试验研究

黑河流域上游水沙变化特征及成因分析

王 昱[1,2]，连运涛[1]，范严伟[1]，卢世国[1]，时文强[1]，张海涛[1]

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730050；
2. 中国科学院 内陆河流域生态水文重点实验室，甘肃 兰州 730000)

摘 要：[目的] 研究黑河流域上游干流的水沙时空变化特征及其成因，为流域生态保护和水资源开发利用提供科学依据。[方法] 选取黑河上游干流主要水文站近 60 a 的实测径流、输沙及降雨资料，通过采用 Mann-Kendall 秩相关检验法、累积距平法和相关分析法，研究水沙变化特征及驱动因子。[结果] 黑河上游干流径流量总体上从 20 世纪 80 年代以后呈增加趋势；输沙量从 20 世纪 70 年代开始呈不显著增加趋势，但莺落峡水文站输沙量从 2001 年开始呈显著下降趋势。[结论] 降水增加是影响黑河上游径流量增多的重要原因；水土流失导致了札马什克站和祁连站输沙量的增加，而水库拦沙是莺落峡水文站输沙量显著减少的主要原因。

关键词：黑河流域；水沙变化；趋势检验；成因分析

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)02-0001-07 **中图分类号**：TV141.3

文献参数：王昱，连运涛，范严伟，等. 黑河流域上游水沙变化特征及成因分析[J]. 水土保持通报，2018，38(2)：1-7. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.001. Wang Yu, Lian Yuntao, Fan Yanwei, et al. Variations of runoff and sediment load and its causes in upper reaches of Heihe River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 1-7.

Variations of Runoff and Sediment Load and its Causes in Upper Reaches of Heihe River Basin

WANG Yu[1,2], LIAN Yuntao[1], FAN Yanwei[1], LU Shiguo[1], SHI Wenqiang[1], ZHANG Haitao[1]

(1. *School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*;
2. *Key Laboratory of Ecohydrology of InlandRiver Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to analyze the characteristics and causes of the spatial-temporal changes of the annual runoff and annual sediment at the main hydrologic stations on the stem stream of the Heihe River, in order to provide decision basis for the ecological environment protection and water resource utilization. [Methods] The runoff, sediment and rainfall data form main hydrologic stations on the stem stream of the Heihe River during 1956 to 2015 were collected. Methods including Mann-Kendall trend test, cumulative anomalies and correlation analysis were applied. [Results] The results indicated that the runoff of the upper reaches of Heihe River had an obvious increasing trend from 1956 to 2015, with high flow during the period from the 1980s to the 2000s. Meanwhile, the sediment load was in a slightly increasing trend from 1970s to 2000s, but the sediment load of the Yingluoxia station had an obvious decreasing trend from 2001. [Conclusion] The increasing precipitation was one of the main contributions to runoff rise. In addition, the soil erosion caused the increase of the annual sediment load of the Zhamashike and Qilian station. Sediment captured by water reservoir was found to be the major cause of the decrease of sediment load in the Yingluoxia station.

Keywords: **Heihe River basin; runoff and sediment variations; trends analysis; causes**

收稿日期：2017-08-30 **修回日期**：2017-09-30

资助项目：国家自然科学基金项目“内陆河流水电梯级开发的生境响应关系研究”(51669011)；甘肃省博士后项目“内陆河流域水电梯级开发生态环境响应”；甘肃省高校科研项目(2016A-011)

第一作者：王昱(1979—)，男(汉族)，甘肃省永昌县人，博士，副教授，主要从事生态水文及水力学方面的研究。E-mail：wangyu-mike@163.com。

河流系统是地球上重要且非常活跃的自然系统，而水沙变化是河流系统对气候变化与人类活动的直接响应[1]。随着全球气候变暖和人类活动影响(如大坝建设、调水、采砂和植被恢复等)的不断加剧，很多河流的径流量、输沙量均发生了显著变化，直接影响流域水资源的合理配置、开发与利用，同时对流域地貌演变、河岸生态系统及全球生物地球化学循环等产生了重要影响[2-3]。河流水沙关系是反映河流径流量和输沙量匹配关系的重要指标，研究河流水沙关系，对于揭示河流泥沙的来源和时空变化规律，分析河流泥沙的沉积特征和流域开发治理等各方面均有重要作用[4]。

黑河流域为中国第二大内陆河流域，是河西走廊绿洲赖以生存和社会经济持续发展的重要水资源基地[5]，其上游山区的径流泥沙变化对中下游地区的社会经济发展和生态环境演变有着举足轻重的影响。近年来，随着全球气候变暖和人类活动的不断加剧，黑河流域的径流量和输沙量都发生了显著变化[6-8]。开展黑河流域上游水沙特征变化研究，不仅有助于深入了解流域的结构与功能，而且对整个流域水资源的合理开发利用、灾害防治和生态环境保护等都具有十分重要的意义。黑河是中国西北地区第2大内陆河，发源于祁连山北麓，流域范围介于96°42′—102°04′E，37°45′—42°40′N，流经青海、甘肃、内蒙古3省区，流域总面积1.43×10^5 km^2。黑河干流全长821 km，出山口莺落峡以上为上游，流域面积1.0×10^4 km^2，多年平均气温不足2 ℃，年降水量350 mm，多年平均水资源量1.60×10^9 m^3，多年平均输沙量2.08×10^6 t，是流域的产流产沙区[6]。黑河上游河流分为东、西两岔，东岔为八宝河，长约75 km，西岔又名野牛沟河，长约175 km，这两股干流在青海省祁连县黄藏寺汇合后形成黑河干流流入甘肃境内，干流向北穿行于高山峡谷中，经约95 km流程至莺落峡进入中游河西走廊，经张掖市甘州区、临泽县、高台县，从正义峡穿过北山，流出河西走廊进入下游，最终汇入东、西居延海。黑河上游干流在2000年之前没有修建水库，河流水沙过程都是天然过程。由于上游地区地势高峻，蕴藏有丰富的水能资源，自2000年至今，黑河黄藏寺—莺落峡河段内已相继开发建成梯级水电站7座。其中龙首水电站于2001年投入运行，库容为1.30×10^7 m^3，距莺落峡水文站测验断面约3 km。截止目前黑河上游干流库容最大的宝瓶水电站建于2011年，库容为2.15×10^8 m^3。

1 数据资料与研究方法

1.1 数据来源

黑河流域上游干流莺落峡出山口控制断面内有3个水文站，分别为札马什克水文站、祁连水文站和莺落峡水文站，其中札马什克水文站控制黑河上游西岔野牛沟河，祁连水文站控制东岔八宝河，黄藏寺断面至莺落峡区间由莺落峡水文站控制，具体水文站信息详见表1。本研究选用札马什克水文站、祁连水文站和莺落峡水文站的逐月径流量和输沙量实测资料进行时间序列分析。

表1 黑河上游主要水文站点基本信息

站点名称	纬度	经度	高程/m	集水面积/km^2	数据年限
札马什克	38°14′	99°59′	2 810	4 589	1958—2013
祁连	38°11′	100°15′	2 787	2 452	1968—2013
莺落峡	38°49′	100°11′	1 700	10 009	1955—2013

1.2 研究方法

采用的主要分析方法有：水沙年内变化和年际变化采用数理统计法，水沙趋势和突变分析采用Mann-Kendall非参数检验法及累积距平法。Mann-Kendall非参数检验法不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，更适用于类型变量和顺序变量，在趋势分析中得到了广泛的应用[9-11]。累积距平法是一种比较常用的判断水沙序列变化趋势的方法。累积距平值(LP_i)的正负极值点处说明有可能出现突变，用以辅助判断Mann-Kendall突变检验杂点较多时的突变点。

2 结果与分析

2.1 黑河上游水沙特征变化分析

2.1.1 年内变化 黑河上游干流札马什克水文站、祁连水文站和莺落峡水文站1955—2013年实测年径流量、输沙量的年内分配过程如图1所示。黑河来水是由祁连山区的大气降水、冰雪融水和地下水组成[12]，其中大气降水是黑河的主要补给来源[13-14]。受降水条件、河流补给类型和自然地理条件的影响，黑河上游干流径流年内分配极不均匀。总体上，黑河上游干流3个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)径流年内分配均呈现出明显的“单峰型”分布，其径流量主要集中在汛期(5—10月)，该时段径流量占全年径流量的80%以上(变化范围80.97%～82.45%)，超过

非汛期径流量的 4 倍。受河流径流变化的影响,黑河上游干流泥沙年内分配与径流年内分配基本一致,也呈明显的"单峰型"分布。在冬季,黑河径流主要靠地下水进行补给[14],其含沙量基本为零;而在夏季大气降水是黑河径流的主要补给来源[14],其含沙量从 5 月急剧增加,7 月达到最大值,8 月有所减少,9—11 月急剧减少,直至 11—12 月再次降到最低值,基本接近于零。

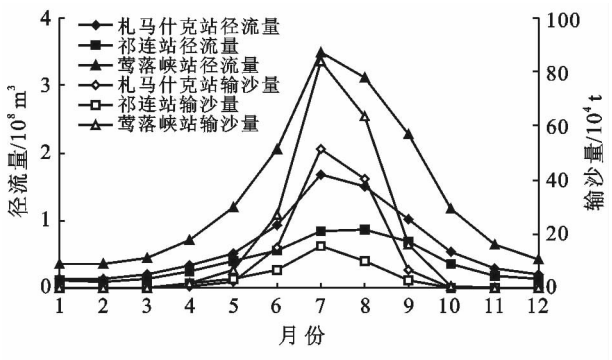


图 1　黑河上游 3 个水文站径流量、输沙量年内分配过程

2.1.2　年际变化　黑河上游干流札马什克水文站、祁连水文站和莺落峡水文站实测径流量和输沙量的历年变化状况如图 2 所示。由图 2 可以看出,黑河上游干流 3 个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)输沙过程基本和径流变化过程相对应。黑河上游干流 3 个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)的多年径流量变差系数 C_v 分别为 0.18,0.17 和 0.16,径流量极值比分别为 1.99,2.24,2.09。两项特征值都是我国和西北地区径流年际变化的低值区,说明黑河上游干流径流年际变化的丰枯波幅不是很大,年际径流量变化相对比较稳定。多年输沙量变差系数 C_v 分别为 0.87,0.75和 0.85,输沙量极值比分别为 43.23,18.96 和 269.65,说明黑河上游输沙量年际变化剧烈。其中莺落峡水文站在 2001 年以后变化最为剧烈,输沙量显著降低。

2.1.3　空间变化　利用 1968—2013 年水沙同步观测资料进行统计分析,黑河上游干流 3 个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)控制区间不同时段径流量、输沙量统计结果详见表 2。由表 2 可以看出,黑河上游多年平均输沙量为 1.88×10^6 t,其中札马什克水文站多年平均输沙量为 1.17×10^6 t,祁连水文站多年平均输沙量为 3.94×10^5 t,分别占干流总输沙量的 62.2%和 21.0%。由此可以看出,黑河上游札马什克水文站控制区产流能力最大,对黑河干流泥沙的贡献也最大;祁连水文站控制区的产沙贡献量次之,而黄藏寺断面至莺落峡水文站的区间产沙贡献量最小。

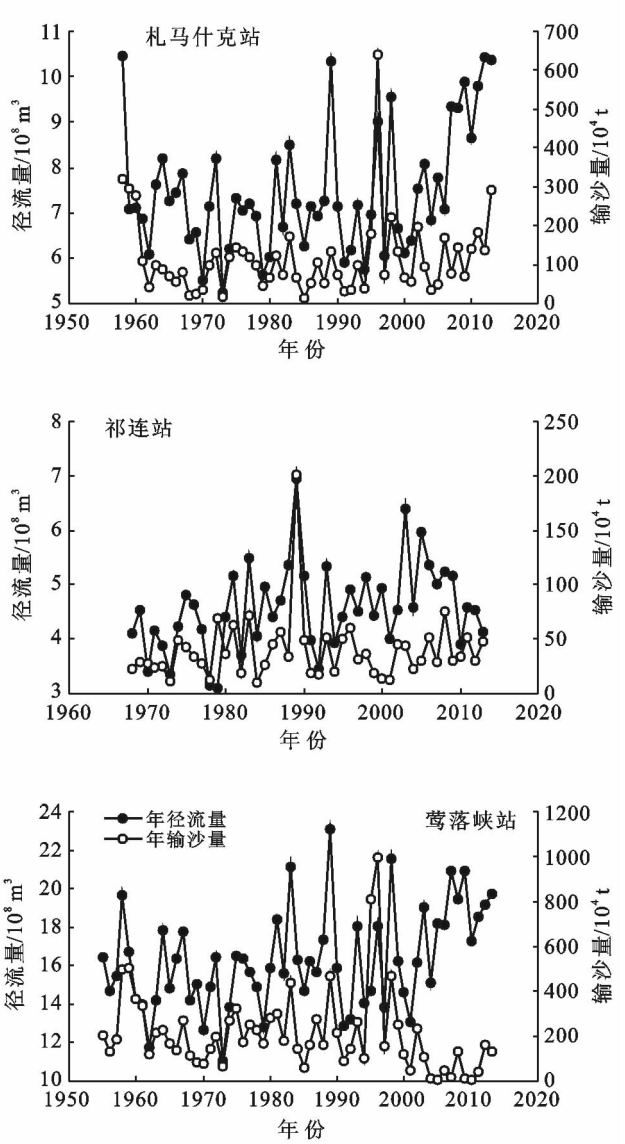


图 2　黑河上游 3 个水文站径流量、输沙量历年变化

对黑河上游干流 3 个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)各控制区间侵蚀模数进行统计(表 3),札马什克、祁连和莺落峡 3 个水文站多年平均年侵蚀模数分别为 240.91,160.51 和 187.81 t/(km² · a)。结果表明,上游札马什克水文站控制区域水土流失较祁连水文站控制区域严重。另外对上游 3 个水文站控制区不同时段的侵蚀模数统计表明,在 20 世纪 90 年代以前,札马什克和莺落峡站侵蚀模数呈增大趋势,到 21世纪初其侵蚀模数较 90 年代有所减小,特别是莺落峡站控制区域的侵蚀模数减小明显;而祁连站控制区域的侵蚀模数呈先增大后减小再增大的变化特征。

表 2 黑河上游干流 3 个水文站各区间输沙量统计

年 份	札马什克站		祁连站		莺落峡站	
	径流量/10^8 m^3	输沙量/10^4 t	径流量/10^8 m^3	输沙量/10^4 t	径流量/10^8 m^3	输沙量/10^4 t
1968—1980	6.57	81.06	3.99	31.58	14.65	183.65
1981—1990	7.57	86.83	4.99	57.64	17.43	240.26
1991—2000	6.93	152.25	4.50	31.97	15.73	289.06
2001—2013	8.58	126.22	4.88	38.75	18.13	74.32
1968—2013	7.46	116.81	4.57	39.36	16.47	187.81
集水面积/km^2	4 589		2 452		10 009	

表 3 黑河上游干流 3 个水文站侵蚀模数统计 t/(km^2 · a)

年 份	札马什克站	祁连站	莺落峡站
1968—1980	176.63	128.78	183.49
1981—1990	189.20	235.06	240.05
1991—2000	331.71	130.40	288.80
2001—2013	275.06	158.03	74.25
1968—2013	240.41	160.51	187.81

2.2 黑河上游水沙特征变化趋势分析

对黑河上游干流 3 个水文站统计序列年径流量、输沙量进行 Mann-Kendall 趋势检验分析，显著性水平 α 取0.05，其统计计算结果详见表 4。由表 4 可知，黑河上游干流 3 个水文站(札马什克、祁连和莺落峡)径流系列 Mann-Kendall 统计量分别为 2.04，2.50 和 2.91，均高于显著性 $\alpha=0.05$ 时的临界值 1.96，说明上游干流径流量总体年际变化呈显著增加趋势。上游 3 个水文站输沙系列 Mann-Kendall 统计量分别为 0.936，1.125 和 −2.998，其中札马什克和祁连站统计量的绝对值小于显著性 $\alpha=0.05$ 时的临界值 1.96，而莺落峡站输沙序列 Mann-Kendall 统计量的绝对值大于显著水平 $\alpha=0.01$ 时的临界值 2.32，说明莺落峡水文站年输沙量减小趋势异常显著。

表 4 黑河上游干流 3 个水文站径流、输沙变化 Mann-Kendall 趋势检验

类别	项目	札马什克站	祁连站	莺落峡站
径流量	检验统计量	2.04	2.504	2.911
	检验临界值	1.96	1.96	1.96
	变化趋势	显著增加	显著增加	显著增加
输沙量	检验统计量	0.936	1.125	−2.998
	检验临界值	1.96	1.96	1.96
	变化趋势	增加不显著	增加不显著	显著减小

2.3 黑河上游水沙特征变化突变分析

进一步用 Mann-Kendall 法对札马什克、祁连和莺落峡水文站径流量、输沙量的的突变点进行分析，计算结果如图 3 所示。从总体上看，上游 3 个水文站的径流量变化趋势基本一致。1960—1980 年上游 3 个水文站径流呈波动变化趋势，从 1981 年 3 个水文站径流量开始呈增加趋势，其中祁连水文站径流量在 1988—1990 年，1993 年以后径流增加趋势进一步加强，其 Mann-Kendall 统计量超过显著性水平 $\alpha=0.05$的临界值1.96。莺落峡站从 2009 年以后 Mann-Kendall 统计量突破显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界值 1.96。上游 3 个水文站输沙量的变化趋势在 2000 年以前基本一致，在 1960—1970 年呈显著下降趋势，其中札马什克站从 1961 年突破显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界值 −1.96。从 1971 年开始上游 3 个水文站输沙量呈不显著缓慢增加趋势，其中札马什克水文站和祁连水文站分别在 80 年代和 90 年代呈下降趋势，而后呈上升趋势；但莺落峡水文站从 2000 年开始呈显著下降趋势，2007 年突破显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界值 −1.96。

通过构造统计变量 UF_k 和 UB_k，并结合累积距平法进一步分析序列的突变时间，根据两曲线的交点位置，可以得到黑河上游干流 3 站径流量和输沙量的突变点。札马什克水文站径流量突变点是 2010 年，输沙量突变点是 2012 年；祁连水文站径流量突变点是 1982 年，输沙量突变点是 1996 年；莺落峡水文站径流量突变点是 2004 年，输沙量突变点是 2001 年。

2.4 黑河上游水沙特征变化成因分析

2.4.1 降雨对径流泥沙的影响 影响流域来水量变化的主要因素通常为气候因素与人类生产生活等因素[15]，黑河上游山区人类活动影响较小，因此气候条件的变化成为影响该地区径流变化的主要因素。研究表明，中国西北地区的气候由暖干向暖湿转型，祁连山及其北侧的中西段地区是气候转型显著的区域之一[16-17]。由多年实测降雨资料可知(图 4)，上游 3 个水文站多年平均降水量分别为 448.9，396.9 和 179.4 mm；其多年降雨量变差系数 C_v 分别为 0.12，0.14 和 0.26，降水量极值比分别为 2.16，1.81 和 3.61，两项特征值均较小，说明上游 3 个水文站降水年际变化比较稳定。同时对其进行 Mann-Kendall 趋势分析可知(图 4)，上游 3 个水文站 Mann-Kendall 检验统计量分别为 1.266，1.170 和 1.246，均小于临

界值 1.96,表明 3 站降雨量呈不显著增加趋势,特别是在 20 世纪 90 年代以后,3 站降雨量增加明显。另外,通过对上游干流 3 个水文站降雨量和径流量的相关性分析可知,札马什克、祁连和莺落峡水文站站降雨量与径流量的相关系数分别为 0.504($p<0.05$,若下文未作说明则 均小于 0.05),0.567,0.230($p>0.05$),说明降雨量与札马什克站和祁连站径流量相关性显著。究其原因,主要是受气候变化影响,黑河上游地区的年平均气温呈上升趋势,造成秋冬季节变暖明显,降水呈增加趋势,尤其夏季降水增加明显[18-20]。另外,气温的升高也使冰雪融水增加,导致黑河上游非汛期径流量增加[21-25]。

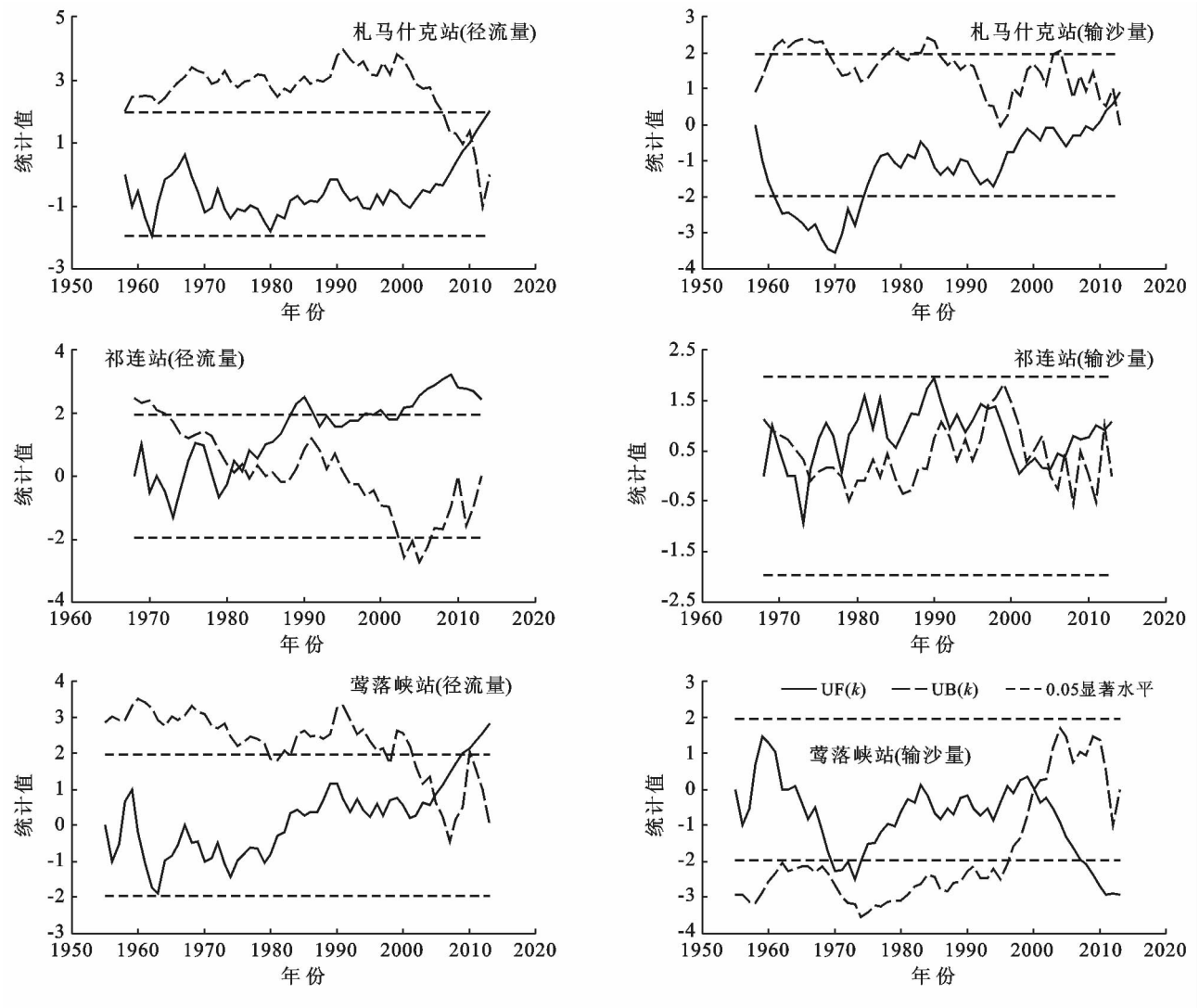


图 3　黑河上游三个水文站径流量、输沙量 Mann-Kendall 突变检验曲线

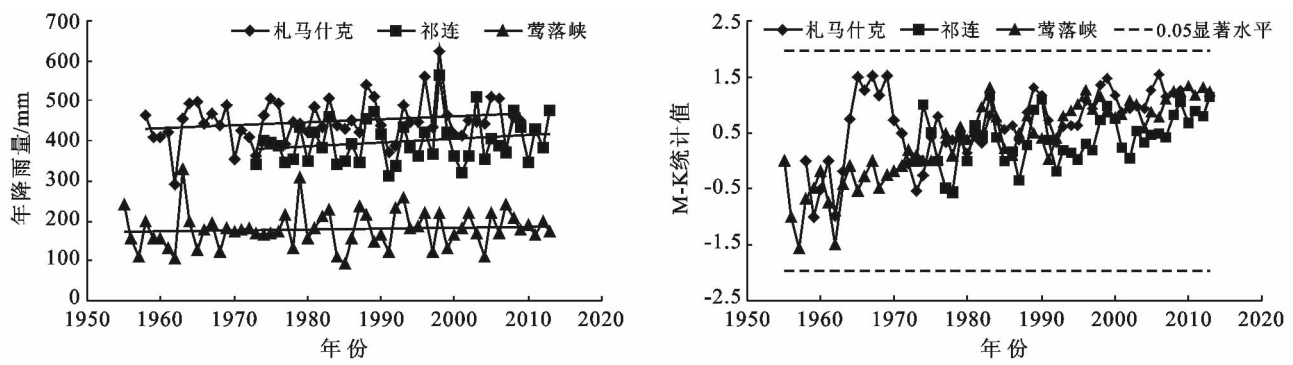


图 4　黑河上游 3 个水文站降雨量变化和 Mann-Kendall 统计

黑河上游干流泥沙主要由降水和降水形成的地表径流冲刷流域内表层土壤形成。随着黑河上游地区降水强度和降水量逐渐增多,形成的超渗流量和地表径流加大了对土壤的侵蚀,从而使河流挟带的泥沙含量增多。通过对降雨量和输沙量的相关性分析可知,札马什克、祁连和莺落峡水文站站降雨量与输沙量的相关系数为0.397,0.476,0.165($p>0.05$)。结果表明,札马什克和祁连站降雨量与输沙量的相关性显著,而莺落峡站降雨量与输沙量的相关性极弱,说明野牛沟河和八宝河的输沙量主要受降雨量影响显著,而黄藏寺至莺落峡区间的输沙量受降雨影响较小。

2.4.2 水库建设对河流泥沙的影响 黑河上游山区水系是黑河流域的主要产流产沙区,水能资源丰富。从2001年开始,在黄藏寺至莺落峡区间的干流河段进行了大规模的开发与水库建设,先后修建了7座梯级水电站。由黑河上游3个水文站的侵蚀模数可知,莺落峡站控制区域的侵蚀模数在20世纪90年代以前呈增加趋势,但到21世纪初却由288.80 t/(km^2·a)减少到74.25 t/(km^2·a),呈显著减少。究其原因,主要是从2001年开始部分电站陆续投入运行所致(表5)。黑河上游的电站建设截断了河流泥沙的输移通道,改变了河流的天然水文过程,导致库区水流流速减缓,输沙能力降低,大量泥沙被拦截在库区。而距离莺落峡水文站最近的龙首电站仅有3 km,河床多为岩石峭壁,质地坚硬,水流冲刷的泥沙很少,区间产沙量有限[26]。

表5 黑河上游梯级水电站参数

电站名称	装机容量/10^4 kW	总库容/10^8 m^3	年平均发电量/(10^8 kW·h)	全部机组投产时间
龙首电站	5.90	0.132	1.98	200107
龙首二级电站	15.70	0.862	5.28	200408
小孤山电站	10.20	0.014	3.91	200607
二龙山电站	5.05	0.811	1.74	200709
三道湾电站	11.20	0.053	4.00	200905
大孤山电站	6.50	1.41	2.01	200907
宝瓶电站	12.30	2.15	4.10	201207

2.4.3 水土保持对河流泥沙的影响 黑河上游山区在建国初至20世纪80年代,先后经过了3次大的毁林伐木、开垦农田的行动[27]。由于过度砍伐、开垦牧场、人口剧增,祁连山区植被遭到严重破坏,与建国初期比森林面积减少16.5%,灌木林退化30%,致使20世纪80年代黑河上游各水文站控制区域的侵蚀模数增大明显。1980年国务院将祁连山林区划为水源涵养林,停止了森林砍伐。1987年甘肃省批准建立祁连山自然保护区,1988年国务院批准成立国家级自然保护区,进一步加强了森林草地保护,森林面积开始逐渐恢复[28]。20世纪90年代以后,国家和甘肃省虽然加大了对祁连山水源涵养林的保护,祁连山北坡林地面积较1989年增加了6.00×10^4 hm^2。但是,毁林开荒种地现象仍未彻底杜绝,超载放牧造成的植被退化现象仍在加剧。其结果表现为札马什克控制的野牛沟河和祁连站控制的八宝河侵蚀模数呈增大趋势。进入21世纪以来,祁连山区先后实施了祁连山天然林保护工程,退耕还林工程,黑河流域综合治理上游祁连山生态恢复工程、退牧还草工程、祁连山生态移民工程,部分森林纳入了国家森林生态效益补偿范围。通过严格的保护管理,基本遏制了盗伐林木、毁林开垦的现象。其结果表现为札马什克控制的野牛沟河流域侵蚀模数有所降低,但祁连站控制的八宝河流域由于人口增长,经济的快速发展,采矿、超载放牧、开发建设等造成了新的水土流失[29],侵蚀模数有所增大。尽管黑河上游一系列生态建设保护工程的实施,使得上游林地得到了一定的保护,但是由于黑河源头区自然条件恶劣、植被生长缓慢,目前水土流失形势仍然十分严峻[29-30]。

3 结 论

(1) 黑河上游流域水沙时空分配不均,年际变化大。汛期5—10月是黑河上游山区降雨集中期,也是黑河流域产流和产沙的集中时期。黑河干流上游输沙量主要来源于祁连山深山区,其中由札马什克水文站控制河段和祁连水文站控制河段输沙量分别占黑河干流输沙量的62.2%和21.0%,黄藏寺断面至莺落峡水文站的区间产沙量占黑河干流总输沙量的16.8%。

(2) 经Mann-Kendall秩相关检验法综合分析,黑河上游干流3个水文站径流量总体上从20世纪80年代以后呈增加趋势;从20世纪70年代开始三站输沙量呈不显著缓慢增加趋势,其中札马什克水文站和祁连水文站分别在80年代和90年代呈下降趋势,而莺落峡水文站从21世纪初开始呈显著下降趋势,莺落峡水文站输沙量突变的年份为2001年。

(3) 分析黑河上游干流来水来沙变化影响因素可知,受中国西北地区气候变暖影响,黑河上游径流量显著增加的变化趋势与黑河上游地区降雨量增加相一致;黑河上游两支流野牛沟河和八宝河输沙量的变化与降雨量密切相关;黑河干流黄藏寺至莺落峡区间输沙量的变化与人类活动密切相关,水库建设导致的泥沙淤积是黄藏寺至莺落峡区间输沙量显著减少

的主要原因;另外,20 世纪 90 年代以前,水土流失也是导致黑河上游侵蚀模数增大、输沙量增加的重要原因。

[参 考 文 献]

[1] Stover S C, Montgomery D R. Channel change and flooding, Skokomish River, Washington[J]. Journal of Hydrology, 2001,243(3/4):272-286.

[2] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers [J]. Geomorphology, 2006,79(3/4):192-216.

[3] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951—2000 [J]. Global and Planetary Change, 2008,62 (3/4):187-194.

[4] 管华.秦岭—黄淮平原交界带河流水沙关系分析[J]. 山地学报,1999,17(2):110-114.

[5] 丁永建.祁连山中部地区 40 年来气候变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2000,22(3):193-199.

[6] 王录仓,张晓玉.黑河流域近期气候变化对水资源的影响分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):60-65.

[7] 王钧,蒙吉军.黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J].地理科学,2008,28(1):83-88.

[8] 张喜风.黑河上游气候变化对出山口径流的驱动分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):542-548.

[9] 刘晓琼,刘彦随,李同昇,等.基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J].地理科学,2015,35(2):211-217.

[10] 欧阳潮波,王文龙,田勇,等.60 年来黄河河龙区间水沙变化特征及人类活动影响评价[J].泥沙研究,2016(4):55-61.

[11] 姚俊强,杨青,韩雪云,等.气候变化对天山山区高寒盆地水资源变化的影响:以巴音布鲁克盆地为例[J].干旱区研究,2016,33(6):1167-1173.

[12] 康尔泗,李新,张济世,等.甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[J].冰川冻土,2004,26(6):657-667.

[13] 王宁练,张世彪,贺建桥,等.祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究[J].科学通报,2009,54(15):2148-2152.

[14] 赵良菊,尹力,肖洪浪,等.黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J].科学通报,2011,56(1):58-67.

[15] 信忠保,许炯心,余新晓.近 50 a 黄土高原水土流失的时空变化[J].生态学报,2009,29(3):1129-1139.

[16] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北部气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164.

[17] 李栋梁,魏丽,蔡英,等.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J].冰川冻土,2003,25(2):135-142.

[18] 龚家栋,李小雁.黑河流域不同下垫面区域的气候变化特征[J].冰川冻土,2001,23(4):423-431.

[19] 蓝永超,丁永建,康尔泗.近 50 年来黑河山区汇流区温度及降水变化趋势[J].高原气象,2004,23(5):723-727.

[20] 张杰,李栋梁.祁连山及黑河流域降雨量的分布特征分析[J].高原气象,2004,23(1):81-88.

[21] 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[J].地理科学,2006,26(1):40-46.

[22] 李栋梁,刘洪兰.黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J].中国沙漠,2004,24(4):385-391.

[23] 张杰,韩涛,王建.祁连山区 1997—2004 年积雪面积和雪线高度变化分析[J].冰川冻土,2005,27(5):649-654.

[24] 王建,李硕.气候变化对中国内陆干旱区山区融雪径流的影响[J].中国科学(D 辑):地球科学,2005,35(7):664-670.

[25] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J].地理学报,2008,63(3):257-269.

[26] 崔亮,陈学林,安冬,等.60 年来黑河流域东部子水系中上游径流量、输沙量变化特征分析[J].水文,2015,35(1):82-87.

[27] 汪有奎,贾文雄,潮海,等.祁连山北坡的生态环境变化[J].林业科学,2012,48(4):21-26.

[28] 汪有奎,杨全生,郭生祥,等.祁连山北坡森林资源变迁[J].干旱区地理,2014,37(5):966-979.

[29] 田磊,任建华.关于加强黑河流域青海源头区治理的思考[J].中国水土保持,2010(11):32-34.

[30] 刘金巍,靳甜甜,刘国华,等.黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能[J].生态学报,2014,34(23):7013-7025.