第32卷第2期　　水资源与水工程学报　　Vol.32 No.2
2021年　4月　　Journal of Water Resources & Water Engineering　　Apr.,2021

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.11

和田河流域干流河道耗水过程分析

余其鹰[1]，白云岗[2]，张江辉[2]，曹　彪[2]

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2.新疆水利水电科学研究院，新疆 乌鲁木齐 830049)

摘　要：为缓解和田河流域水资源供需矛盾，提高流域水资源分段管理效益，明晰了和田河水量损失、转化和消耗规律，确定了断面来水量与干流耗水量、河段耗水量与河道损失量之间的关系。利用2006-2018年和田河干、支流各断面地表径流数据，采用Mann-Kendall趋势性检验和水量平衡原理分析了各河段的耗水变化过程。结果表明：地表径流量年际呈上升趋势，年内变化呈“单峰型”，丰水期占比为74%；乌鲁瓦提-喀河渠首段年耗水量最大($16.97\times10^8\ m^3/a$)，玉河渠首-艾格利牙段年耗水量最小($2.81\times10^8\ m^3/a$)，总耗水量与来水量变化趋势一致；喀河渠首-吐直鲁克、玉河渠首-艾格利牙、吐(加)艾-肖塔段河损量与耗水量存在着显著的正相关关系，其中和田河干流河损量最大；玉龙喀什河和喀拉喀什河下游是河损防治的重点，和田河沙漠段是巨大挑战。不同来水量情况下的河段耗水量、不同耗水量与河损量之间变化规律的研究可为和田河流域水资源规划及合理调度提供理论依据。

关键词：径流量变化；M-K检验；河道损失水量；河道耗水量；水量平衡；和田河流域

中图分类号：TV121$^+$.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2021)02-0073-08

Analysis of water consumption process in the main stream of Hotan River Basin

YU Qiying[1], BAI Yungang[2], ZHANG Jianghui[2], CAO Biao[2]

(1. *College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*;
2. *Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi* 830049, *China*)

Abstract: In order to alleviate the contradiction between water supply and demand in the Hotan River, and to improve the water resources management of the river basin, we studied the law of the water loss, water transformation and water consumption of the basin to quantitatively ascertain the internal relationship between the water inflow from the sections and water consumption of the main stream, as well as the water consumption of each section and the water loss of the river channel. Based on the surface runoff data of each section of the main stream and tributaries of the Hotan River Basin from 2006 to 2018, the Mann-Kendall trend analysis and the principle of water balance were used to analyze the water consumption change process of each river section. The results showed that the interannual surface runoff showed an upward trend, whereas the change during the year showed a “single peak”, and the wet season accounted for 74%. The first section of Uluwati-Ka River canal consumed the most water($16.97\times10^8\ m^3/a$), and the Yuhe Canal Head-Aigliya consumed the least water($2.81\times10^8\ m^3/a$). The total water consumption was consistent with the change trend of the water inflow. The river loss is significantly positively correlated with the water consumption in each river section, among which the main stream of the Hotan River had the largest water loss. It is concluded that the downstream of Yulong Kashi River and Kara Kashi River are the focus areas of river damage prevention and control, whereas the desert section of Hotan River presents a huge challenge for the task. The study of the water consumption of the river sections under different water inflow conditions, and the difference between water consumption and river water loss can provide technical support for the allocation and planning of water resources in Hotan Basin.

收稿日期：2020-07-11；　**修回日期**：2020-10-22
基金项目：新疆塔管局科技计划项目(TGJHTJJG-2018KYXM0001)
作者简介：余其鹰(1994-)，男，四川茂县人，硕士研究生，研究方向为水文水资源。
通讯作者：白云岗(1974-)，男，新疆奇台人，博士，教授级高级工程师，主要从事农业节水方面的研究。

Key words: runoff change; M－K test; river water loss; river water consumption; water balance; Hotan River Basin

1 研究背景

全球气候变化背景下，极端水文灾害频发，新疆干旱区水资源年内分布变率较大，丰水期洪涝灾害严重，枯水期水资源短缺问题日益突出[1－2]。人们为了社会经济增长，极度开采地表、地下水资源，忽略了用水过程中产生的损失，使水资源供需矛盾更加尖锐[3]。河道损失是指水在河道传输过程中产生的损失，分析流域内水流传播中不同河段、不同流速在河道中产生的损失是水量平衡计算的重要部分，可为流域科学规划、精细调度水资源提供理论依据[4]。和田河是新疆和田地区各族人民赖以生存的母亲河，以水源降水和冰川融水补给为主[5]，由于和田河流域蒸发量大、降水少、河道较宽，使得和田河“来水－引水－退水”过程中天然蒸发和渗漏损失巨大，产生了季节性来水量减少、河道断流、地下水位下降等生态问题[6]。有限的水资源造成了生产建设用水和生态用水之间的矛盾、不同季节不同作物用水之间的矛盾、“和田绿洲”用水和塔里木河流域用水之间的矛盾[7]。

水资源合理分配、科学配置一直是水资源管理部门的重要目标。蒸散发是干旱区水资源消耗的主要形式，国内外学者针对蒸散发已进行了广泛研究，如杨扬等[8]利用遥感经验模型估算了半干旱区陆面蒸发量；许敏等[9]基于 MODIS 和 ERA－Interim 对安徽省地表蒸散发及其受植被覆盖度的影响，发现地表 *ET* 呈南高北低趋势，植被覆盖度与 *ET* 逐月相关系数为 0.85；Adnan 等[10]发现巴基斯坦区域 *ET* 在冬季时对水汽压更为敏感，夏季对风速更为敏感；蒋春宇等[11]运用 CRAE 模型和水量平衡方程验证了 CRAE 模型在和田地区具有良好的实用性。新疆干旱地区水资源运移过程产生的蒸散发是水文循环的主要过程，王杰等[6]根据和田河流域水文站实测资料，分别计算 3 种工况下的自上游控制站至下游肖塔站的河道水量损失率，分析河道损失的原因，其结果对和田河流域水资源开发和管理有一定价值；雷雨等[12]利用塔里木河断面地表径流数据分析各河段耗水过程，明晰了塔里木河流域干流河道损失水量组成、去向以及变化规律，为流域水资源分段管理以及科学调度提供了理论依据。众多学者利用不同方法对不同地区蒸散发进行了相关研究，但针对和田地区河道水量耗散特征尚无定论。当前，和田河流域存在灌区毛引水量较大，实际灌溉用水量远小于引水量，以及灌区毛引水量小、无降水情况下到达田间用水量超过实际引水量的问题，两种极端问题给当地河道管理工作造成巨大困扰。

因此，为了使和田市水资源管理部门摸清水量损失的组成、转化及消耗规律，本文根据 2006－2018 年和田河流域主要干支流河段引水和退水等资料，定量研究各河段来水与耗水的相关关系，定性研究河道耗水与河损之间的关系，为缓解和田地区水资源供给紧张状况及科学管理提供依据。

2 研究区概况

和田河流域位于塔里木盆地南缘，地理位置介于东经 77°25′～81°43′、北纬 34°52′～40°28′，流域总面积 48 870 km^2，流域东邻克里雅河流域，南以昆仑山、喀拉昆仑山及克什米尔与我国西藏为界，西与叶尔羌河流域接壤，北为塔里木盆地南部边缘[13]。和田河源流分为东西二支，东支为玉龙喀什河（简称玉河），西支为喀拉喀什河（简称喀河）。玉河全长 513 km，喀河全长 808 km，两河在阔什拉什汇合，两河汇合口至肖夹克段称为和田河（见图 1），和田河最终在肖塔站下游 10 km 处汇入塔里木河，玉河和喀河的多年平均径流量分别为 22.19×10^8、21.48×10^8 m^3。和田河流域目前建有 9 个水文站，玉河水文站包括黑山、同古孜洛克、玉河渠首和艾格利牙；喀河水文站包括托满、喀河渠首、乌鲁瓦提和吐直鲁克；和田干流下游建有肖塔水文站。由于黑山和托满水文站位于出山口以上，仅用于每年 6－9 月测量汛期洪水量，本文不做研究。本文拟研究的水文站点位置和基本信息见图 1 和表 1。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

水文站的逐日径流数据由和田地区水文局提供。各河段的灌溉及生态引水、退水数据资料由塔里木河流域和田管理局提供。由于吐直鲁克和艾格利牙两个关键水文站于 2006 年建成，为保证研究时段同步性，本文研究时段选择 2006－2018 年。

3.2 研究方法

3.2.1 Mann－Kendall 趋势检验 Mann－Kendall 检验法是世界气象组织推荐并广泛用于研究水文和气候长时间序列的非参数检验方法，具有结果受少数异

常值干扰小、能显示数据显著突出和突变的优点,因此得到了广泛应用[14-15]。本文利用 Mann - Kendall 统计值 Z 进行地表径流显著性检验,检验时假设该序列无趋势。通过双尾检验,在给定显著水平下,由正态分布表中查临界值 $Z_{1-\alpha/2}$,若 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时,则接受原假设,即趋势不显著;若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,则拒绝原假设,即趋势显著。$Z > 0$ 表示地表径流量呈上升趋势,$Z < 0$ 表示地表径流量呈下降趋势,Z 的绝对值越大,说明地表径流量变化趋势越显著。

3.2.2　河道耗水量计算　水量平衡原理是质量守恒定律在水循环中特定的表现形式,由水量平衡方程表示。水量平衡方程中的各项资料随研究区的不同而变化[16]。在某段时间,某研究区河道水量平衡可由公式(1)、(2) 表示。

$$W_{耗} = W_{经济} + W_{生态} + W_{河损} \tag{1}$$

式中:$W_{耗}$ 为河段总耗水量,$10^8\ m^3$;$W_{经济}$ 为国民经济引水量,$10^8\ m^3$;$W_{生态}$ 为生态灌溉引水量,$10^8\ m^3$;$W_{河损}$ 为河道损失水量,$10^8\ m^3$,包括河道渗漏、蒸发、漫溢和地下回归水量,简称“河损”。

$$W_{河损} = W_{来水} - W_{引水} + W_{退水} - W_{下泄} \tag{2}$$

式中:$W_{来水}$ 为上游断面实际来水量,$10^8\ m^3$;$W_{引水}$ 为引水量,$10^8\ m^3$;$W_{退水}$ 为退水量,$10^8\ m^3$;$W_{下泄}$ 为下游断面下泄水量,$10^8\ m^3$。

某河段单位河长河道损失水量和河损率计算如公式(3)、(4)。

$$W_{单位河长河损} = W_{河损}/L \tag{3}$$

$$K = W_{河损}/W_{来水} \tag{4}$$

式中:$W_{单位河长河损}$ 为某河段单位河长的河道损失水量,$10^8\ m^3$;L 为某河段的河长,km;K 为某河段河道的损失率,%。

4　结果与分析

4.1　和田河流域地表径流量变化特点

4.1.1　干流地表径流量年际变化趋势　由于源流自出山口后年际灌溉引水、水库蓄水和生活用水水量不确定,逐年用水量变化过程年际差异很大。对 5 个主要水文站 2006 - 2018 年的径流实测数据进行分析,径流量年际变化 Mann - Kendall 单调趋势检验如表 2 所示。乌鲁瓦提、同古孜洛克为出山口水文站,来水量基本不受人为干扰,年际间平均径流量相差不大,吐直鲁克和艾格利牙在上游水文站来水相当的情况下,两河平均年径流量相差约 $10 \times 10^8\ m^3$,表明喀拉喀什河(以下称喀河)流域总耗水量远大于玉龙喀什河(以下称玉河)流域。乌鲁瓦提水文站 $Z < 0$,年径流量呈微弱递减趋势,同古孜洛克、吐直鲁克、艾格利牙和肖塔站 Z 均大于 0 且小于 1.96($\alpha = 0.05$),故年径流量均表现为微弱递增趋势。

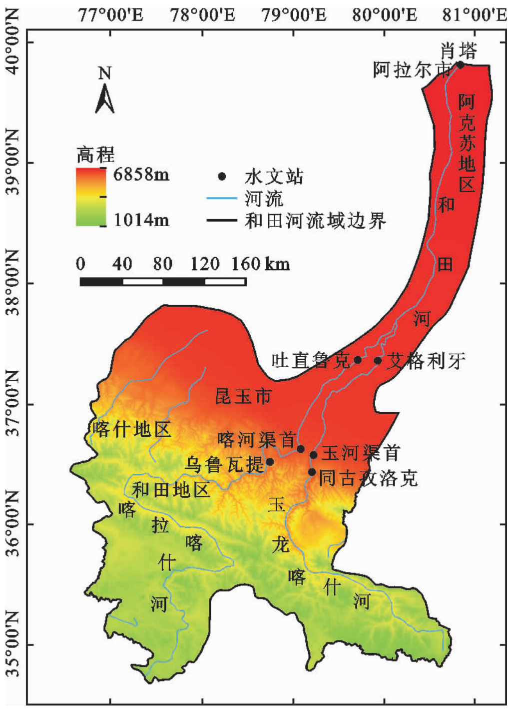

图 1　和田河流域概况及水文站分布

表 1　拟研究的和田河流域各水文站特征值

河 名	水文站	地理位置		集水面积/km²	距上站河长/km
		东经	北纬		
玉龙喀什河	同古孜洛克	79°22′	36°25′	14575	0
	玉河渠首	79°23′	36°36′	14696	12
	艾格利牙	79°56′	37°28′	14946	90
喀拉喀什河	乌鲁瓦提	78°46′	36°29′	19983	0
	喀河渠首	79°06′	36°41′	21497	58
	吐直鲁克	79°42′	37°27′	23331	115
和田河	肖塔	80°52′	39°51′	48938	319

表 2　2006 - 2018 年和田河流域年径流量 M - K 单调趋势检验

水文站	平均年径流量/$10^8\ m^3$	统计量 Z 值	显著性水平	趋势
乌鲁瓦提	25.05	-0.30	不显著	微递减
同古孜洛克	26.35	0.75	不显著	微递增
吐直鲁克	4.29	1.71	不显著	微递增
艾格利牙	14.30	0.21	不显著	微递增
肖塔	12.76	1.30	不显著	微递增

4.1.2 干流地表径流量年内趋势变化 和田河出山口两水文站与肖塔站距离相差不大,其发源地、径流量、冰川类型、气候条件、下垫面等情况基本相同[17-18],故将出山口水文站流量相加作为上游来水量,以此来判定年内月径流量的变化特征。逐月径流量和 Z 统计量分析结果见表3和图2。

表3 2006-2018年和田河流域月平均径流量及其变化趋势

季节	月份	月均径流量/$10^8 m^3$	统计量 Z
春季	3	1.26	-0.92
	4	1.81	-0.67
	5	3.36	-1.28
夏季	6	6.27	-1.10
	7	13.90	0.67
	8	14.45	1.04
秋季	9	5.09	1.16
	10	2.26	0.31
	11	1.82	0.06
冬季	12	1.76	0.43
	1	0.82	-2.14
	2	0.82	-1.95

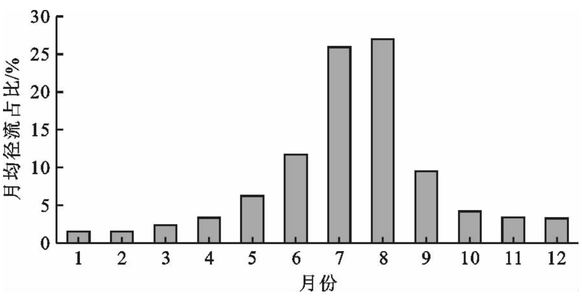

图2 和田河流域各月平均径流量占年径流量的比例

由表3可以看出,统计时间内1-6月统计量 Z 小于0,月径流量表现为减小趋势,其中1月统计量 Z 值小于-1.96,表现为显著减小趋势;7-12月径流量表现为微弱增大趋势,其中8、9月增大趋势强于其他月份。综合来看,夏秋两季径流量最大,且径流量表现为增大趋势;年内径流量在8月达到峰值,逐月径流量变化幅度较大,这主要是由于源流区受气温和降水以及部分人类活动的共同影响,所以各月份径流量的关联性较弱。

由图2可以看出,山口的月径流量呈“单峰型”,和田河源流属于季节性河流,四季径流量占比分别为12%、65%、17%、6%,丰水期主要集中在6-9月,占全年径流量的74%,4-10月农作物灌溉和生态输水占年径流量的88%,1-2月最少,仅占4%。和田河流域径流量大小主要与气温密切相关,春季、冬季气温较低,所以径流量占比分别为12%、6%。夏季温度升高,冰川积雪融化加快,降水量相对增加,径流量也随之增大。由于夏、秋两季来水量较多,所以绿洲区适宜种植夏、秋两季需水量较大的农作物。

4.2 河道耗水过程分析

河道耗水主要指河道损失和河道引水之和。其中,河道损失是指水运移过程中蒸发、渗漏和漫溢水量之和;河道引水是指用于生产建设、农田灌溉和生态灌溉的总引水量。

4.2.1 各河段耗水量特征 根据水量平衡原理,结合2006-2018年和田河河道7个水文站实测径流数据,分别计算各河段耗水量,各河段耗水特征如表4所示。

表4 2006-2018年和田河干流各河段年均耗水量特征

河段	控制河长/km	耗水量/$10^8 m^3$	耗水量占比/%
乌鲁瓦提-喀河渠首	58	16.97	28
喀河渠首-吐直鲁克	115	6.16	6
同古孜洛克-玉河渠首	12	9.82	15
玉河渠首-艾格利牙	90	2.81	2
吐直鲁克、艾格利牙-肖塔	319	5.83	11
合计	492	41.59	62

分析表4可知,和田河流域主要耗水集中在乌鲁瓦提-喀河渠首、同古孜洛克-玉河渠首段,分别占天然来水量的28%、15%,其次为吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段,耗水量占比为11%。总的来看,喀河段的耗水占比为玉河段的2倍,其主要原因是“和田绿洲”喀河控制绿洲面积更大,农田灌溉引水大,渠道长,但河损量也随之增加;吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段河段为319 km,其主要耗水为生态输水和蒸发渗漏。

4.2.2 各河段逐年耗水量特点 利用2006-2018年和田河流域5个断面逐年来水量、引水量、退水量计算各断面耗水量及其占总耗水量的比例,结果如图3、4所示。

由图3可计算出和田河年耗水量与天然来水量均值分别为 39.22×10^8、$51.39\times10^8\ m^3$,理论值能满足塔里木河 $9.7\times10^8\ m^3$ 的下泄目标[19],各河段最大耗水量(2010年)与最小耗水量(2017年)的差值约为 $13\times10^8\ m^3$,河段耗水量与天然来水量变化

趋势基本一致。

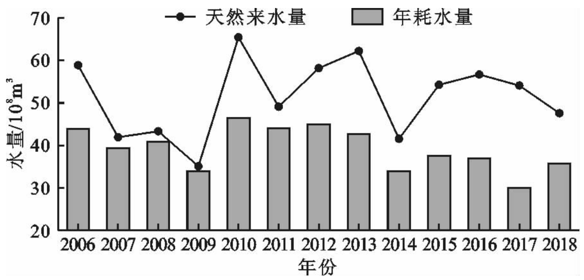

图 3　2006－2018 和田河流域年耗水量

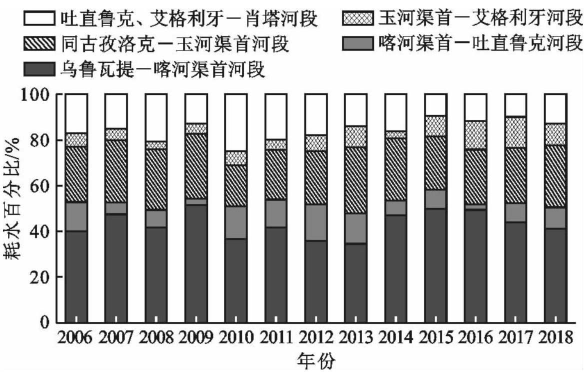

图 4　2006－2018 年和田河流域各河段耗水占比

由图 4 可知,喀河段、玉河段平均耗水量分别占总耗水量的 52%、32%;乌鲁瓦提－喀河渠首段平均耗水占比最大,为 44%,同古孜洛克－玉河渠首段平均耗水量占比为 24%,两河段耗水量变化趋势基本一致;喀河渠首－吐直鲁克段耗水占比年际差异变化较大,最低耗水量占比与最高耗水量占比相差 14%,其中 2009、2016 年耗水占比最低,分别为 3%、2%;玉河渠首－艾格利牙河段平均耗水量占比为 14%,其中 2017 年耗水量占比最大,高出均值 7%;干流吐直鲁克、艾格利牙－肖塔段为沙漠段,几乎没有农田灌溉,耗水主要用于生态输水以及河道渗漏和蒸发,该河段平均耗水量占比为 10%,耗水量占比与总耗水量趋势一致。总体上看,乌鲁瓦提－喀河渠首与同古孜洛克－玉河渠首段引水量较大,是因为两段河流滋养着和田绿洲 170×10^4 人口,供给 $903 \times 10^4\ hm^2$ 农田灌溉用水。

4.2.3　断面来水量与河段耗水量的关系　河段耗水量取决于断面来水量的大小,为明晰和田河流域各河段来水与耗水的相关关系,将各河段耗水量与上游断面来水量进行数据拟合,结果如图 5 所示。

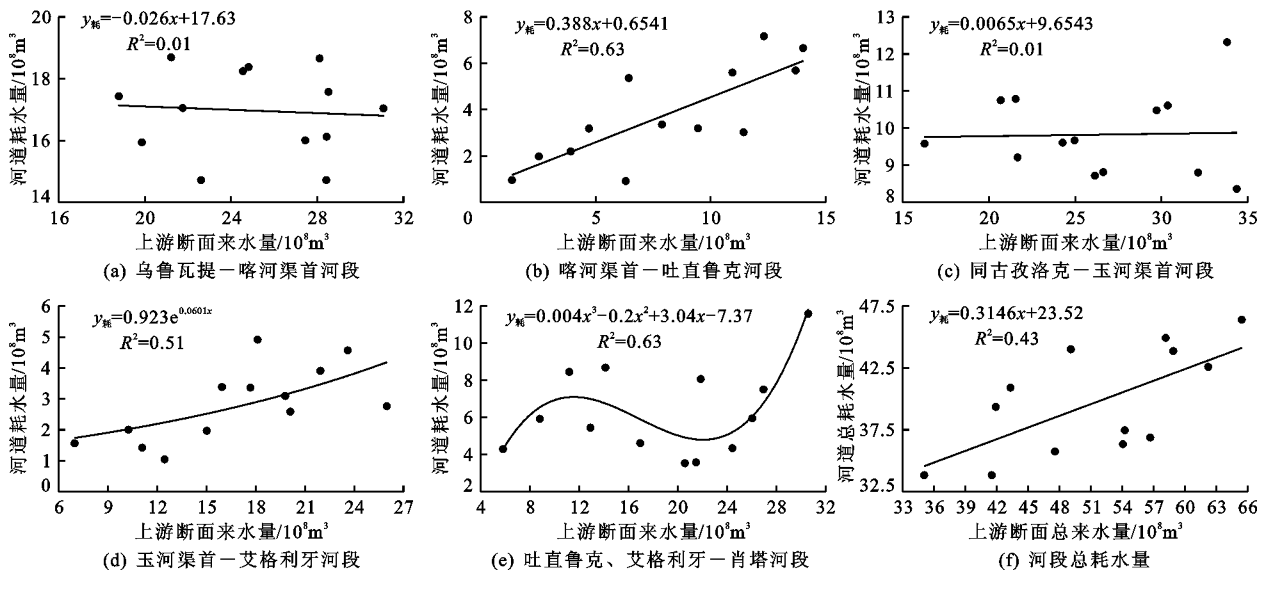

图 5　和田河流域各河段耗水量与上游断面来水量关系曲线

由图 5 可看出,在和田河流域 5 个河段中,乌鲁瓦提－喀河渠首河段(图 5(a))和同古孜洛克－玉河渠首河段(图 5(c))的来水量与耗水量基本无相关性,其余 3 个河段相关性较好,且通过 0.05 的显著检验。图 5(a)、5(c)所示河段为流域来水量及耗水量最大的河段,由于受气候和水利枢纽的影响,其上游来水径流量极不稳定,河段耗水量不受上游断面来水量的影响,最大耗水量和最小耗水量相差 $4.00 \times 10^8\ m^3$,多年平均耗水量分别为 16.96×10^8、$9.80 \times 10^8\ m^3$。图 5(b)、5(d)所示河段为绿洲下游段,拟合曲线表明耗水量随着来水量的增加而增加,因此这两个河段可以用断面来水量来推算耗水量。图 5(e)表明该河段来水量与河道耗水量呈显著 3 次函数关系。当来水量小于 $12 \times 10^8\ m^3$ 时,耗水量随着来水量的增加而增加;当来水量大于 $12 \times 10^8\ m^3$ 且小于 $22 \times 10^8\ m^3$ 时,耗水量随着来水量的增加

而出现减少的趋势;当来水量超过 $22\times10^8\ m^3$ 时,耗水量又随之增加,说明上游断面来水约为 $20\times10^8\ m^3$ 时的输水效率最高。吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段属于沙漠段,河道呈“游荡型”,河道中分布着大量小岛状沙洲,径流量丰枯悬殊,使得河床易冲易淤,当断面流量小于蒸发量时,河道出现断流,水量不能到达下游肖塔站;流量较大时,河道积水面积变宽,蒸发量增大,加之河道较浅,由此引发严重的漫溢损失和侧向渗漏,水量亦不能到达下游肖塔断面。图5(f)表明出山口总来水量与河段总耗水量呈正相关关系,流域耗水量随来水量的增加而增加,说明可用天然来水量推算流域耗水量。

4.3 河道水量损耗分析

水量在河道运移过程中会产生大量自然损失,不同下垫面、不同河段将产生不同程度的损耗,如农田引水灌溉渗漏、水量过大引起的漫溢、蒸发损失等,同时雨季低洼处地下水补给产生负损耗使得河段引水量和实际用水量之间存在较大差异。所以为满足灌区需水量及下泄水量目标,需细化分析和田河流域各河段不同时间尺度的水量损失规律。

4.3.1 干流各河段河损规律分析 基于水量平衡法,2006-2018年和田河流域各河段河道损失特征如表5所示。由表5可见,和田河流域多年平均河损量为 $15.25\times10^8\ m^3$,单位河长平均河损为 $0.03\times10^8\ m^3/km$。其中吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段河损量最大,河损量为 $6.34\times10^8\ m^3$;喀河渠首-吐直鲁克段次之,河损量为 $3.07\times10^8\ m^3$;同古孜洛克-玉河渠首段距离短,河损量最小。从单位河长河损来看,同古孜洛克-玉河渠首段的河损最大,达到 $0.13\times10^8\ m^3/km$;乌鲁瓦提-喀河渠首段为 $0.03\times10^8\ m^3/km$;其他河段单位河长河损均为 $0.02\times10^8\ m^3/km$。综合各河段特点,同古孜洛克-玉河渠首段位于玉河出山口段,河道纵坡大,距离短,河槽条件好,河损量基本不随来水量的增加而增加,河损量稳定,但单位河长河损最大;吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段为沙漠段,河道呈宽浅形,沿岸生长着茂密的胡杨林阻止沙漠合拢[20],且有护林工作人员在6-9月汛期开展生态林引水灌溉,水量主要用于补给地下水和植物蒸散发,因该段河道较长,故单位河长河损量较小。

4.3.2 逐年河损特点分析 喀河和玉河各河段逐年河损量及河损量占比如图6所示(因吐直鲁克、艾格利牙-肖塔段无水文站,故将河道耗水视为河损量,此处不做分析)。由图6可知,各年份喀河渠首-吐直鲁克段河损量普遍大于其他河段,最大河损量为 $6.35\times10^8\ m^3$(2010年),最小河损量为 $0.50\times10^8\ m^3$(2016年),河损占比平均值为32%;乌鲁瓦提-喀河渠首段河损量次之,平均河损量为 $2.29\times10^8\ m^3$,其中2018年河损量最小,仅为 $0.17\times10^8\ m^3$,河损占比平均值为26%;同古孜洛克-玉河渠首、玉河渠首-艾格利牙河段隶属玉河,两河段平均河损量均为 $2.6\times10^8\ m^3$,其中2013年两河段总河损量最大,河损占比分别为32%、23%。总体上看,耗水量与河损量呈正相关;2012年喀河和玉河的总河损量最大,为 $13.71\times10^8\ m^3$,2009年河损量最小,为 $4.0\times10^8\ m^3$;2018年同古孜洛克-玉河渠首段河损量为负值,主要原因是2017-2018年连续两年处于丰水年,喀河沿岸灌溉生产引水大,将过剩水量排入玉龙喀什河同古孜洛克-玉河渠首段,退水量大于引水量,故河损量小于零。

4.3.3 河段耗水量与河损量的关系 为探究河段耗水量与河损量之间的相关关系,明晰不同耗水尺度下的河道损失,将喀河和玉河各河段年河损量与耗水量进行拟合,结果见图7。由图7可知,各河段河损量与耗水量存在正相关关系,且通过0.05的显著检验,其中喀河渠首-吐直鲁克、玉河渠首-艾格利牙河段的拟合精度最高,这表明可利用耗水量推算河损量。

表5 2006-2018年和田河流域各河段多年平均河损量特征值

河段	控制河长/km	河损量/$10^8\ m^3$	河损率/%	单位河长河损/$10^8(m^3\cdot km^{-1})$
乌鲁瓦提-喀河渠首	58	2.29	9	0.03
喀河渠首-吐直鲁克	115	3.07	30	0.02
同古孜洛克-玉河渠首	12	1.56	6	0.13
玉河渠首-艾格利牙	90	1.99	12	0.02
吐直鲁克、艾格利牙-肖塔	319	6.34	34	0.02
合计	594	15.25		

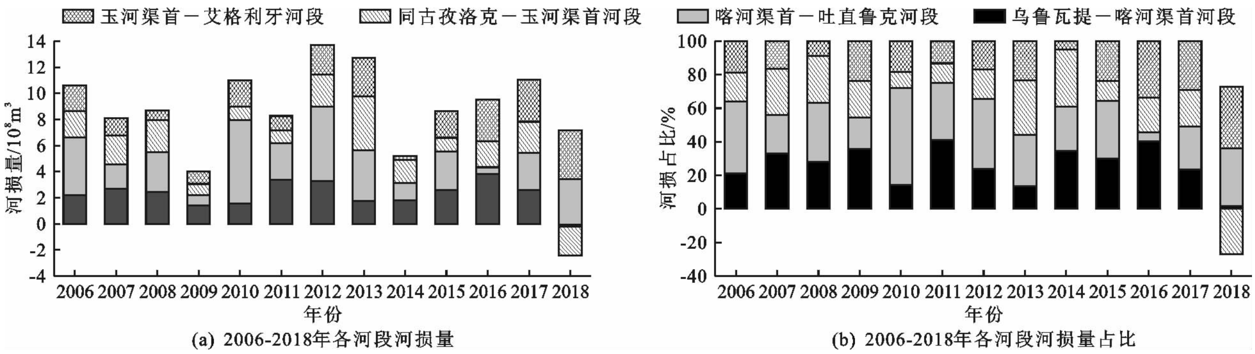

图 6　2006 – 2018 年和田河流域喀河和玉河各河段河损量及其占比

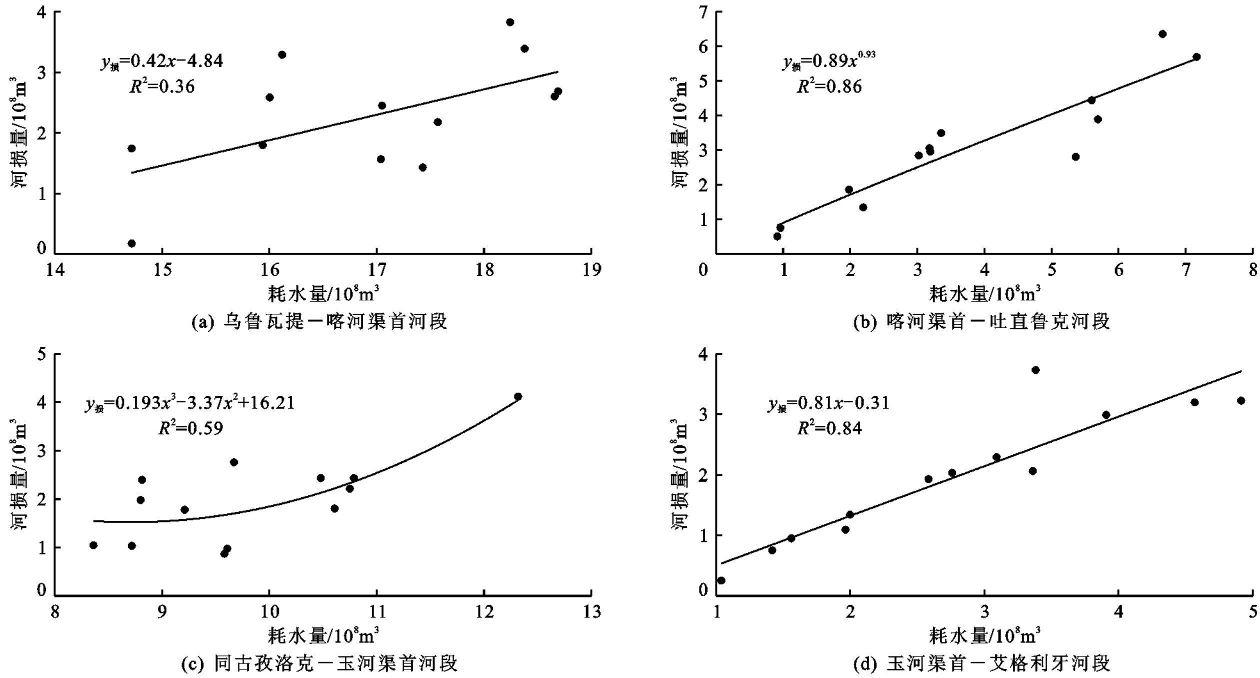

图 7　喀河和玉河各河段耗水量与河损量关系曲线

5　结论与建议

根据和田河流域 2006 – 2018 年实测数据,通过分析源流区年内和年际径流量变化、断面来水量与河段耗水量的关系、河段耗水量与河损量的关系得出以下结论:

(1)年际间地表径流量除乌鲁瓦提水文站外,其他水文站均表现为微弱增大趋势;年内地表月径流量呈“单峰型”,夏秋两季径流呈增大趋势,6 – 9 月丰水期径流量占全年总径流量 74%。和田河流域易发生旱涝交替出现的自然灾害。

(2)乌鲁瓦提 – 喀河渠首段年均耗水量最大,为 $16.97 \times 10^8\ m^3/a$,耗水占比为 28%,玉河渠首 – 艾格利牙年均耗水量最小,为 $2.81 \times 10^8\ m^3/a$,耗水占比为 2%,5 个河段总耗水量随着来水量的增加而增加,但逐段耗水量与上断面来水量相关性较差。

(3)和田河流域多年平均河损量与耗水量存在显著正相关关系,多年平均河损量为 $15.25 \times 10^8\ m^3$,单位河长平均河损为 $0.03 \times 10^8\ m^3/km$,和田河干流独特的地形及气候条件使吐直鲁克、艾格利牙 – 肖塔段河段的河损量最大,达到 $6.34 \times 10^8\ m^3$。

(4)玉龙喀什河和喀拉喀什河天然来水量相差不大,由于乌鲁瓦提水利枢纽汛期蓄水错峰,枯水期下泄调节水量起到了防洪抗旱作用,所以喀拉喀什河径流量年内变化幅度相对较小;同时,喀拉喀什河年均耗水量高于玉龙喀什河 $14.49 \times 10^8\ m^3$,年均河损量高于玉龙喀什河 $1.81 \times 10^8\ m^3$,故和田河流域水资源规划治理的重点应为喀拉喀什河。

(5)喀河渠首 – 吐直鲁克和玉河渠首 – 艾格利牙河段的年均河损量合计为 $5.1 \times 10^8\ m^3$,河损量较大,且河道缺乏输水、挡水建筑物,建议修建河床整治建筑物。

参考文献：

[1] JEFFERSON M. IPCC fifth assessment synthesis report: “Climate change 2014: Longer report”: Critical analysis [J]. Technological Forecasting & Social Change, 2015, 92:362-363.

[2] MEYBECK M. Global analysis of river systems: From earth system controls to Anthropocene syndromes [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2003, 358(1440): 1935-1955.

[3] 李冰瑶,陈 星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(6):104-108.

[4] 陈亚宁,杜 强,陈跃斌,等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京:科学出版社,2013.

[5] 吕继强,张晓伟,沈 冰,等. 和田河年径流序列变化特征及驱动因素分析[J]. 水力发电学报, 2010,29(5):165-169.

[6] 王 杰,王 俊,孙 鑫. 和田河流域水量沿程变化分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):142-148.

[7] 高 云,郭维华. 和田河典型站点径流及气象因子变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(2):87-92.

[8] 杨 扬,王丽娟,岳 平,等. 利用陆面模式和遥感经验模型估算半干旱区陆面蒸散量[J]. 水土保持研究, 2020,27(5):147-153+159.

[9] 许 敏,江 鹏. 基于 MODIS 和 ERA-Interim 的安徽省地表蒸散发及其受植被覆盖度影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):253-260.

[10] ADNAN S, ULLAH K, AHMED R. Variability in meteorological parameters and their impact on evapotranspiration in a humid zone of Pakistan[J]. Meteorological Applications, 2019,27(5):e1859.

[11] 蒋春宇,黄领梅,沈 冰,等. CRAE 模型在新疆和田绿洲的适用性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(2):51-54.

[12] 雷 雨,李 江. 塔里木河干流上中游河道耗水过程分析[J]. 水利水电技术,2019,50(4):55-63.

[13] 新疆和田河流域水资源利用初步规划[R]. 新疆:新疆水利水电勘测设计研究院,2011.

[14] 晁智龙. 1959-2011 年北洛河上游流域径流量及其组分变化趋势和时间分配特征[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):23-28.

[15] 薛嵩嵩,高 凡,何 兵. 径流序列变异诊断的近似熵与样本熵法对比研究——以新疆叶尔羌河为例[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):24-29.

[16] 刘方平,汪文超,邓海龙,等. 鄱阳湖流域典型稻田水量平衡分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):100-103.

[17] 董弟文,阿布都热合曼·哈力克,王大伟,等. 近 60 年和田河源流区径流特征及对气候变化的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(6):536-543.

[18] 周晓曦,阿布都热合曼·哈力克. 气候变化对和田河径流的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2017(3):21-25.

[19] 秦胜英,黄领梅,沈 冰,等. 新疆和田河径流损失辨析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):85-88.

[20] 邓铭江,杨鹏年,周海鹰,等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017,34(4):717-726.

(上接第 72 页)

[24] CAO Yin, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Remote sensing of water quality based on HJ-1A HSI imagery with modified discrete binary particle swarm optimization-partial least squares (MDBPSO-PLS) in inland waters: A case in Weishan Lake [J]. Ecological Informatics, 2018, 44: 21-32.

[25] GAO Yongnian, LI Qin, WANG shuangshuang, et al. Adaptive neural network based on segmented particle swarm optimization for remote-sensing estimations of vegetation biomass [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 211: 248-260.

[26] LAL A M, ANOUNCIA S M. Modernizing the multi-temporal multispectral remotely sensed image change detection for global maxima through binary particle swarm optimization[J]. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2018.

[27] JIA Kai, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Spectral matching based on discrete particle swarm optimization: A new method for terrestrial water body extraction using multi-temporal Landsat 8 images[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 1-18.

[28] 郭子扬,李畅游,史小红,等. 呼伦湖冰封期 N、P 时空分布及富营养化特征[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 1180-1189.

[29] 姜忠峰,李畅游,张 生,等. 呼伦湖浮游植物调查与营养状况评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 726-732.

[30] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 105-115.

[31] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 161: 89-106.

[32] HU Chuanming. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10):2118-2129.