

近 40 年塔里木河流域水沙演变及其空间分异特征

祁泓锟¹, 焦菊英^{1,2}, 严晰芹², 李建军¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究塔里木河流域自然条件和人类活动改变造成的河流水沙变化,依据 1980—2020 年塔里木河干流阿拉尔站、源流玉龙喀什河控制水文站同古孜洛克站、叶尔羌河卡群站、阿克苏河新大河站和开都河焉耆站的实测径流和输沙资料,利用 Mann-Kendall 检验、Pearson 相关性分析和 Pettitt 非参数检验等方法,分析了近 40 年塔里木河流域水沙演变及其空间分异特征。结果表明:在 1980—2020 年期间塔里木河流域同古孜洛克站、阿拉尔站、卡群站、焉耆站径流量显著增加,新大河站、同古孜洛克站、阿拉尔站径流量出现突变点,分别在 1992 年、1999 年、2000 年,突变后较突变前增长 18.23%, 18.10%, 62.15%;卡群站和同古孜洛克站的输沙量没有显著变化趋势,阿拉尔站、新大河站和焉耆站的输沙量都显著减少,突变点都在 2001 年,突变后较突变前降低 36.73%, 30.50%, 68.31%。塔里木河水沙分布具有显著的空间差异,源流四站控制区的径流深存在南北空间上的差异,北部源于天山的阿克苏河和开都河径流深低于南部源于喀喇昆仑山的叶尔羌河和玉龙喀什河,从上游向下游输沙模数降低,径流主要受降雨和气温差距影响,而泥沙差异则是由于植被覆盖度变化。在上游三源流汇入干流的区间内,年平均消耗径流量 98.21 亿 m³,径流深 167.31 mm,淤积泥沙量 4 424.15 万 t,淤积模数 753.69 t/(km²·a)。对塔里木河四源一干径流泥沙实测数据的分析结果证明了塔里木河近期综合治理工程总体上取得了良好的生态环境效益。

关键词:径流量; 输沙量; 时空变化; 空间分异; 塔里木河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0117-07

Runoff and Sediment Evolution and Its Spatial Differentiation in the Tarim River Basin in Recent 40 Years

QI Hongkun¹, JIAO Juying^{1,2}, YAN Xiqin², LI Jianjun¹

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the change of water and sediment in Tarim River Basin caused by the change of natural conditions, based on the measured runoff and sediment transport data of the main Tarim River at Alar Station, Yulong Kashi River Control Hydrological Station-Tongguziluo Station, Yarkant River Ka Qun Station, Aksu River Xindahe Station and Kaidu River Yanqi Station from 1980 to 2020, we analyzed the runoff and sediment evolution and its spatial differentiation characteristics in the Tarim River Basin in the past 40 years by the Mann-Kendall test, Pearson correlation analysis and Pettitt non-parametric test. The results are summarized as follows. During 1980—2020, the runoff of Tongguziluke station, Alaer station, Kaqun station and Yanqi station in Tarim River Basin increased significantly, while the runoff of Xindahe station, Tongguziluke station and Alaer station appeared abrupt change point in 1992, 1999 and 2000, respectively. After mutation, they increased by 18.23%, 18.10% and 62.15% compared with before mutation. The sediment transport at Kaqun station and Tongguziluke station showed no significant change trend, but the sediment transport at Alaer station, Xindahe station and Yanqi station all decreased significantly. The mutation points were all in 2001, and the sediment transport after mutation decreased 36.73%, 30.50% and 68.31% compared with before mutation. Runoff and sediment distribution in Tarim River had obvious spatial differences, four origin rivers controlled the spacial differences in runoff depth, the runoff depths of north river

收稿日期:2021-09-15

修回日期:2021-10-16

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202)

第一作者:祁泓锟(1997—),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,研究方向:土壤侵蚀。E-mail:qihongkun123@sina.com

通信作者:焦菊英(1965—),女,陕西宝鸡人,博士,研究员,主要从事流域侵蚀产沙及土壤侵蚀研究。E-mail:jjyiao@ms.iswc.ac.cn

Aksu River and Kaidu River which originate from Tianshan were below the runoff depths of the south river Yarkant River and Yulongkashi River which originate from the Karakoram. Sediment modulus decreased from upstream to downstream. Runoff was mainly affected by rainfall and temperature gap. Sediment variation was due to vegetation coverage. In the region where the three upstream streams merge into the main stream, the annual average runoff consumption was 9.821 billion m³, runoff depth was 167.31 mm, silt volume was 4 424.15 million tons, and silt modulus was 753.69 t/(km² · a). The analysis of runoff and sediment data of four sources and one main stream of Tarim River proves that the comprehensive control project of Tarim River has achieved good ecological and environmental benefits.

Keywords:runoff; sediment; spatiotemporal variation; spatial differentiation; Tarim River Basin

水沙变化关系与河势稳定、河道演变、江湖关系等密切相关,是流域系统中最为活跃的部分^[1]。近十几年来,由于气候变化和人类活动的影响,河流径流量与输沙量出现了显著性变化,影响着流域内水资源的配置和开发利用,同时对流域内地貌演变、生物化学循环产生了重要影响^[2-3]。塔里木河地处我国西北部,是我国最大的内陆河,流域内大小河流约 170 余条^[4],气候干旱,降水稀少,流域内生态极为脆弱。流域面积及多年平均水资源量约占我国西北干旱区面积及水资源总量的 1/3,塔里木河对于我国干旱内陆区经济发展和生态文明建设起着重要作用^[5]。新疆是典型的大陆性干旱气候区和生态脆弱区,对全球气候变暖尤为敏感,施雅风等^[6]研究指出,中国新疆地区的气候由暖干向暖湿的转变。在国家实施西部大开发战略以来,塔里木河流域内人口激增,经济加速增长。自 20 世纪 90 年代末以来,尽管流域内各主要源流来水持续偏丰,但随着耕地面积的扩大,干流河道径流量并未显著增加,干流区水资源供需矛盾加剧^[7]。在“十五”计划以来,加强生态建设,保护和治理环境成为国家与地方治理中的重点,使塔里木河流域近期综合治理规划得以实施,地方采取了一系列措施如退耕还林、封沙育林等,提高了流域内的森林覆盖面积^[8]。塔里木河流域生态环境发生较大变化,水沙关系特征也出现了新的变化,这些变化都影响了塔里木河流域水资源的利用以及水土流失等。因此,了解塔里木河流域近年来水沙条件的变化具有重要意义。

目前学者们就塔里木河流域水沙演变问题已经开展了大量的研究,如张修宇等^[9]采用线性倾向估计和 M-K 非参数检验法分析了塔里木河流域的水文过程及其规律;周海鹰等^[10]则运用 M-K 趋势检验法、Pettitt 突变检验法和年代时段分析法,探讨了塔里木河流域径流对气温和降雨的响应关系;刘静等^[11]使用 M-K 趋势检验、R/S 分析法、Pettitt 突变检验、集合经验模态分解和年代时段分析方法,从

多时间尺度变化的角度,系统地分析了源流区径流演变特征。大多数研究集中于分析塔里木河流域河流径流量的变化,但对河流输沙量的变化及趋势的研究较少,而塔里木河流域泥沙的输移变化既是上游地区生态变化的象征,也是中下游地区的肥力源泉^[12],可对流域侵蚀产沙规律的研究,区域生态环境建设等提供依据。因此,本文采用 Mann-Kendall 检验、Pearson 相关性分析和 Pettitt 非参数检验等方法,分析近 40 年来塔里木河流域径流量和输沙量时间演变与空间分异特征,为流域水资源管理与水土保持治理提供参考依据。

1 研究区概况

塔里木河流域地处中国新疆南部,流域面积 19.80 万 km²,位于天山山脉与昆仑山、喀喇昆仑山脉之间,发源于天山的阿克苏河、喀喇昆仑山的叶尔羌河以及和田河汇流流入塔里木河干流,干流流经中国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠,最后流入台特玛湖,河川径流总量 410.90 亿 m³^[13],是中国最大的内陆河流域(图 1)。历史上,塔里木河干流由流域内 9 个较大的支流补给,但近年来由于全球气候变化以及人类活动影响,尤其是绿洲农业的过度开发,目前只有和田河、叶尔羌河、阿克苏河和开都河 4 条源流与塔里木河干流有地表水联系^[14]。

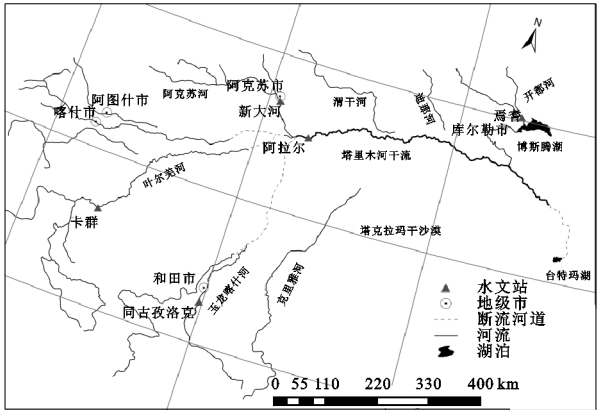


图 1 研究区示意图

2 资料与方法

2.1 资料来源

本文利用《新疆水资源公报》和《新疆地下水》的水文资料,基于监测数据时间的统一性,对塔里木河干流控制站阿拉尔站和 4 个源流控制站叶尔羌河卡群站、玉龙喀什河同古孜洛克站、阿克苏河新大河站、开都河焉耆站 1980—2020 年的径流量和输沙量数据进行整理与统计分析。

2.2 数据分析

2.2.1 趋势分析 采用非参数 Mann-Kendall 趋势检验法、Pettitt 突变点检验法,分析径流、输沙序列的趋势性与突变性。

(1) 非参数 Mann-Kendall(MK)趋势检验法。MK 法具有适用范围广、定量化程度高、人为性小、理论意义明确的特点,是目前水文气象研究中常用的一种时间序列检验方法,检验统计量的计算与判断见文献^[15-16]。

(2) Pettitt 检验法。Pettitt 法是识别水文序列突变点的非参数检验方法,前提是序列存在趋势性变化,通常用于连续数据的水文序列或气候序列的单个变化点检测^[17]。先找到整个时间序列中的一级突变,然后以此为界分成两个序列继续检测。

2.2.2 空间分析 (1) 径流深与输沙模数计算。径流深是指在某一时段内通过河流上指定断面的径流总量(W ,以 m^3 计)除以该断面以上的流域面积(F ,以 km^2 计)所得的值。它相当于该时段内平均分布于该面积上的水深(R ,以 mm 计),即 $R=W/1000F$ 。

输沙模数(M_s ,单位 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$)是指某一时段内河流上指定断面的输沙量(W_s ,单位 t)与该断面以上集水面积(F ,单位 km^2)的比值,即 $M_s=W_s/F$ 。输沙模数是表示流域侵蚀产沙强度的指标之一,是流域

内地貌、地面组成物质、气候、植被覆盖度以及人类活动对泥沙综合影响的结果和反映,是研究流域侵蚀产沙规律,进行水土保持规划、水利工程设计等的最基本依据^[18]。

(2) 空间分异。通过计算与比较源流各站控制区的径流深和输沙模数,探究各源流之间的水沙空间差异性。而在比较了干流入口阿拉尔控制区与上游各源流水文站控制区的水沙后,可以得知在源流汇入干流过程中,河流径流量与泥沙量的变化,并计算得出区间内的径流深和输沙模数。

3 结果与分析

3.1 塔里木河流域源干区径流与输沙统计特征

根据塔里木河源干区水文站点 1980—2020 年之间的年径流量、年输沙量数据进行统计(表 1),多年平均径流量和输沙量最小值在焉耆站,分别为 26.24 亿 m^3 ,59.80 万 t ;最大值在卡群站,分别为 69.16 亿 m^3 ,3 206.36 万 t 。焉耆所控制的开都河位于塔里木河流域下游,径流量与输沙量都显著低于塔里木河流域其他源流。干流阿拉尔站径流量极值比最大为 4.14,而其他各源流站的径流极值比均小于 2,表明塔里木河干流出现过极端径流状况。输沙量极值比最大值在焉耆为 43.50,远大于其他各站的输沙极值比。5 个水文控制站的径流量与输沙量 C_v 值均 >1 ,属于强变异性。年径流量的 C_v 值较输沙量大,径流量变化变异程度较高,其中卡群站变化最为明显,而阿拉尔站的径流量 C_v 值最小,说明干流区的径流量年际变化较小,源流区控制站的年径流量则变化更加剧烈。输沙量的变异程度中,阿拉尔站输沙量的 C_v 值最大为 2.13,而焉耆站的输沙量 C_v 值最小为 1.06,表明塔里木河上游泥沙变异程度较下游更高。

表 1 塔里木河流域河流径流泥沙特征值

河名	站名	径流量					输沙量				
		平均值/ 亿 m^3	最大值/ 亿 m^3 (年份)	最小值/ 亿 m^3 (年份)	极值比	变差 系数	平均值/ 万 t	最大值/ 万 t (年份)	最小值/ 万 t (年份)	极值比	变差 系数
塔里木河干流	阿拉尔	35.71	72.00(2010)	14.02(2009)	4.14	2.41	1873.40	3893.33(1980)	358.00(2014)	9.88	2.13
	叶尔羌河	69.16	95.63(2012)	44.82(1988)	1.13	6.03	3206.36	8541.11(1998)	818.73(1992)	9.43	2.02
	玉龙喀什河	23.62	34.73(2010)	14.76(1992)	1.35	4.88	1235.86	4760.00(2010)	280.00(2009)	16.00	1.58
	阿克苏河	41.12	63.51(2010)	21.22(2014)	1.99	4.27	1855.33	5360.96(1998)	350.00(2014)	14.32	1.94
	开都河	26.24	44.82(2001)	16.30(1985)	1.75	3.91	59.80	203.83(1998)	4.58(2020)	43.50	1.06

3.2 径流与输沙的演变趋势

水沙演变过程具有复杂的非线性特征,隐含着突变、趋势性等特性,因此通过对塔里木河流域源干流水文站径流量和输沙量进行 Mann-Kendall 检验分析,结果表明(表 2):卡群站、同古孜洛克站、阿拉尔站、焉耆站各站的径流量秩相关系数均为正数,说明塔里木河上游源

流区及干流径流量呈上升趋势,且阿拉尔站和同古孜洛克站的年径流量上升趋势均达到 0.01 的置信水平,卡群站和焉耆站的年径流量上升趋势均达到 0.10 的置信水平,而新大河站年径流量上升趋势不显著;焉耆站、新大河站和阿拉尔站输沙量秩相关系数均为负数,三站的年输沙量变化呈下降趋势,焉耆站与阿拉尔站的年

输沙量下降趋势都达到 0.01 的置信水平,新大河站的年输沙量下降趋势达到 0.05 的置信水平。而卡群站和同古孜洛克站年输沙量无显著变化趋势。于塔里木河整体而言,径流量年际变化呈显著上升趋势,输沙量则随时间呈显著下降趋势。

表 2 塔里木河流域主要水文站径流量和输沙量 Mann-Kendall 秩次相关分析

河名	站名	径流量		输沙量	
		Z 值	显著性水平	Z 值	显著性水平
塔里木河干流	阿拉尔	3.34	0.01	-3.75	0.01
叶尔羌河	卡群	1.55	0.1	0.22	—
玉龙喀什河	同古孜洛克	2.45	0.01	0.99	—
阿克苏河	新大河	1.23	—	-2.03	0.05
开都河	焉耆	1.29	0.10	-4.88	0.01

利用 Pettitt 非参数检验分析对焉耆、新大河、阿拉尔、卡群和同古孜洛克水文站的径流量、输沙量进行突变点分析,结果见图 2 和表 3。

由突变点分析结果可知,新大河站和同古孜洛克站径流量突变点分别出现在 1992 年、1999 年,突变后较突变前增长 18.23%,18.10%。阿拉尔站的径流量突变点出现在 2000 年,增幅为 62.15%。而气候变化是造成塔里木河径流量变化的重要因素,在 1980s 中期塔里木河源流区气候转型,由暖干转向暖湿^[19];径流量在 1990s 发生了突变,是由于水文循环对气候响应的滞后性,径流变化晚于气候转型时间^[20]。而卡群站突变年份晚于干流阿拉尔站,说明叶尔羌河向塔里木河干流汇入的径流量对干流影响度已经很低了。输沙量序列的突变时间基本比径流量序列突变时间延后,焉耆站、新大河站和阿拉尔站的输沙量突变点都出现在 2001 年,年平均输沙量突变后较突变前降低 68.31%,30.50%,36.73%;干流阿拉尔站径流量与上游三源流的径流量的变化趋势比较一致,其中阿拉尔站径流量均值在突变前后的差距最大,下游焉耆站突变点前后变化不大(图 3A)。对于输沙量来说,卡群站波动明显,阿拉尔站和焉耆站出现显著下降趋势(图 3B)。

3.3 径流输沙的空间分异特征

塔里木河源流四站控制区的径流深存在南北空间上的差异,同古孜洛克站控制区的径流深最大为 161.83 mm,其次为卡群站控制区的 137.79 mm,焉耆站控制区的 116.64 mm,新大河站控制区的径流深最小为 95.41 mm;而干流阿拉尔站控制区径流深更小,只有 21.43 mm(图 5)。北部发源于天山山区的阿克苏河新大河站控制区和开都河焉耆站控制区的径流深明显低于南部发源于喀喇昆仑山的叶尔羌河卡群站控制区和玉龙喀什河同古孜洛克站控制区,且卡群站、同古孜洛克站都位于河流出口,来水

量较大,而阿克苏河新大河站控制区位于阿拉尔市,沿途农业灌溉和生活用水都对其径流进行着调用。各个水文站控制区的径流深在突变后都出现了明显的增加(表 4),阿拉尔站控制区增加 62.15%,新大河站控制区增加 19.09%,同古孜洛克站控制区增加 18.23%。可见,发源于天山的阿克苏河突变后增加幅度大于发源自喀喇昆仑山的叶尔羌河和玉龙喀什河。近年来新疆地区整体气温上升,但天山山区气温上升速度较新疆南部更快,而降水量方面天山山区明显增加而塔里木盆地却呈减少趋势^[21],这也是塔里木河流域北部径流量在突变后增长幅度大于南部的主要因素。南部河流主要来源于冰川融水,喀喇昆仑山的冰川虽然依然呈退缩趋势,但退缩速率降低^[22]。

塔里木河源流水文站控制区的输沙模数存在明显的空间差异,同古孜洛克站控制区输沙模数最大为 846.48 t/(km²·a),卡群站控制区为 638.71 t/(km²·a),新大河站控制区为 430.47 t/(km²·a),焉耆站控制区的输沙模数为 26.57 t/(km²·a),干流阿拉尔站控制区的输沙模数为 112.44 t/(km²·a)(图 5)。由于和田河流域河床质轻,以沙质为主,且多为宽浅河道,而玉龙喀什河坡陡,流速大,水土流失程度也较高,导致卡群站与同古孜洛克站的控制区输沙模数较高。源流区三源流中阿克苏河的新大河站输沙模数最小,是由于其源流昆马力克河和托什干河起源于天山南侧,以冰川融水补给为主^[23],森林覆盖率 22.57%^[24],植被覆盖度较东南沙漠地区更高,输沙模数的空间分异也体现了塔里木河流域植被分布“北高南低,西高东低”的特点^[25]。阿拉尔站控制区的输沙模数代表着塔里木河上游流域的区域产沙特征,与塔里木河上游各源流水文站控制区相比显著下降,其原因在于塔里木河上游各源流在到达出口后产沙量较大,但在输送到干流的过程中经过大面积的冲击平原,泥沙逐渐沉积在河道中,因此上游源流向干流输送的过程中必须保证足够的径流量,减少河道淤积泥沙^[26];与下游源流开都河焉耆站控制区的输沙模数进行比较,塔里木河上游源流区域产沙显著大于下游源流区域产沙量,上游源流是塔里木河干流中泥沙的主要来源区域。干流阿拉尔站以及源流的新大河站控制区和焉耆站控制区在突变后输沙模数都显著减少,减幅分别为 36.72%,30.50%和 68.31%。根据对塔里木河流域的植被覆盖变化分析^[25],阿克苏河和开都河流域的植被覆盖度都有着明显改善,各流域输沙模数的变化很好地响应了其源区的植被生态变化情况。由新大河站和阿拉尔站输沙变化幅度可以说明,阿克苏河的泥沙输入对于塔里木河干流的泥沙变化起着主要作用。

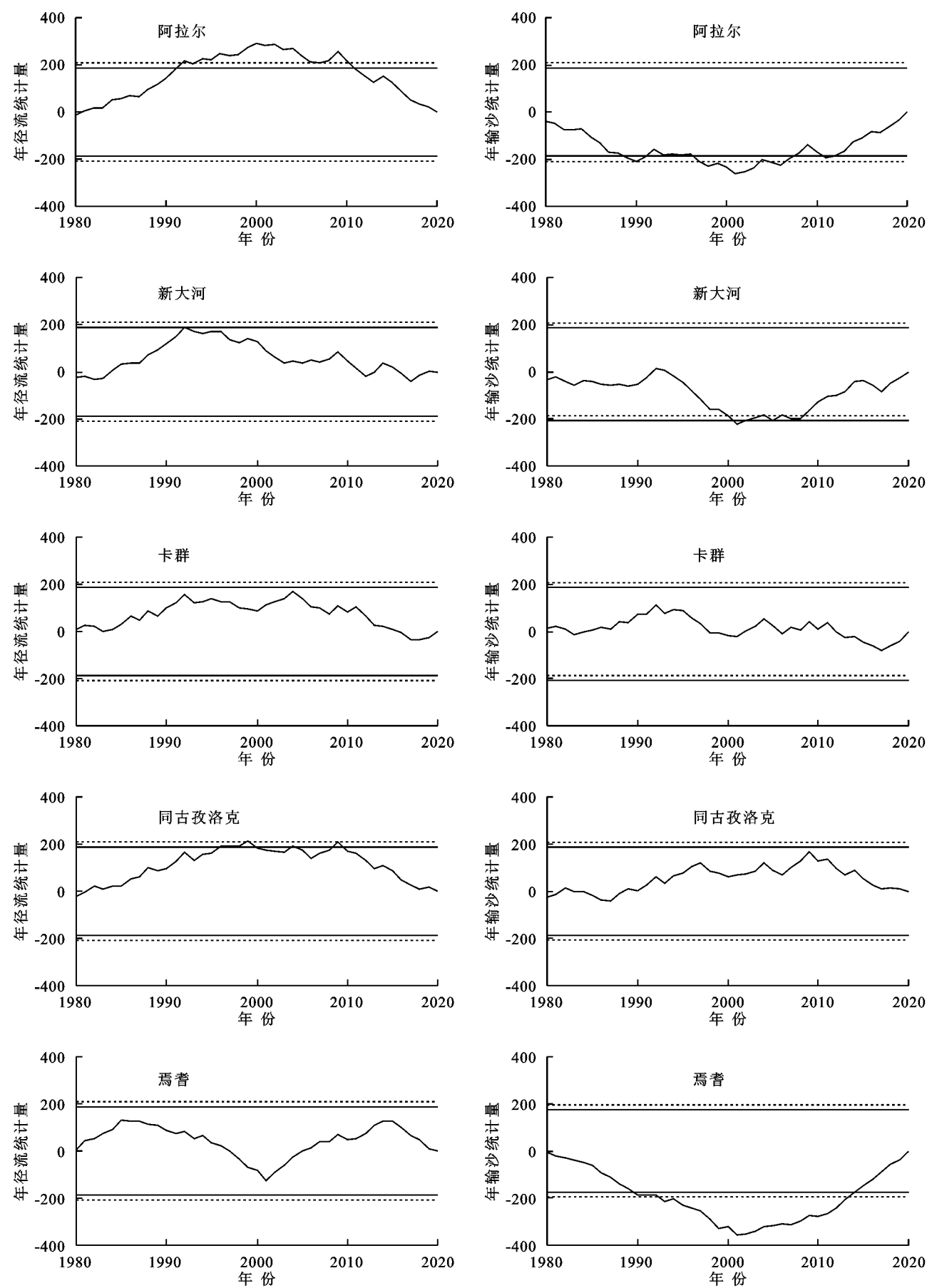


图 2 塔里木河流域主要水文站水沙变化 Pettitt 突变点检验结果

表 3 塔里木河流域主要水文站水沙变化突变年份

河名	站名	径流量	输沙量
		Pettitt 检验突变点年份	Pettitt 检验突变点年份
塔里木河干流	阿拉尔	2000	2001
叶尔羌河	卡群	—	—
玉龙喀什河	同古孜洛克	1999	—
阿克苏河	新大河	1992	2001
开都河	焉耆	—	2001

上游三源流年均径流量总和(133.92 亿 m³)及输沙量总和(6 297.56 万 t)远远大于干流控制站阿拉尔站的年均径流量(35.71 亿 m³)及输沙量(1 873.41 万 t),这是因为河流出山口后进入平原地带,坡度变缓,泥沙在

输移过程中由于障碍物或者植被缓冲区等因素发生沉积^[27],而农业高度开发及绿洲用水也使得径流在向干流输入的过程中被大量调用^[28]。叶尔羌河流经大面积绿洲,随着灌区的开发,绝大部分径流作为灌溉用水^[8],叶尔羌河向塔里木河干流的输入在 1983 年以后已基本断流^[29]。目前,能够全年连续向塔里木河干流供水只有阿克苏河,而和田河只在每年洪水期供水,叶尔羌河只有在遭遇特大洪水时才会有向干流的供水^[30]。径流和泥沙在离开塔里木河上游源流水文站流向干流区间内变化通过计算得出:区间的年平均消耗径流量 98.21 亿 m³,径流深 167.31 mm,淤积泥沙量 4 424.15 万 t,淤积模数 753.69 t/(km²·a)。

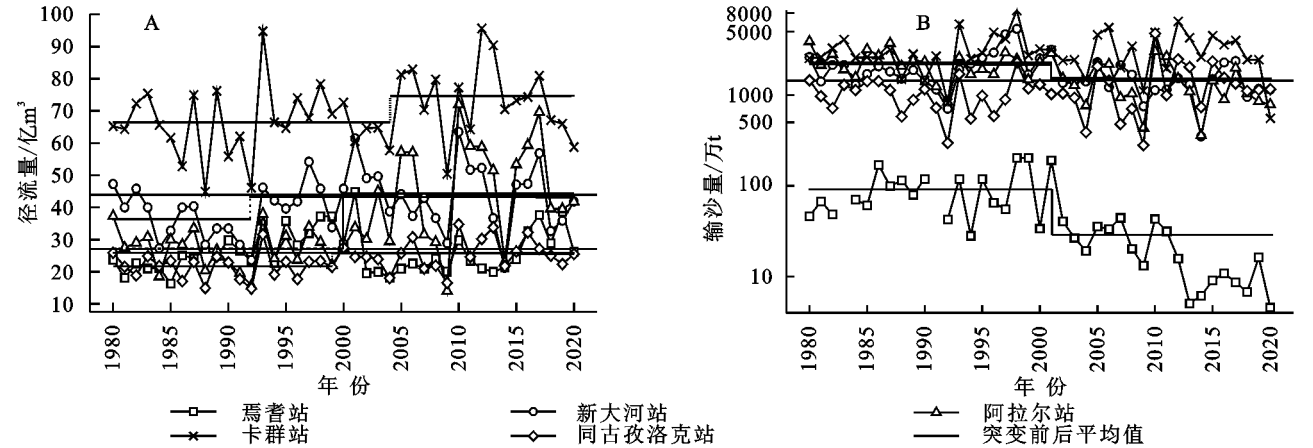


图 3 塔里木河流域各站逐年径流量、输沙量变化及突变点前后的平均值

表 4 塔里木河流域水沙的空间变化特征

水文站控制区	控制面积/ 万 km ²	时间	径流量/ 亿 m ³	径流深/ mm	时间	输沙量/ 万 t	输沙模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)
塔里木河干流阿拉尔站以上	16.66	突变前	27.09	16.26	突变前	2 282.33	136.99
		突变后	43.92	26.36	突变后	1 444.04	86.68
叶尔羌河卡群站以上	5.02	平均	69.18	137.80	平均	3 206.37	638.72
玉龙喀什河同古孜洛克站以上	1.46	突变前	21.54	147.51	突变前	1 235.87	846.48
		突变后	25.44	174.22	突变后	1 514.83	351.47
阿克苏河新大河站以上	4.31	突变前	36.42	84.51	突变前	2 179.62	505.71
		突变后	43.07	99.92	突变后	1 514.83	351.47
阿拉尔站—(卡群站、同古孜洛克站、新大河站)区间	5.87	平均	—98.21	—167.31	平均	—4 424.15	—753.69
开都河焉耆站以上	2.25	突变前	26.24	116.64	突变前	92.04	40.91
		突变后	—	—	突变后	29.17	13.89

4 结论

(1) 1980—2020 年塔里木河源流区新大河站、同古孜洛克站、焉耆站以及干流阿拉尔站年径流量都随时间表现为明显上升趋势,除焉耆站外(无突变点)径流量突变点分别出现在 1992 年、1999 年、2000 年,卡群站年径流量无明显变化趋势。阿拉尔站、新大河站和焉耆站的年输沙量呈显著下降趋势,突变点都出现在 2001 年,卡群站、同古孜洛克站的输沙量变化不显著。

(2) 径流量在突变后均显著增长,阿拉尔站、同

古孜洛克站、新大河站增幅分别为 63.44%,18.81%,19.09%,存在差异的主要原因是流域南部气温上升速度不同和降水是北增南减。阿拉尔站、焉耆站和新大河站的年平均输沙量突变后分别降低 33.68%,66.05%,33.69%,河流的泥沙变化特征响应了其源区的植被与生态变化,干流输沙变化受阿克苏河影响较大。

(3) 塔里木河流域径流深和输沙模数存在显著的空间差异,北部源自天山山区的阿克苏河(新大河站控制区)和开都河(焉耆站控制区)的径流深低于源自南部喀喇昆仑山的叶尔羌河(卡群站控制区)和玉龙喀什河

(同古孜洛克站控制区);上游源流区域的输沙模数大于下游源流开都河,上游源流区是塔里木河干流泥沙主要来源。上游源流在向干流汇入区间内的年平均消耗径流量 98.21 亿 m^3 , 径流深 167.31 mm, 淤积泥沙量 4 424.15 万 t, 淤积模数 $753.69 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

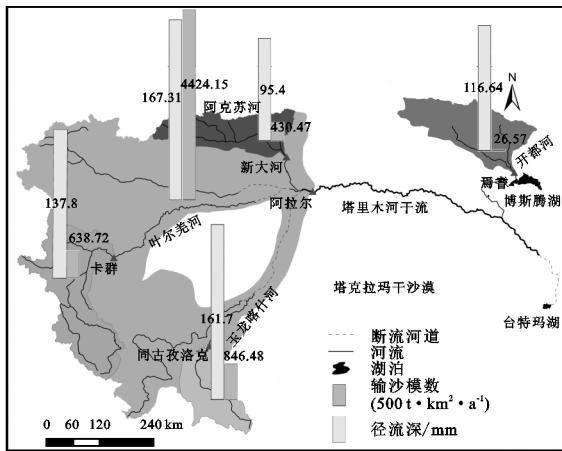


图5 塔里木河流域水沙的空间分布

(4) 本文根据塔里木河“四源一干径”流泥沙实测数据进行了趋势性、突变性、相关性和空间分异性分析,证明了塔里木河近期综合治理工程总体上取得了良好的生态环境效益,建议在保护流域生态环境基础之上,进一步保护源流与干流的河流生态健康,对塔里木河流域进行合理的开发与利用,提高水资源的管理能力和利用效率,实现流域的可持续发展。

参考文献:

- [1] 许全喜,童辉.近50年来长江水沙变化规律研究[J].水文,2012,32(5):38-48.
- [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, 2008,62:187-194.
- [4] 王世江,章曙明,邓铭江等.中国新疆河湖全书[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] Zhang Q, Xu C Y, Tao H, et al. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: A case study of the Tarim River basin, China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2010,24(3):349-358.
- [6] 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[J].第四纪研究,2003(2):152-164.
- [7] 赵万羽,陈亚宁.塔里木河下游断流河道整治引发的生态问题与重建对策分析[J].地理科学,2008,28(4):496-500.
- [8] 王作彬,杨献群,文丽红.叶尔羌河流域水沙时空变化初步分析[J].人民长江,2008(20):58-59,62.
- [9] 张修宇,左其享.变化环境下塔里木河流域径流序列变化特征及成因分析[J].水利水电技术,2013,44(10):6-12.
- [10] 周海鹰,沈明希,陈杰,等.塔里木河流域60a来天然径流变化趋势分析[J].干旱区地理,2018,41(2):221-229.
- [11] Liu Jing, Long Aihua, LI Jiang, et al. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2019,50(12):10-17.
- [12] 郑金丰,陈东风.塔里木河的泥沙及生态环境[J].中国农村水利水电,1996(7):32-33.
- [13] 郭宏伟,徐海量,凌红波.塔里木河流域枯水年生态调水方式及生态补偿研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1705-1717.
- [14] 商莉,庞春华.塔里木河流域“四源一干”河流水沙特性分析[J].新疆水利,2015(4):9-15.
- [15] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [16] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1955,25(1):86-91.
- [17] Pettitt A N. A Non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979,28(2):126-135.
- [18] 周健民.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- [19] 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(3):219-226.
- [20] 刘静,龙爱华,李江,等.近60年塔里木河三源径流演变规律与趋势分析[J].水利水电技术,2019,50(12):10-17.
- [21] 胡文峰,陈玲玲,姚俊强,等.气候变化背景下新疆气温和降水时空演变特征分析[J].阜阳师范学院学报:自然科学版,2020,37(3):90-95.
- [22] 许艾文.近40年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测[D].兰州:兰州大学,2017.
- [23] 王国亚,沈永平,苏宏超,等.1956—2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J].冰川冻土,2008(4):562-568.
- [24] 张志军,颜小华,李华,等.阿克苏河流域绿洲森林景观格局变化及指标分析与评价[J].防护林科技,2020(7):34-37,40.
- [25] 孙天瑶,李雪梅,许民,等.2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J].干旱区地理,2020,43(2):415-424.
- [26] 夏德康.塔里木河干流泥沙运动及河道变迁[J].水文,1998(6):43-48.
- [27] 胡安焱.干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研究:以塔里木河为例[D].西安:长安大学,2003.
- [28] 刘华利.塔里木河上游径流变化特征分析[J].甘肃水利水电技术,2019,55(11):8-11.
- [29] 郑金丰,陈东风.塔里木河的泥沙及生态环境[J].中国农村水利水电,1996,(7):32-33.
- [30] 金庆日.气候变化对塔里木河源流径流近61年的影响分析[J].水资源开发与管理,2020,(6):15-19.