温的极大值;1967—1986 年气温波动性较大,但增温趋势较弱;1986 年以后气温呈显著上升趋势( $p < 0.05$ ),并在 1990 年左右发生暖突变。采用  $R/S$  分析法研究气温的持续性特征,结果表明气温的 Hurst 指数为  $0.93 > 0.85$ ,气温变化趋势的持续性极强,未来一段时间内气温将继续保持极显著上升趋势。

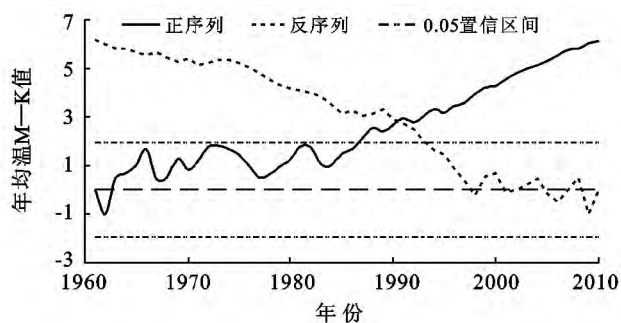
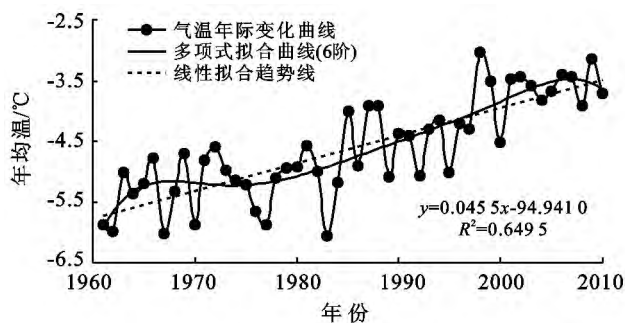


图 1 疏勒河上游山区年均温的年际变化特征

由图2可见,近50 a来研究区四季气温均呈波动上升趋势,春季、夏季、秋季和冬季的增温速率分别为0.228,0.372,0.511和0.715 °C/10 a。四季气温变化趋势的M—K值分别为2.40,4.36,5.23和4.86,表明除春季平均气温呈显著上升趋势外,夏季、秋季和冬季平均气温均呈极显著上升趋势,秋季升温趋势最为显著,其次为冬季和夏季;冬季升温速率最快,其次为秋季、夏季和春季。从四季气温的年际波动来看,春季平均气温呈“升高—降低—升高”变化,1961—1975年研究区气温呈不显著上升趋势;1976—1995年研究区气温呈不显著下降趋势;1995年以后气温再次呈上升趋势,2007年以后增温趋势

显著。夏季平均气温整体呈先降低后升高变化,1961—1988年研究区气温呈不显著降低趋势;1988年以后气温呈上升趋势,1998年以后增温趋势显著。秋季和冬季气温整体呈持续上升趋势,并分别在1985和1988年以后达到显著性水平。从四季平均气温的突变特征来看,春季、夏季、秋季和冬季平均气温分别于1996,1995,1985和1988年发生暖突变,秋季和冬季暖突变时间相比春季和夏季提前约10 a。采用R/S分析法预测未来四季气温的变化情况,结果表明四季平均气温的Hurst指数分别为0.58,0.83,0.91和0.76,均大于0.5,气温变化具有持续性特征,未来一段时间内研究区四季平均气温的上升趋势仍将持续。

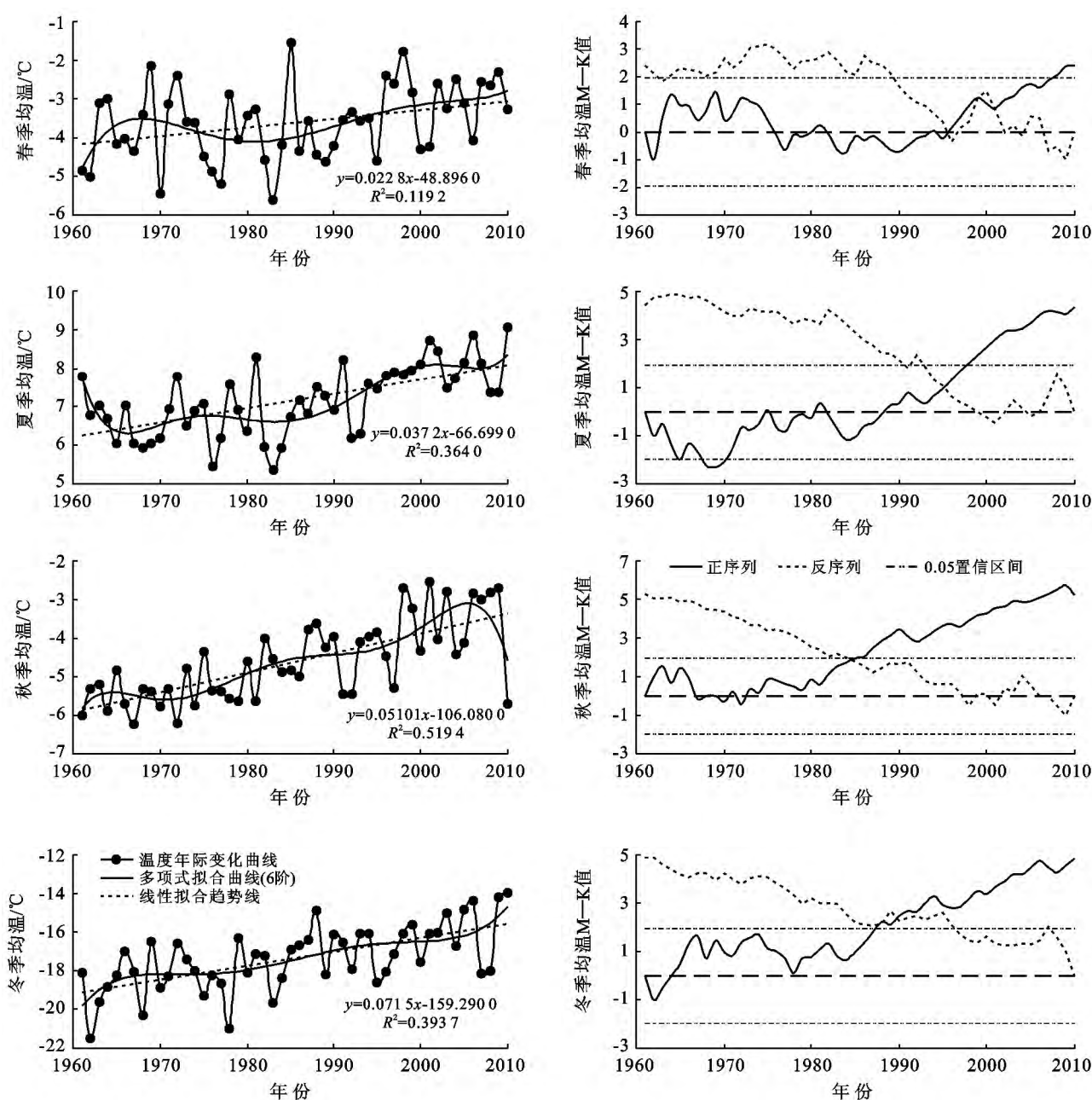


图2 疏勒河上游山区气温的季节变化特征

## 2.2 降水量变化特征

1961—2010 年疏勒河上游山区降水量整体呈波动上升趋势(图 3),增长率为  $16.95 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,降水量变化趋势的  $M-K$  值为  $3.35 > 2.57$ ,表明近 50 a 来研究区降水量呈极显著增加趋势。从降水量的年际波动来看,其大致经历了 5 个变化阶段:增加(1961—1965 年)—稳定(1966—1973 年)—增加(1974—1989 年)—减少(1990—1997 年)—增加(1997—2010 年),2002 年以后降水量增加趋势显著。在研究时段内,降水量在 1998 年发生由少到多的突变。采用  $R/S$  分析法研究降水量的持续性特征,结果表明降水量的 Hurst 指数

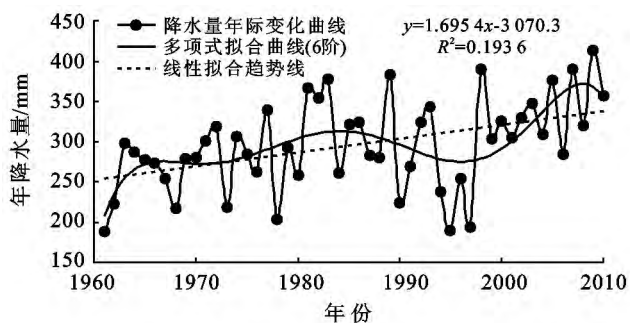


图 3 疏勒河上游山区年降水量的年际变化特征

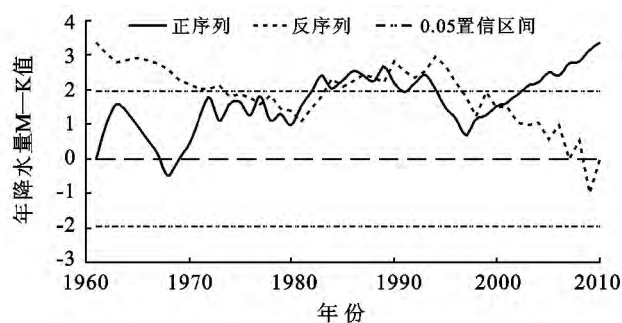
从四季降水量的年际波动来看,春季降水量呈“增加—减少—增加—减少”变化,两个增加阶段分别为 1961—1965 年和 1978—1987 年,两个减少阶段分别为 1966—1977 年和 1988—2010 年。夏季、秋季和冬季降水量年际波动形式基本一致,除在 20 世纪 90 年代出现减少趋势外,在其余时段均呈增加趋势。从四季降水量的突变特征来看,除夏季和秋季降水量分别于 1994 和 2000 年发生由少到多的突变外,春季和冬季降水量不存在显著突变特征。采用  $R/S$  分析法预测未来四季降水量的变化情况,结果表明四季降水量的 Hurst 指数分别为 0.55, 0.69, 0.66 和 0.62,均大于 0.5,降水量变化具有持续性特征,未来一段时间内研究区四季降水量的变化趋势仍将保持。

## 2.3 径流量变化特征

1961—2010 年疏勒河上游山区年径流量呈波动上升趋势(图 5),增长率为  $1.038 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ ,径流变化趋势的  $M-K$  值为  $3.99 > 2.57$ ,表明近 50 a 来研究区径流量呈极显著增加趋势。从径流的年际波动来看,1961—2001 年,径流呈不显著增加趋势,期间波动性较大,在 1972, 1981, 1989 和 1999 年出现明显的极大值,在 1968, 1976 和 1990 年出现明显的极小值;2001 年以后,径流呈显著增加趋势,并在 2000 年左右发生由少到多的突变。采用  $R/S$  分析法研究径流的持续性特征,结果表明径流的 Hurst 指数为

为  $0.66 > 0.65$ ,其变化趋势的持续性较强,未来一段时间内降水量将继续呈极显著增加趋势。

从疏勒河上游山区四季降水量的年际变化趋势来看(图 4),近 50 a 来除春季降水量呈减少趋势外,夏季、秋季和冬季降水量均呈增加趋势,四季降水量变化率分别为  $-1.04, +13.41, +4.01$  和  $+0.573 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。四季降水量变化趋势的  $M-K$  值分别为  $-0.46, 3.34, 2.38$  和  $2.43$ ,表明除春季降水量呈不显著减少趋势外,夏季、秋季和冬季降水量均呈显著上升趋势,夏季降水量增加趋势最为显著,其次为冬季和秋季;夏季降水量增加速率最快,其次为秋季和冬季。



$0.78 > 0.65$ ,径流变化趋势的持续性较强,若研究区气候变化和人类活动依然保持现有趋势或变化更为剧烈时,未来一段时间内径流将与现在保持相同的趋势,即极显著增加趋势。从疏勒河上游山区四季径流量的年际变化趋势来看(图 6),近 50 a 来研究区四季径流量均呈波动增加趋势,春季、夏季、秋季和冬季径流增长率分别为  $1.23 \times 10^7, 5.5 \times 10^7, 2.47 \times 10^7$  和  $1.18 \times 10^7 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 。

春、夏、秋、冬四季径流量变化趋势的  $M-K$  值分别为 3.71, 3.17, 3.82 和 5.7,表明四季径流量均呈极显著增加趋势,冬季径流量增加趋势最为显著,其次为秋季、春季和夏季;夏季径流量增加速率最快,其次为秋季、春季和冬季。从四季径流量的年际波动来看,春季、夏季和秋季径流量波动形式基本一致,20 世纪 60—90 年代中期,径流量呈微弱增加趋势,1995 年以后,径流量增加趋势逐渐趋于显著,2000 年以后径流量增加趋势十分明显。冬季径流量在 1970 年以后均呈显著增加趋势,但在 20 世纪 80 年代至 90 年代末径流量增加不明显,2000 年以后,径流量呈极显著增加趋势。

从四季径流量的突变特征来看,春季、夏季、秋季和冬季径流量分别于 2003, 1999, 1999 和 1997 年发生由少到多的突变。采用  $R/S$  分析法预测未来四季径流量的变化情况,结果表明四季径流量的 Hurst 指

数分别为0.82,0.66,0.75和0.86,均大于0.5,径流变化具有持续性特征,若研究区气候变化和人类活动

依然保持现有趋势或变化更为剧烈时,未来一段时间内四季径流量变化趋势仍将持续。

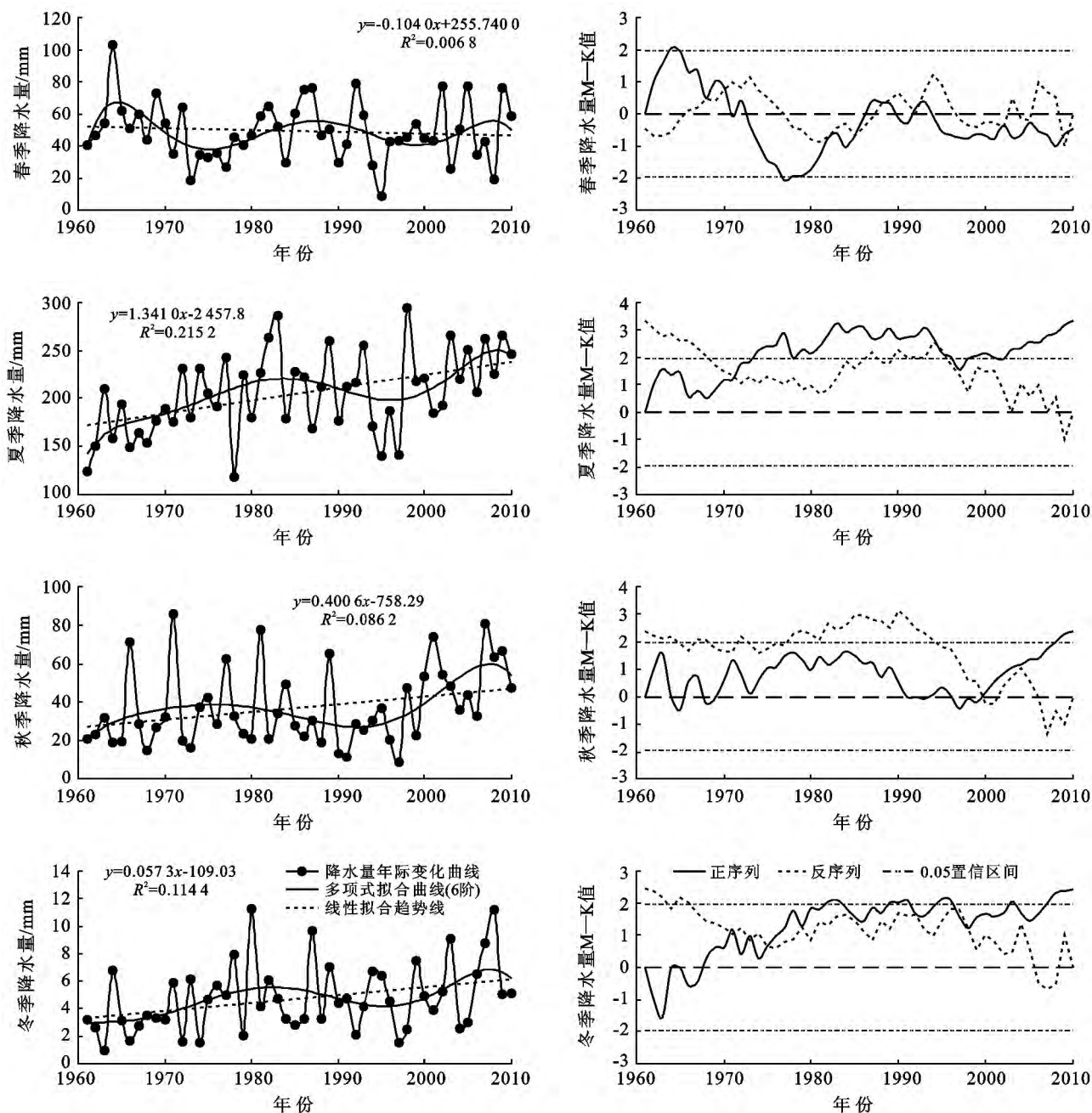


图4 疏勒河上游山区降水量的季节变化特征

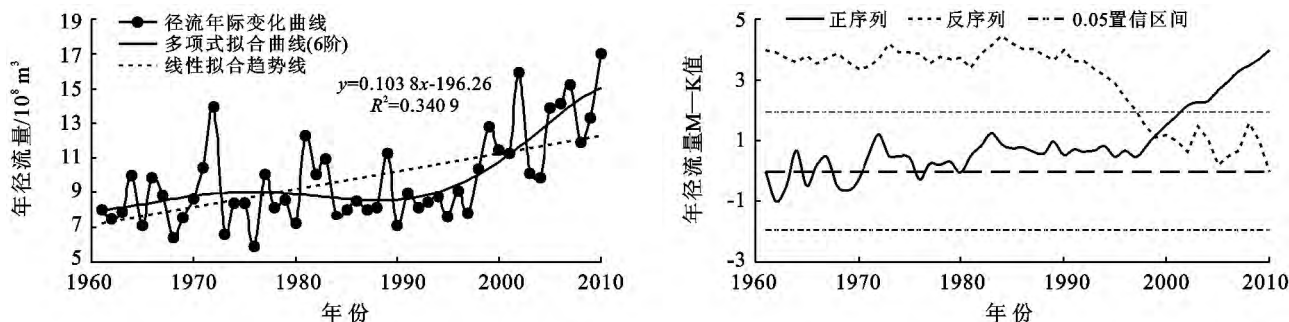


图5 疏勒河上游山区年径流量的年际变化特征

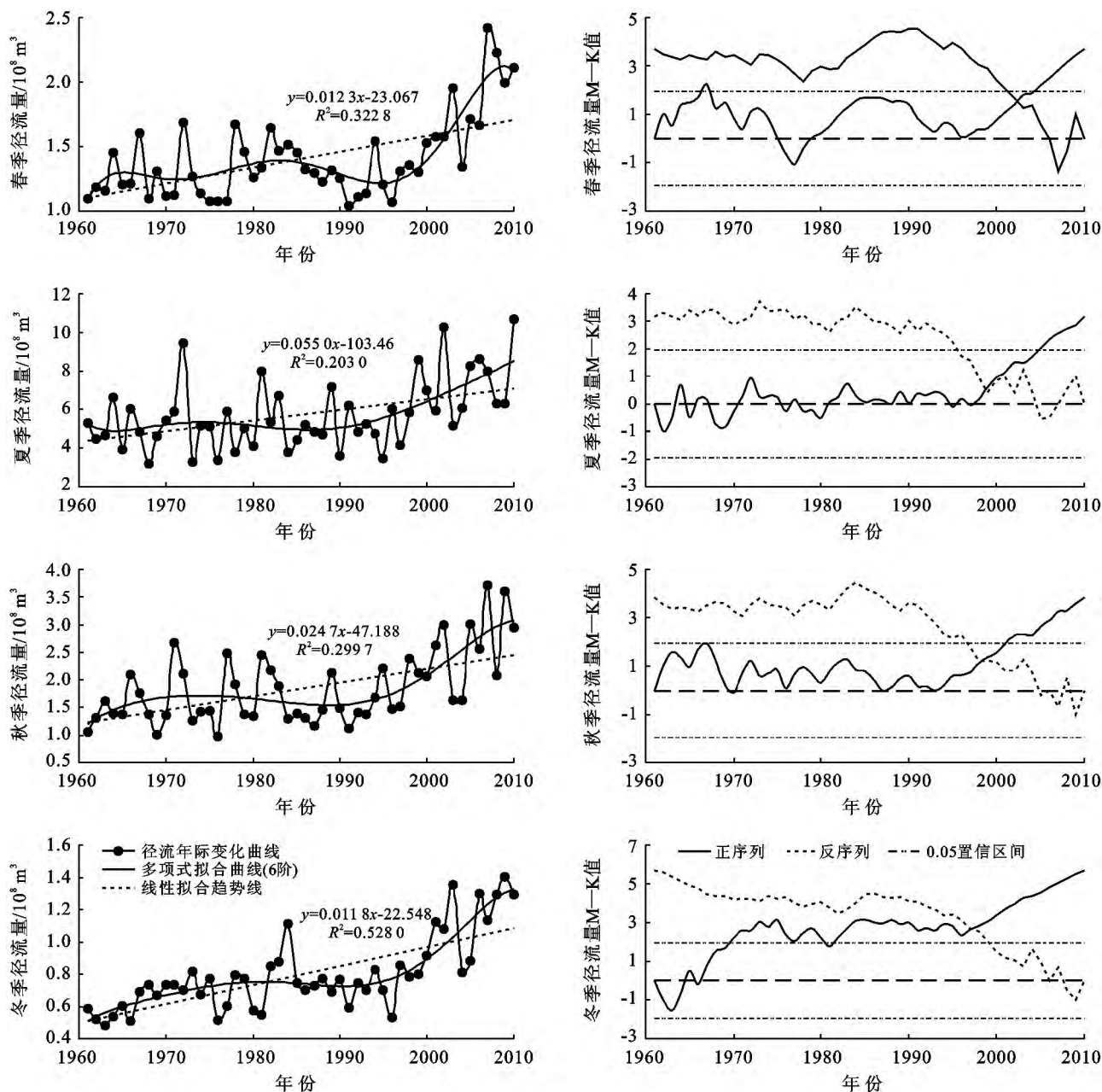


图 6 疏勒河上游山区径流量的季节变化特征

#### 2.4 径流变化影响因素

疏勒河上游山区各月径流影响因子显著影响径流变化,回归方程均通过  $p < 0.001$  的显著性检验(表 1)。从各月影响因子的偏回归系数来看,12 月至翌年 3 月基流对径流变化的影响程度普遍高于 70%,表明冬季径流主要依靠夏季贮存于土壤和近地表中的地下水补给<sup>[11]</sup>。4 月份径流变化主要受控于基流与当月气温,两者的影响程度分别为 62.4%和 43.0%,基流对径流的影响程度较冬季和初春开始下降,表明随着气温回升,季节性积雪和冻土开始融化,积雪融水和土壤水开始调节径流变化。5—8 月径流变化同时受基流、当月气温和降水量、前月气温影响,但当月气温和降水量已代替基流成为是影响径流变化的主

要因素。随着气温和降水量逐渐增加,春末和夏季径流的补给主要来源为降水量和冰雪融水量,在气温最高的 7—8 月,冰雪融水量对径流的影响程度甚至超过了降水量。值得注意的是,5—7 月径流与气温的关系呈现出有趣的现象,表现为当月径流与前一月气温呈反相关,而与当月气温为正相关。当气温较高时,降水固、液态比例将会减小,也就是当月能在地表存留的冰雪减少,其对径流的影响就是增加当月径流,减弱下月径流。在 9 月份经过雨季降水量的补给,冻土活动层、土壤水和地下水得到充分补给,降水下渗减少而直接补给径流,此外气温下降后冰雪融水补给径流的比例也迅速减少,因此表现为径流变化主

要受降水量影响。10—11 月降水量和气温回归到低值,基流再次成为影响径流变化的主要因素。

疏勒河上游山区在秋季和冬季气温低于 0℃,降水量多以雪的形式降落,此时冰雪融水和降水均无法补给径流,因此秋季和冬季径流补给主要依靠地下水。春季气温快速上升,中低山区气温普遍达到 0℃以上,秋季和冬季积累的季节性积雪由于气温升高开

始融化并转化为融雪径流。加上春季降水量多以液态水的形式降落,其与积雪融水一起影响春季径流变化。夏季气温较春季进一步升高,高山区气温也普遍高于 0℃,冰川、积雪和季节性冻土大量融化并转化为地表径流,加上夏季降水量丰沛,产流丰富,因此夏季径流主要受降水和冰雪融水影响。

表 1 疏勒河上游山区各月径流量影响因子回归系数

月份	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$R_2$	$p$
1	0.701***	0.232*	0.034	-0.069	0.085	0.693	***
2	0.908***	0.119	0.008	-0.128	0.117	0.833	***
3	0.940***	0.031	0.095	-0.077	-0.029	0.843	***
4	0.624***	0.430***	-0.011	0.033	-0.118	0.659	***
5	0.580***	0.371**	0.368**	-0.518***	-0.032	0.516	***
6	0.352**	0.473***	0.505***	-0.289*	0.229*	0.592	***
7	0.366**	0.668***	0.469***	-0.251*	-0.050	0.755	***
8	0.469**	0.478***	0.285**	-0.079	0.016	0.715	***
9	0.102	0.340**	0.495***	0.122	0.144	0.684	***
10	0.500**	0.106	0.037	0.120	0.180	0.581	***
11	0.898***	0.161**	0.048	0.004	-0.017	0.883	***
12	0.944***	0.158*	0.024	-0.127*	-0.066	0.936	***

注: $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  分别表示基流、气温、降水、前月气温、前月降水; \*表示在  $0.01 < p \leq 0.05$  水平相关关系显著, \*\*表示在  $0.001 < p \leq 0.01$  水平相关关系显著, \*\*\*表示在  $p \leq 0.001$  水平相关关系显著。

3 结 论

(1) 在全球变暖大背景下,近 50 a 来疏勒河上游山区气温变化与全球和中国西北干旱区保持良好的同步性,但升温速率极快,且主要以冬季和秋季增温为主,独特的下垫面条件(低植被覆盖)可能造成了该区地表温度对全球变暖的强敏感性。气温年际波动呈明显的阶段性,20 世纪 60—70 年代气温偏低,1986 年以后气温显著上升,并在 1990 年左右发生暖突变,突变后变暖速率进一步加快。

(2) 疏勒河上游山区降水量变化可能受西风、极地环流、青藏高原加热场以及局地气候等多个气候系统影响<sup>[5-6]</sup>。近 50 a 来研究区降水量整体呈极显著增加趋势,增加幅度接近同期西北干旱区降水量变化的 1.8 倍<sup>[3]</sup>且主要以夏季和秋季降水量增加为主。降水量的年际波动同样存在阶段性,20 世纪 60—70 年代,降水量相对偏少,从 80 年代开始降水量显著增多,但 90 年代前中期降水量相对偏少,2000 年以后降水量再次显著增加。全球变暖可能引起赤道中、东太平洋海温升高,海温升高导致南方涛动减弱,并使得中低纬度 Walker 环流与 Hadley 环流减弱,大气环流减弱引起青藏高原热低压减弱,从而使依靠夏季风输送水

汽的祁连山东部地区降水减少,而使受行星西风带影响的山区西段降水增加<sup>[12]</sup>,此外中纬度西风带和北冰洋水汽输送的增强也可能同时引起了该区降水量的显著增加<sup>[13]</sup>。

(3) 疏勒河上游山区气候在 20 世纪 80 年代中期由暖干向暖湿转型,气候转型时间与西北干旱区西部基本同步<sup>[14]</sup>。受暖湿化气候影响,研究区出山径流整体呈显著增加趋势且以夏季和秋季径流增加为主。出山径流量在 20 世纪 60—90 年代中期变化平稳,2000 年左右径流发生由少到多突变,突变后径流增加趋势显著。冰川物质平衡的年际变化佐证了径流变化结果<sup>[15]</sup>。疏勒河属冰雪融水和降水混合补给型河流,地下水、降水和冰雪融水是影响径流变化的主要因素,地下水的影响主要体现在冬季和秋季,降水的影响主要体现在 5—9 月,而冰雪融水(受气温控制)对径流变化的影响主要体现在 4—8 月。

[参 考 文 献]

[1] 张雪芹,孙杨,毛炜峰,等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应[J]. 干旱区研究,2010,27(4):592-599.  
[2] 赵传成,王雁,丁永建,等. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象,2011,30(2):385-390.

(下转第 52 页)



- [18] 王志刚,赵永存,廖启林,等.近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J].生态学报,2008,28(2):720-727.
- [19] 郭治兴,王静,柴敏,等.近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J].应用生态学报,2011,22(2):425-430.
- [20] 赵庚星,李秀娟,李涛,等.耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析[J].农业工程学报,2005,21(10):55-58.
- [21] 郭荣发,杨杰文.成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响[J].生态学报,2004,24(5):984-990.
- [22] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.保护地不同灌溉方法表层土壤 pH 小尺度的空间变异[J].土壤,2008,40(5):828-832.
- [23] 鲁艳红,杨曾平,郑圣先,等.长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤水稻土化学和生物化学性质的影响[J].应用生态学报,2004,21(4):921-929.
- [24] 卫婷,韩丽娜,韩清芳,等.有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):611-620.
- [25] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):159-165.
- [26] 李菡,孙爱清,郭恒俊.农田不同种植模式与土壤质量的关系[J].应用生态学报,2010,21(2):365-372.
- [27] 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J].中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.
- [28] 刘广明,杨劲松,姚荣江.影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J].土壤学报,2005,42(2):247-252.
- [29] 陈银萍,罗永清,陶玲,等.兰州市农村生活用水的水化学特征分析[J].中国生态农业学报,2011,19(1):63-68.
- [30] 贾宇,徐炳成,李凤民,等.半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J].生态学报,2007,27(1):42-47.
- [31] 陆安祥,赵云龙,王纪华,等.不同土地利用类型下氮—磷在土壤剖面中的分布特征[J].生态学报,2007,27(9):3923-3929.
- [32] 陈银萍,罗永清,陶玲,等.兰州市农村饮用水中硝态氮分布特征及评价[J].农业环境科学学报,2011,30(1):183-189.
- [33] 章爱群,贺立源,赵会娥,等.有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J].生态学报,2009,29(8):4061-4069.
- [34] 吴全,徐泽.四川茶园土壤速效钾动态变化及施钾效果[J].土壤肥料,1996(2):45-46.
- [35] 都大俊,王崇乐,张可安,等.安康耕地土壤速效钾现状与钾肥效应[J].水土保持研究,2001,8(2):153-156.
- [36] 葛玮健,常艳丽,刘俊梅,等.塬土区长期施肥对小麦—玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):629-636.

(上接第 45 页)

- [3] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学报,2013,32(5):1283-1291.
- [4] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [5] 蓝永超,胡兴林,肖生春,等.近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J].高原气象,2012,31(6):1636-1644.
- [6] 钟海玲,李栋梁.河西内陆河流量对高原加热场强度的响应[J].水科学进展,2008,19(2):179-183.
- [7] 徐浩杰,杨太保.1981—2010 年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应[J].地理科学进展,2013,32(6):868-879.
- [8] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [9] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-65.
- [10] Hurst H E. Long term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951,116(3):770-799.
- [11] 丁永建,叶柏生,刘时银.祁连山区流域径流影响因子分析[J].地理学报,1999,54(5):431-437.
- [12] 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[J].水科学进展,2002,13(2):141-145.
- [13] 魏娜,巩远发,孙娴,等.西北地区近 50 a 降水变化及水汽输送特征[J].中国沙漠,2010,30(6):1450-1457.
- [14] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
- [15] 王宁练,贺建桥,蒲健辰,等.近 50 年来祁连山七一冰川平衡性高度变化研究[J].科学通报,2010,55(32):3107-3115.