

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.003

人类活动影响下的干旱区河流地貌演变 ——以塔里木河为例

余国安¹, 李志威^{2,3}, 黄河清¹, 刘晓芳¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 全球范围内干旱区河流正日益受到高强度人类活动的扰动, 但较少研究报道这种扰动对河流地貌过程的影响。采用历史文献、水文数据和遥感影像相结合的方式, 详细分析了人类活动影响下中国最大内陆河塔里木河(简称塔河)的河流地貌变化过程。结果表明: 塔河流域人类活动的规模和强度日趋上升, 对河流水沙过程和地貌形态等影响显著。近50年来, 塔河干流低流量过程发生频率呈显著上升趋势, 而中、高流量过程则呈降低趋势, 河道径流和输沙量减少显著。塔河干流上游现为游荡河道, 冲淤变化剧烈且总体处于淤积抬升状态, 但河道平均河宽呈减小趋势, 可能是因为塔河两岸冲积平原的开垦和河岸加固。塔河中游弯曲河道蜿蜒系数在近几十年呈缓慢上升趋势, 但明显低于废弃古河道。

关键词: 水沙过程; 河流地貌; 人类活动; 干旱区河流; 塔里木河

中图分类号: P931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)02-0183-10

全球范围内干旱区面积约占陆地总面积的40%^[1], 承载了日益上升的人口和环境压力^[2]。就中国而言, 干旱区面积约占全国陆地面积的1/4^[3], 是陆地表层的重要组成部分。水是干旱区自然生态系统和人类社会赖以存在的核心制约要素。干旱区水系构成及河流地貌演变通常决定区域水资源的输送和分布, 进而决定依存于水资源输送和分布而形成的自然生态系统和人工绿洲。因而, 干旱区河流对干旱区生态环境和经济社会发展的重要性不言而喻, 要认识干旱区的地貌环境演变, 就需要理解这一区域的河流地貌特征及过程。

人类活动对河流地貌过程甚至河网水系构成具有十分重要的影响, 但目前为止大量的研究集中于湿润区的河流^[4-10]。随着人类活动的触角由湿润半湿润区向干旱半干旱区加速延伸, 干旱区河流正在或即将面临各种各样人类活动的扰动(如土地开垦、径流调节和引水灌溉等), 其河流水文和地貌过程不可避免受到影响。例如, 由于人类引种外来物种(柽柳)和径流调节, 美国西南部干旱区的河流水文和地貌过程发生显著变化, 河道平面形态由辫状变为蜿蜒, 甚至引起河流改道^[11-14]; 澳大利亚穆雷河及巴旺-达令河流域人类活动对径流过程和水文特性的影响^[15-16]; 美国西南部地区城市化进程对当地季节性河流地貌过程的影响^[17-18]等。基本上, 绝大多数有关干旱区河流地貌研究的对象为季节性河流, 其空间尺度规模较小(一般几十到几百平方公里), 且在水文特征上属于内源河(其径流和输沙主要受当地降雨过程影响), 而对空间规模较大(几千平方公里以上)的干旱区外源常流河地貌过程的研究则较少开展。

塔里木河(简称塔河)是中国流程最长的内陆河, 也是一条典型的外源、常流河, 流经极为干旱的塔里木盆地。与很多干旱区河流面临的情况相似, 塔河正受到高强度人类活动的扰动。尽管已有不少成果报道人类活动对塔河流域生态、环境、气候和水文等的影响^[19-23], 但针对河流地貌演变的研究还较少, 目前相关的成果如塔河的河道变迁、河床演变、河型空间分布等主要关注自然条件下的河流地貌特征及其过程^[24-30], 尚缺乏对人类活动影响下河流地貌变化的系统分析。因此, 本文在简要总结历史上塔河流域人类活动的基础

收稿日期: 2016-07-05; 网络出版时间: 2017-02-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170221.1127.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41571009; 41330751)

作者简介: 余国安(1978—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 主要从事河流地貌和河流综合管理研究。

E-mail: yuga@igsrr.ac.cn

上, 详细分析 20 世纪 50 年代大规模农垦开发以来塔河水沙变化及河流地貌过程, 藉此推动对塔河和其他受高强度人类活动影响的干旱区河流地貌过程和趋势的认识, 促进干旱区河流的科学管理。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域

位于青藏高原北部的塔里木盆地是中国最大的内陆流域盆地, 总面积约 100 万 km²[30]。受天山、东帕米尔高原、昆仑山、喀喇昆仑山和阿尔金山等山脉包围, 塔里木盆地的降水具有明显的地形降水特征。虽然盆地周围山脉年降水量能达 200~500 mm, 盆地内部却十分干旱, 塔里木河沿岸地区年降水量仅 50~80 mm, 塔克拉玛干沙漠年降水仅有 10 mm[31]。塔河河道径流几乎完全来自天山、昆仑山等冰川融雪, 盆地内部降水对河道径流几乎没有影响。

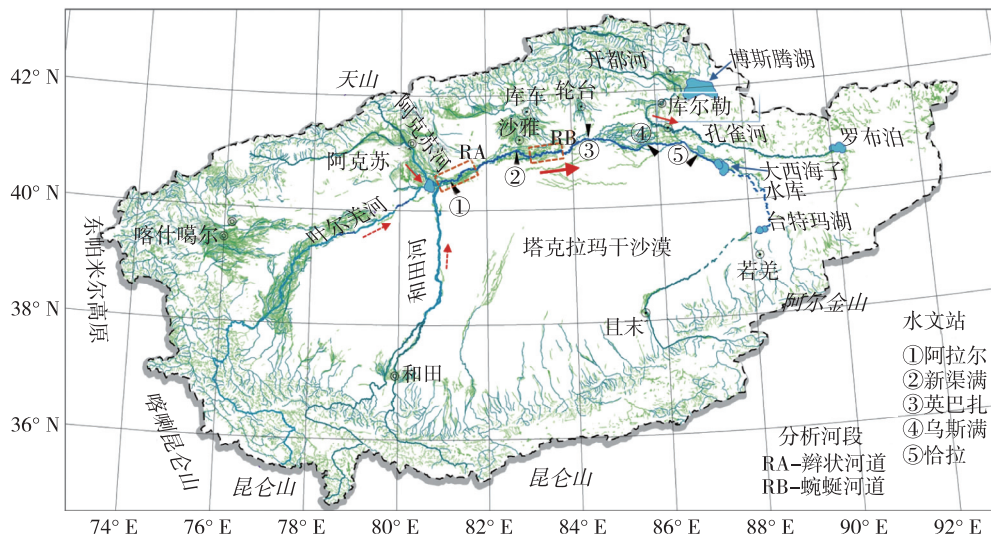


图 1 塔里木盆地的位置和现状水系构成

Fig. 1 Location of the Tarim River basin and the current river network system

塔河干流上的主要水文站包括阿拉尔、新渠满和恰拉站(图 1, 位置点①、②、⑤)。阿拉尔水文站是塔河主要源流阿克苏河、叶尔羌河及和田河汇合后的第 1 个水文站, 位于肖夹克(三源流汇合处)下游约 48 km, 是塔河干流的上游控制站, 因而其水沙特征代表了进入塔河干流的水沙状况。塔河干流阿拉尔、新渠满和恰拉 3 站多年水沙特征如表 1 所示。

表 1 塔河干流代表水文站水沙特征

Table 1 Characteristics of flow and sediment at representative hydrologic stations in the main stem Tarim River

水文站	流量					悬沙			
	范围/(m ³ ·s ⁻¹)	Q _m /(m ³ ·s ⁻¹)	Q _{m2} /(m ³ ·s ⁻¹)	C _v	C _s	范围/(kg·m ⁻³)	S _c /(kg·m ⁻³)	C _v	C _s
阿拉尔	0.420~2 130	149	503	1.41	2.9	0.017~21.6	4.90	1.39	2.32
新渠满	0.010~1 680	119	422	1.60	2.6	0~12.0	5.00	1.25	2.01
恰拉	0~150	24.8	63.6	1.68	2.0	0~0.960	0.200	0.93	1.73

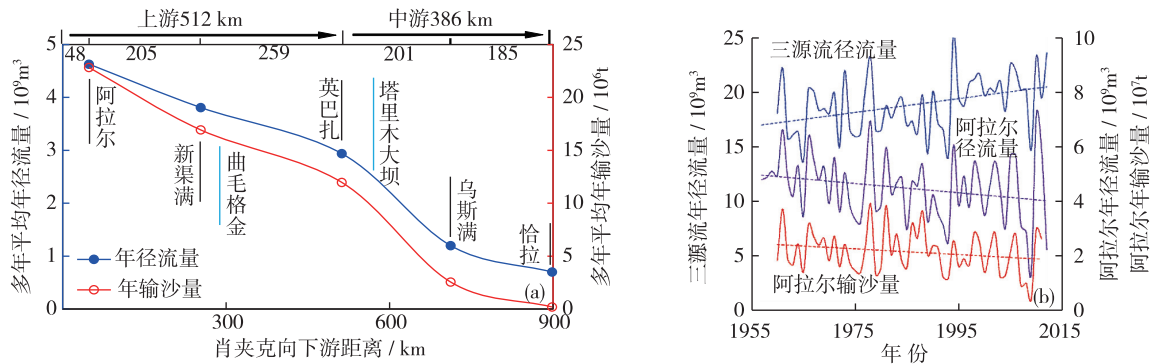
注: 1. 流量数据系列: 1960—2011 年(阿拉尔); 1957—2011 年(新渠满); 1957—1960 年和 2006—2008 年(恰拉)。

2. 泥沙数据系列: 1960—1966 年、1978—1989 年、2001—2011 年(阿拉尔); 1962—1971 年(新渠满); 1959 年(恰拉)。

范围: 最小日均值—最大日均值; C_v 为变差系数; C_s 为偏态系数; Q_m 为多年平均年均流量; Q_{m2} 为多年平均汛期 7—8 月平均流量; S_c 为多年平均年均含沙量。

表 1 中流量和悬移质含沙量最大和最小值的显著差异说明塔河的径流和泥沙过程变化剧烈。较大正值的偏态系数 C_s 说明流量和输沙过程呈显著的非对称分布, 且数据分布在中值右侧相对于左侧更长更加平坦, 也就是说, 低流量和相应的低悬移质含量输沙过程在整个径流过程中占主要部分, 虽然其对年径流和年输沙过程的贡献较小。塔河阿拉尔站 1960—2011 年多年平均年径流量约 45.71 亿 m^3 , 年输沙量为 $22.0 \times 10^6 t$, 年输沙十分集中, 其汛期(6—9 月)输沙量占年输沙量的 95%。由于沿程损失和引水, 平均年径流和年输沙量沿程递减(图 2 (a)), 进入恰拉水文站下游的年径流量和输沙量仅约 7.820 亿 m^3 和 $0.200 \times 10^6 t$ 。近 50 多年的水文数据还显示, 虽然上游三源流的径流量(以阿克苏河、叶尔羌河以及和田河下游控制站年径流量之和计算)有所上升, 进入塔河(以阿拉尔站分析)的年径流量却呈减小趋势, 河道输沙量也呈波动递减趋势(图 2 (b))。

本文的分析针对塔河干流的上游和中游河段, 即从三源流汇合处(肖夹克)至恰拉水文站, 河段长度约 900 km (图 2 (a))。由于恰拉以下的塔河下游河段径流较小, 水流已不是其河道地貌演变的主要驱动力, 因而恰拉下游河段本文暂不作分析。



(a) 塔河干流年径流量和年输沙量空间分布 (1956—1999) (b) 近 40 年三源流年来水量和阿拉尔站年径流量及年输沙量变化情况

图 2 塔河干流水沙时空变化特征

Fig. 2 Temporal and spatial variation of runoff and sediment load along the main stem Tarim River

1.2 数据及方法

基于相关文献[30, 32-34] (包括历史资料)、水沙数据和遥感影像, 分析近几个世纪尤其最近 50 年以来塔河流域的人类活动(以流域人口规模、耕地面积和水资源开发为指标)和河流地貌过程。收集中国水文年鉴刊印的塔河干流阿拉尔、新渠满和恰拉站日均流量(Q)和日均悬移质含沙量(S_c)数据, 分析近 50 年塔河水沙特征和过程, 基于阿拉尔和新渠满站实测河道大断面数据分析最近 30 年河道冲淤变化。收集 Landsat 等数据库遥感影像(20 世纪 70 年代后期以来)分析河道平面特征(平均河宽、蜿蜒系数)。为保证结果的可比性, 分析中只采用非汛期影像。采用 ENVI 5.2 和 ArcGIS 10.1 软件分析遥感影像, 提取河道边界和中心线, 测量河道长度和平面面积, 并计算平均河宽。其中, 河长的测量沿河道中心线进行。不同时期遥感影像提取得到的河道边界和中心线叠加到一起, 比较河道横向摆动。如果河道平面形态为辫状, 则选择主汊提取中心线。河道平均河宽为河道平面面积除以相应河道中心线长度值。河道蜿蜒系数为河道中心线长度与河道上下游两端连线长度的比值。由于塔河蜿蜒河道发育极不规则, 单个河湾蜿蜒系数差异显著, 本文采用一定长度河段多个河湾蜿蜒系数均值来反映河段蜿蜒系数。

采用平均河床高程 E_m 来代表河床冲淤变化, 计算公式为

$$E_m = A/W \tag{1}$$

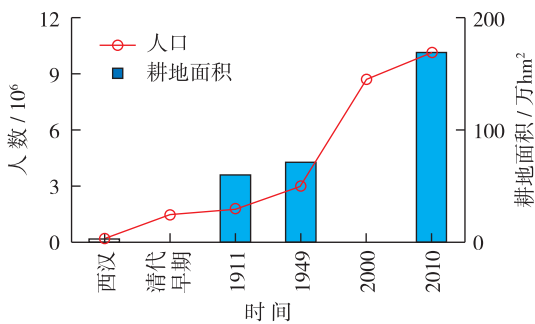
式中: A 为固定基准高程以上的河道大断面(横断面)与基准高程面之间包裹面积, m^2 ; W 为每次大断面测量的断面宽度, m 。

另外, 沿塔河干流进行野外调查, 包括河道横断面和平面形态特征。在现状河道(阿拉尔、新渠满、英巴扎和乌斯满)和古河道(英巴扎附近)采集河床(深度 0~50 cm)和河岸沙样, 使用 MasterSizer 2000 激光粒度

仪分析泥沙级配构成。在塔河现状和废弃河道选取代表性河段,比较蜿蜒系数差异。

2 塔里木盆地的人类活动

反映塔河流域人类活动强度的主要指标之一是流域内的人口规模。塔河流域早期的人类活动可以追溯到公元前 3800 年以前的楼兰古城,不过相关研究表明汉代(公元前 206 年—公元 220 年)以前流域人口数量很



数据来源: a. 班固, 汉书, 卷 96, 西域列传, 约公元 80 年;
b. 玄奘, 大唐西域记, 公元 646 年; c. 2010 新疆人口普查数据

图 3 塔河流域人口和耕地面积变化^[32-34]
(横坐标时间间隔非均匀)

Fig. 3 Variation of population and farmland area in the Tarim River basin^[32-34]

少(约 23 万人)^[32],因而人类活动强度很低。塔河流域人口数量到清代晚期(20 世纪初)缓慢增加到 178 万。但是,从 20 世纪开始,尤其 20 世纪 50 年代以后,伴随大规模农垦开发和流域经济社会快速发展,流域内人口迅速增加(图 3)。

伴随塔河流域内人口数量上升而发生的人类活动对当地脆弱的生态环境形成巨大压力^[32-33]。在众多不同类型的人类扰动中,土地开垦(森林砍伐)和水资源利用(调节、引水等)对河流水系构成和地貌具有非常重要的影响,因为这些活动在根本上改变了流域的水文、泥沙和植被状况。相比于清代(1644—1912 年)和更早的朝代,20 世纪以来塔河流域内的耕地面积经历十分显著的增长(图 3)。汉代的耕地面积约 3.3 万hm²,到晚清时耕地面积增加到 60 万hm²^[34],1949 年增加到 71 万hm²,而到 2010 年则显著增加到 169 万hm²^[33]。

耕地面积的增加伴随着规模日益上升的水资源开发利用。

有关资料显示,到 1998 年,塔河干流和主要支流上已修建超过 76 座水库,总库容达 25.50 亿m³,其中塔河干流上修建了 8 座引水水库,总库容 5.900 亿m³。另外,超过 286 个引水工程沿塔河干流和主要支流修建,引水能力达 765 m³/s^[27]。由于大规模人类活动的扰动(森林砍伐、土地开垦等、水资源过度使用),塔河漫滩洪水几率降低,导致森林幼苗难以萌发生长,流域自然植被明显衰退。流域的主要植被为胡杨林,其面积由 1958 年的 53 万hm²减小到 1979 年的 28 万hm²^[35]。2009 年开展的监测显示,胡杨林面积仅 20 万hm²^[36]。原来支撑自然植被的土地现在相当部分转变为农田,有些则退化为沙化土地。

3 人类活动影响下的河流地貌过程

3.1 水沙变化

由于日益增加的农业和城镇生活用水,进入塔河干流的年径流量呈明显的递减趋势(图 2(b))。不同流量级过程(阿拉尔站以 $Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $50 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $> 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 3 个流量级划分,新渠满站以 $Q < 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $40 \sim 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $> 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 3 个流量级划分)年发生天数的年际变化显示,阿拉尔和新渠满站低流量过程($Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $< 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 年发生天数)明显上升,而中等流量过程($50 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $40 \sim 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量天数)则显著下降,大流量过程($Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $> 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 年发生天数)也呈微弱下降趋势(图 4)。另外,干流中游末端控制站恰拉站年径流量与上游控制站阿拉尔站年径流量的占比呈现十分显著的下降趋势,2000 年以来由于塔河下游开展生态补水,这种趋势有所减缓(图 5)。

近几十年来,塔河的下游终点从以前的罗布泊移动到台特玛湖,20 世纪 60 年代修建大西海子水库后,塔河的实际终点被控制在大西海子水库。由于过量用水,近年来大西海子水库上游至英巴扎(甚至新渠满)河道在非汛期也常会出现断流。塔河中游末端控制站恰拉站多年平均年输沙量约 20.0 万t,仅相当于阿拉尔站多年平均年输沙量的 0.91%,大部分泥沙在阿拉尔至恰拉河段沿程落淤或由于引水而进入河道两侧的农田。

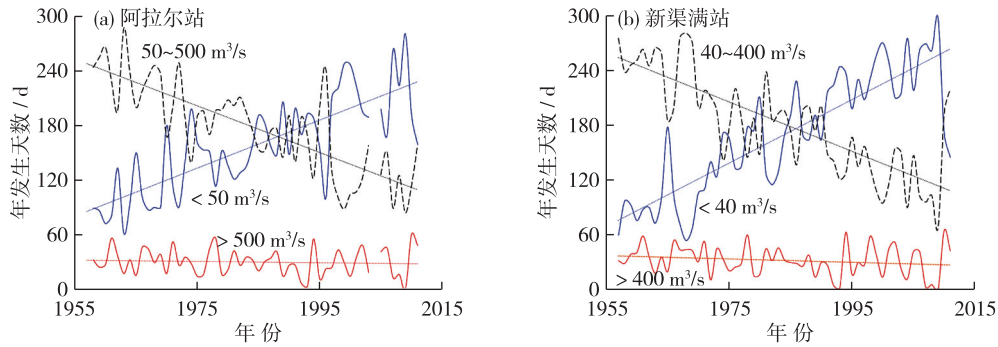


图 4 塔河干流不同流量级径流过程年发生天数变化

Fig. 4 Variations of annual occurrence of different flow events

3.2 河流地貌

塔河的河岸和河床泥沙主要由粗粉沙和极细沙构成(图 6), 泥沙组成较为均匀, 细沙(63~500 μm)和粗粉沙(8~63 μm)占主要部分, 黏土质成分(<2 μm)含量很低, 分选系数(这里采用 $\varphi = D_{80}/D_{20}$)仅 1.4~1.6。因此, 其河岸抗冲性低, 稳定性差, 易发生塌岸崩岸。

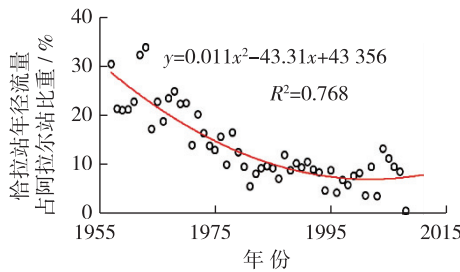


图 5 近 50 年恰拉站年径流量占阿拉尔站年径流量比重变化

Fig. 5 Variation in the percentage of runoff at Qiala to Alar

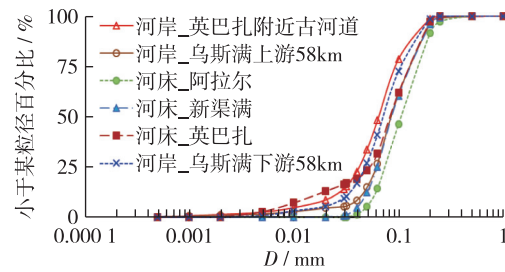


图 6 塔河现状河道和古河道代表河段泥沙级配构成

Fig. 6 Size distribution of sediment samples from representative reaches of the current and old channels

塔河干流发育辫状和蜿蜒两种河道平面形态。辫状河型主要分布在肖夹克到新渠满河段, 长约 250 km (图 1, 图 2(a))。新渠满下游, 河宽逐渐束窄, 平面河型由辫状逐渐过渡为蜿蜒河型。典型的蜿蜒河型主要分布在曲毛格金下游(图 2(a))。选取塔河现状河道两个代表性河段来分析近几十年来河道平面形态的变化过程, 即阿拉尔站附近的辫状河段(RA)和曲毛格金下游的蜿蜒河段(RB, 位置见图 1)。

由于河岸强度低, 流量和输沙过程集中且变化剧烈, 河段 RA 河床平面特性十分紊乱动荡, 阿拉尔和新渠满站大断面监测数据显示塔河上游河床总体上呈淤积抬升趋势, 同时河床高程年际甚至年内有强烈的波动(图 7, 20 世纪 90 年代河床大断面测量数据较少, 这一时期河床平均高程以虚线表示), 尤其如阿拉尔断面 2001—2002 年河床显著淤高 0.66 m, 新渠满断面 1983—1984 年河床显著冲刷 0.84 m, 说明河床的冲淤变化十分剧烈, 这一方面受上游三支流来水来沙过程的影响; 另一方面, 也与阿拉尔和新渠满河段河床自身的稳定性有关。由于塔河的河岸物质组成主要为粉沙和细沙(图 6), 其抗冲性很差, 因而在汛期河床经常发生显著的垂向冲淤变化和横向摆动。

辫状河段 RA 和蜿蜒河段 RB 近 40 年遥感影像如图 8 和图 9 所示(变化显著河段用黑色点画线框标示)。近 40 年里辫状河段 RA 有显著的横向摆动, 但总体上横向摆动幅度有所减弱。基于不同年份遥感影像提取和计算得到河道平均河宽呈减小趋势(尤其上游的辫状河段 RA, 图 10(a)), 河道堤岸的加固、原有冲积平原和凸岸河道的占用和农田开发, 应该是河道平均河宽减小的主要原因。塔河中游的蜿蜒河段 RB 也十分不稳定, 伴随着横向摆动、畸湾发育和裁湾过程。计算得到的河段 RB 的河道蜿蜒系数呈上升趋势(图 10

(b)), 说明近几十年塔河中游河段趋于蜿蜒, 其主要原因可能在于, 人类活动干扰(上游用水和调节)使得河道低流量过程发生几率上升, 而中高流量过程发生几率下降(图4(a)、图4(b)), 这应该也是中游蜿蜒河道河宽有所减小的一个因素。

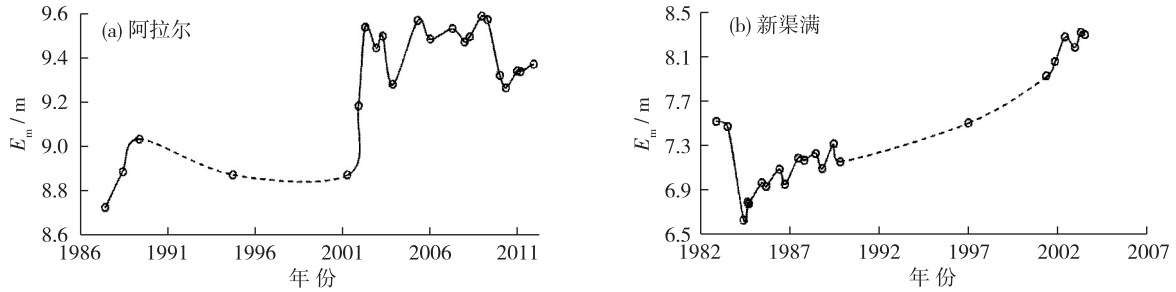


图7 塔河阿拉尔和新渠满站近30年平均河床高程 E_m 的变化

Fig. 7 Variation of the mean channel bed elevation E_m of Alar and Xinquman during the past three decades

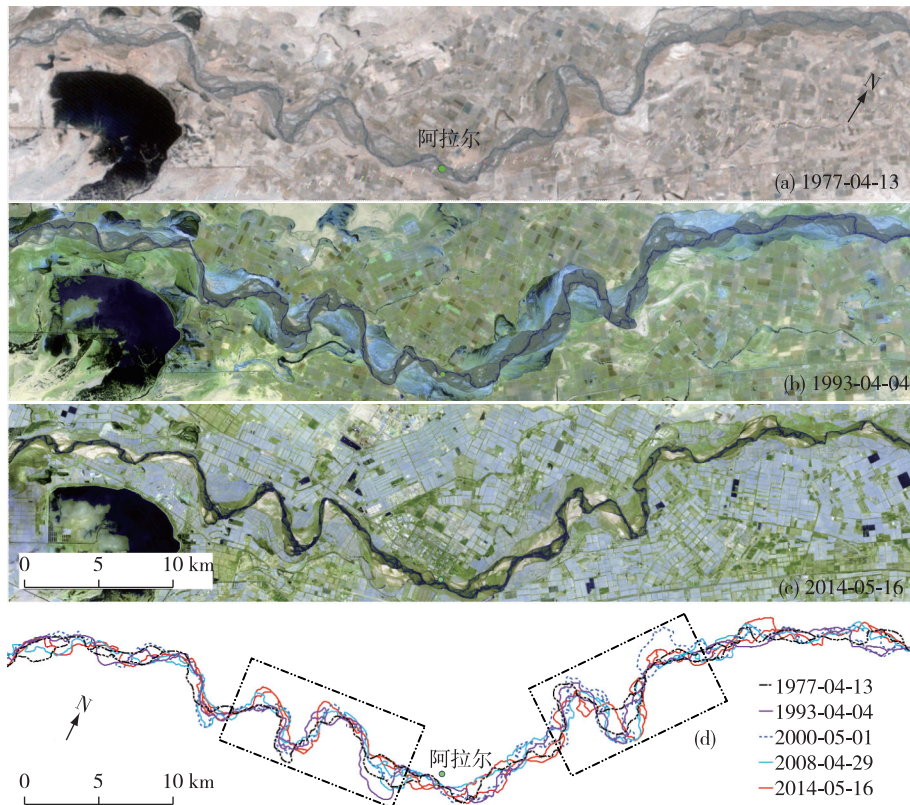


图8 阿拉尔附近辫状河段(RA)近40年河道平面形态演变

Fig. 8 Planform variation of channel routes of the braided reach (RA) near Alar during the past 4 decades

塔河现状和古(废弃)河道的泥沙组成及平面形态差异明显。现状河道泥沙粒径要明显粗于古河道, 且和附近塔克拉玛干沙漠的泥沙构成较为接近(图6)。现状和古河道的蜿蜒系数差异也十分显著。图11表明, 塔河干流现状河道上游(图11(a)河段I)和中游(图11(b)河段VI)河段蜿蜒系数要低于临近的废弃河道(图11(a)河段II-V, 图11(b)河段VII-VIII及图11(c))。这说明人类活动扰动已经影响(或改变)了塔河的自然特征和过程(弯道演变和河流改道)。

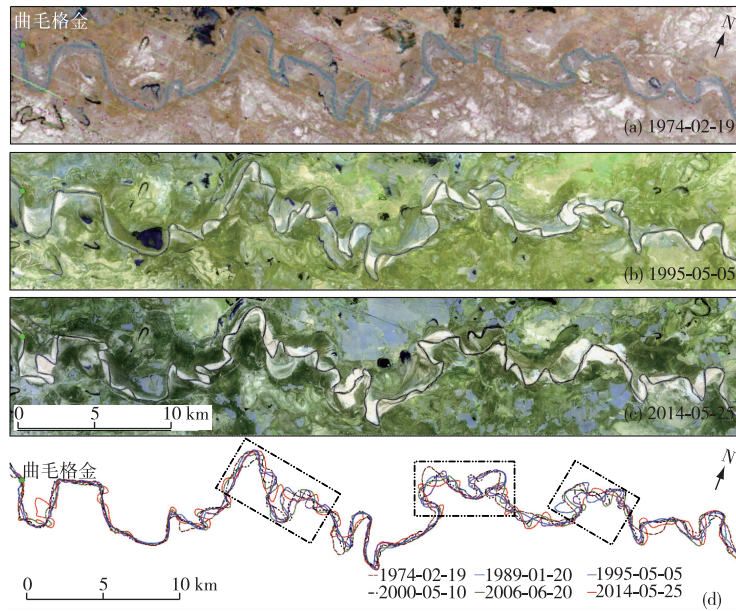


图 9 曲毛格金下游蜿蜒河段(RB)近 40 年来河道平面演变

Fig. 9 Planform variation of the channel route of the meandering reach (RB) downstream from Qumaogejin during the past 4 decades

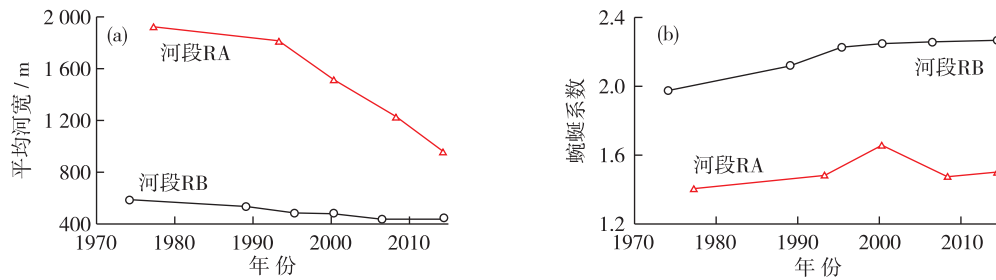
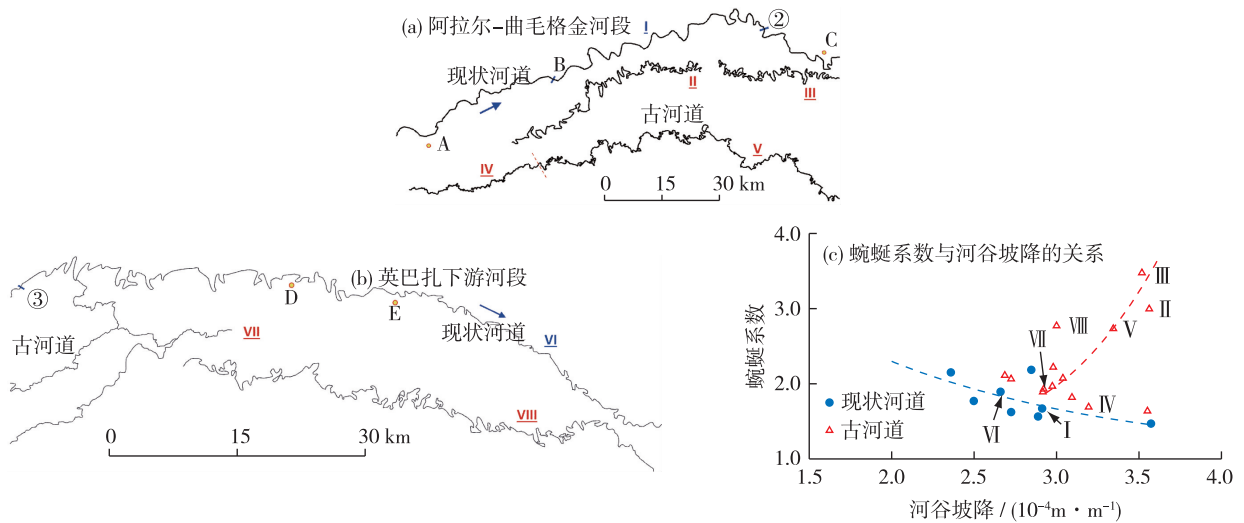


图 10 河段 RA 和 RB 近 40 年平均河宽和蜿蜒系数变化趋势

Fig. 10 Variations in the mean channel width and sinuosity index of the reach RA and RB during the past 4 decades



A: 农垦 14 团 (阿拉尔下游约 66 km); B: 沙雅塔河大桥; C: 曲毛格金 (新渠满下游约 24 km); D: 塔里木大坝 (地名, 原塔里木大坝已拆除); E: 英吉格拉 (乌斯满上游约 93 km); ②: 新渠满水文站 (图 1); ③: 英巴扎水文站 (图 1)

图 11 塔河干流现状河道和古河道蜿蜒特征对比

Fig. 11 Comparison of meandering characteristics of current and old (abandoned) channels

4 结 论

近几个世纪尤其 20 世纪 50 年代大规模农垦开发以来,塔河流域人类活动的强度日趋上升,改变了河流自然的水沙过程,引起河流地貌的显著变化。虽然来自上游三源流的径流量近几十年有所增加,但塔河干流的径流量和输沙量均明显减小,低流量过程发生频率显著上升,而中、高流量过程频率则呈下降趋势。塔河干流上游总体处于淤积抬升状态,且冲淤变化剧烈。由于河流冲积平原的开垦和河岸加固,塔河河道的平均河宽呈减小趋势。塔河现状河道的蜿蜒系数要明显低于古(废弃)河道,尽管其蜿蜒系数在近几十年呈缓慢上升趋势。人类活动在相当程度上已改变了塔河自然的河流地貌过程。未来应加强干旱区河流水沙和地貌变化的系统监测,以深入认识人类活动强烈扰动下的干旱区河流地貌过程和趋势,促进干旱区河流的科学管理和沿河绿洲经济社会和生态环境可持续发展。

参考文献:

- [1] GILBERT N. United Nations considers creating advisory panel on land degradation akin to IPCC [J]. *Nature*, 2011, 477: 262-264.
- [2] THOMAS D S G. *Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands* [M]. 3rd Ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. [doi: 10.1002/9780470710777]
- [3] 王涛,刘树林.中国干旱区绿洲化荒漠化调控区划纲要[J].*中国沙漠*, 2013, 33(4): 959-966. (WANG T, LIU S L. Regionalization for regulating oasisification and desertification in the arid regions of China: a program [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 959-966. (in Chinese))
- [4] BROOKS A P, BRIERLEY G J. Geomorphic responses of the lower Bega River to catchment disturbance [J]. *Geomorphology*, 1997, 18(3/4): 291-304.
- [5] SURIAN N, RINALDI M. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy [J]. *Geomorphology*, 2003, 50: 307-326.
- [6] LIÉBAULT F, GOMEZ B, PAGE M, et al. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions [J]. *River Research and Application*, 2005, 21: 739-756.
- [7] GREGORY K J. The human role in changing river channels [J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 172-191.
- [8] WOHL E. Human impacts to mountain streams [J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 217-248.
- [9] HOFFMAN T, THORNDYCRAFT V R, BROWN A G, et al. Human impact on fluvial regimes and sediment flux during the Holocene: review and future research agenda [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72: 87-98.
- [10] RHOADS B L, LEWIS Q W, ANDRESEN W. Historical changes in channel network extent and channel planform in an intensively managed landscape: natural versus human-induced effects [J]. *Geomorphology*, 2016, 252(1): 17-31.
- [11] GRAF W L. Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1978, 89: 1491-1501.
- [12] GRAF W L. *Fluvial processes in dryland rivers* [M]. Berlin: Springer-Verlag, Germany, 1988.
- [13] BLACKBURN W H, KNIGHT R W, SCHUSTER J L. Saltcedar influence on sedimentation in the Brazos River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1982, 37: 298-301.
- [14] BIRKEN A S, COOPER D J. Processes of Tamarix invasion and floodplain development along the lower Green River, Utah [J]. *Ecological Applications*, 2006, 16: 1103-1120.
- [15] MAHESHWARI B L, WALKER K F, MCMAHON T A. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia [J]. *Regulated Rivers: Research and Application*, 1995, 10: 15-38.
- [16] THOMS M C, SHELDON F. Water resource development and hydrological change in a large dryland river: the Barwon-Darling River, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1/2): 10-21.
- [17] CHIN A, GREGORY K J. Urbanization and adjustment of ephemeral stream channels [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91: 595-608.
- [18] COLEMAN D, MACRAE C, STEIN E D. Effect of increases in peak flows and imperviousness on the morphology of southern Cali-

- fornia streams [R]. Costa Mesa: Southern California Coastal Water Research Project, 2005: 70.
- [19] 韩清. 塔里木河流域农垦后水质的变化及其控制[J]. 地理学报, 1980, 35(3): 219-231. (HAN Q. On the deterioration of water quality and its control after large-scale reclamation in the Tarim Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 1980, 35(3): 219-231. (in Chinese))
- [20] FENG Q, LIU W, SI J H, et al. Environmental effects of water resource development and use in the Tarim River basin of north-western China [J]. Environmental Geology, 2005, 48(2): 202-210.
- [21] CHEN Y N, CHEN Y P, XU C C, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China [J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 170-177.
- [22] DUETHMANN D, BOLCH T, FARINOTTI D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia [J]. Water Resources Research, 2015, 51: 4727-4750.
- [23] KEILHOLZ P, DISSE M, HALIK Ü. Effects of land use and climate change on groundwater and ecosystems at the middle reaches of the Tarim River using the MIKE SHE integrated hydrological model [J]. Water, 2015, 7: 3040-3056.
- [24] 冯起. 2000年以来塔里木河中游的河道变迁[D]. 兰州: 中国科学院兰州沙漠研究所, 1995: 210. (FENG Q. The Channel changes of Tarim River in the latest 2000 years [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, 1995: 210. (in Chinese))
- [25] 王延贵, 胡春宏, 周文浩, 等. 塔里木河干流河道的河型及其成因[J]. 泥沙研究, 2002(12): 19-25. (WANG Y G, HU C H, ZHOU W H, et al. Study on river patterns of the Tarim River [J]. Journal of Sediment Research, 2002(12): 19-25. (in Chinese))
- [26] 王延贵, 胡春宏, 周文浩, 等. 塔里木河干流的河床演变特点[J]. 水利学报, 2003, 34(12): 27-33. (WANG Y G, HU C H, ZHOU W H, et al. Evolution characteristics of Tarim River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(12): 27-33. (in Chinese))
- [27] 胡春宏, 王延贵. 塔里木河干流河道综合治理措施的研究: I: 干流河道演变规律 [J]. 泥沙研究, 2006(4): 21-29. (HU C H, WANG Y G. Study on comprehensive regulation measures of the main stem Tarim River: I: fluvial processes [J]. Journal of Sediment Research, 2006(4): 21-29. (in Chinese))
- [28] 冯起, 陈广庭, 李振山. 塔里木河现代河道冲淤变化的探讨[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 38-43. (FENG Q, CHEN G T, LI Z S. Investigating into the variation of erosion and siltation on the modern channel of Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(1): 38-43. (in Chinese))
- [29] 夏德康. 塔里木河干流泥沙运动及河道变迁[J]. 水文, 1998(6): 42-47. (XIA D K. Sediment transport and channel evolution in the main stem Tarim River [J]. Hydrology, 1998(6): 42-47. (in Chinese))
- [30] 樊自立, 陈亚宁, 王亚俊. 新疆塔里木河及其河道变迁研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 8-15. (FAN Z L, CHEN Y N, WANG Y J. Study on the Tarim River and its water course evolution in Xinjiang: recorded in the "records of rivers" [J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 8-15. (in Chinese))
- [31] CHEN Y N, XU C C, HAO X M, et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River basin, China [J]. Quaternary International, 2009, 208: 53-61.
- [32] 樊自立, 艾里西尔·库尔班, 徐海量, 等. 塔里木河的变迁与罗布泊的演化[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 232-243. (FAN Z L, ALISHIR K, XU H L, et al. Changes of Tarim River and evolution of Lop Nur [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(2): 232-243. (in Chinese))
- [33] 满苏尔·沙比提, 陆吐布拉·依明. 新疆南疆地区土地利用变化及其生态效应[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 440-446. (MANSUR S, LUTPULLA I. Land use change and its eco-effects in Southern Xinjiang, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(4): 440-446. (in Chinese))
- [34] 樊自立. 历史时期塔里木河流域水系变迁的初步研究[J]. 干旱区地理, 1979(2): 20-36. (FAN Z L. Preliminary study on drainage network evolution of Tarim River in history [J]. Arid Land Geography, 1979(2): 20-36. (in Chinese))
- [35] 录叙德, 安佳文, 任伯建. 塔里木盆地胡杨林航视调查报告[J]. 新疆林业, 1980(6): 3-11. (LU X D, AN J W, REN B J. Aerial investigation of Populus euphratica forest in Tarim Basin [J]. Xinjiang Forestry, 1980(6): 3-11. (in Chinese))
- [36] 成文连, 何萍, 关彩虹, 等. 塔里木河上游段胡杨林历史演变及原因分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14292-14294. (CHENG W L, HE P, GUAN C H, et al. Historical development of Populus euphratica in the upper stream of Tarim River and its causes [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(29): 14292-14294. (in Chinese))

Human impacts on fluvial processes in a very arid environment : case of Tarim River in China *

YU Guo'an¹, LI Zhiwei^{2,3}, HUANG Heqing¹, LIU Xiaofang¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: Dryland rivers have long been subject to the influences of various human interventions in many parts of the world, however, little attention has been paid on how the fluvial processes of these rivers have responded to. Here we report a case study of the Tarim River, the largest inland river in China. By analyzing historical literature, gauged hydrological data and satellite images, this study performed a detailed examination on how the fluvial process of the river has changed under ever-increasing human influences in recent decades. The results demonstrate that human activity in the river basin have exerted significant impacts on the Tarim River, causing major changes in runoff, sediment transport and river morphology. Hydrological data observed over the past five decades shows an obvious reduction in both runoff and sediment load in the Tarim River, even though the runoff from source tributaries exhibits a gently increasing trend. The annual occurrence of low-flow events shows a significantly increasing trend, while the occurrences of both moderate-and high-flow events take a decreasing trend. The upper reach of the Tarim River is dominated with a wandering channel pattern, which is in aggradation and yet in a strong fluctuation form. The mean width of the wandering channel has been in a gently decreasing trend, perhaps due to the reclamation of river floodplains into farmlands and river embankments. The middle reach of the Tarim River takes a typical meandering channel pattern, the sinuosity index of which is distinctively lower than those of the old (abandoned) channels, even though it shows a gentle increasing trend in recent decades probably due to the increased occurrence of low-flow events.

Key words: flow and sediment regime; fluvial processes; human impacts; dryland river; Tarim River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571009; No. 41330751).