

DOI:10.13866/j.azr.2026.05.06  
CSTR:32277.14.AZR.20260506

# 塔里木河干流克勒力克至英巴扎段河道演变特征

谭方杰<sup>1,2</sup>, 李琳<sup>1,2</sup>, 宗全利<sup>3</sup>, 张磊<sup>4</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 4. 塔里木河流域干流水利管理中心, 新疆 尉犁 841000)

**摘要:** 为探究塔里木河干流克勒力克至英巴扎段河道冲淤演变特征, 本文基于1993—2024年克勒力克至英巴扎段洪水期 Landsat 卫星影像和水文站的水沙数据, 通过对河段的断面宽度、深泓线长度、弯曲度指数、岸线长度等典型河道参数进行分析。结果表明: 1993—2024年河道弯曲系数由2.20增至2.56, 深泓线长度年均增长0.27 km, 河道蜿蜒趋势加剧。河段上游断面最大拓宽幅度超过585%, 而中下游相对稳定。深泓线整体向北偏移, 年均迁移速率达 $0.1 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ , 且局部裁弯导致主槽最大摆动幅度超3 km。近32 a来共发生5次裁弯取直, 造成主槽调整与流向偏移, 导致5个引水口出现废弃的现象。左岸岸线长度年均增速 $0.149 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ , 是右岸的3倍, 主槽持续向左岸偏移。河道蜿蜒与侵蚀加剧可能威胁沿岸农田与生态林灌溉保证率和防洪安全。研究结果可为克勒力克至英巴扎河段的河道防洪工程和整治工程的规划设计提供依据。

**关键词:** 塔里木河干流; 演变特征; Landsat 卫星影像; 平原型河流

塔里木河是中国第一大、世界第五大内陆河流, 流域面积 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 塔里木河干流全长1321 km, 由肖夹克自西向东, 最后向东南流入台特玛湖, 属于平原型河流<sup>[1]</sup>。塔里木河干流是新疆南部地区最重要的水源, 为流域内绿洲经济发展、生态环境维持和人民生活水平提高发挥了巨大作用<sup>[2-3]</sup>。其中, 干流克勒力克至英巴扎河段位于中下游关键控制区, 既承接上游来水来沙过程, 又直接关系下游生态输水的传递与岸线稳定, 近年来在汛期来水来沙波动与生态输水等人类活动共同作用下, 河道形态参数出现阶段性调整。因此, 本文选取该河段, 系统分析1993—2024年河道形态的时空演变规律。

自20世纪90年代以来, 关于塔里木河河道演变的研究陆续展开并逐步系统化。在水沙演变与河型分异方面, 夏德康<sup>[4]</sup>(1998年)揭示泥沙汛期集中并指出人类活动可加剧河道摆动; 王延贵等<sup>[5-7]</sup>(2002年、2003年)基于遥感与水文数据, 将塔里木

河干流分为游荡型、弯曲型和过渡型三种河型并讨论其成因; 胡春宏等<sup>[8-9]</sup>(2006年)提出挟沙能力公式并阐明水文与工程调控对冲淤过程的作用。在生态输水与生态效应方面, 闫正龙等<sup>[10]</sup>和邓铭江<sup>[11]</sup>(2005年、2007年)利用遥感与MODIS评估植被恢复与生态效益; Yan等<sup>[12]</sup>(2007年)表明生态输水能提升覆盖度、降低荒漠化。Sun等<sup>[13]</sup>、谭克龙等<sup>[14]</sup>和朱长明等<sup>[15]</sup>(2010年、2013年、2019年)基于多源遥感与地面调查的长期监测结果显示, 生态输水与综合治理显著提升了塔里木河流域植被覆盖, 缓解生态退化, 其中对下游河段的生态环境改善尤为明确, 相关对比分析为后续生态保护与治理提供了实证依据; 周龙等<sup>[16]</sup>(2022年)的研究则从水文过程机理出发, 指出生态输水直接驱动了下游河道输水方式与耗水特征的演变。在人类活动与局部河势响应方面, Yu等<sup>[17]</sup>(2016年)评估了人类活动对水沙关系与河势的影响; 余国安等<sup>[18]</sup>(2017年)则从流域尺度系统总结了人类活动包括水资源开发、生态输水及

收稿日期: 2025-09-11; 修订日期: 2025-11-21

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B3024-2); 2024年研究生“新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室”研究项目(ZDSYS-YJS-2024-66)

作者简介: 谭方杰(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 18290352413@163.com

通讯作者: 李琳。E-mail: lilin\_xjau@163.com

工程治理对塔里木河水沙关系与地貌演变过程的深刻重塑;郑刚<sup>[19]</sup>和郭庆超等<sup>[20]</sup>(2024年、2016年)研究发现阿拉尔河段表现为冲淤交替、主流摆动显著(幅度>850 m),且堤防建设等工程约束对河势与形态演变产生重要影响;高久洲等<sup>[21]</sup>(2024年)基于数字岸线系统对河道形态与冲淤的影响进行了分析,并结合预测模型提出治理建议;Li等<sup>[22]</sup>(2017年)指出在极端干旱区,河道迁移速率为湿润区的2~3倍,裁弯频率更高,且植被固岸能力有限。总体来看,现有研究为理解塔里木河的演变提供了重要基础,但多侧重于宏观区域或特定时段,对中下游典型平原型河段在长期强烈人类干预下的平面形态系统演变及其驱动机制尚缺乏系统分析。

克勒力克至英巴扎河段位于塔里木河干流中下游,长度136 km,属于典型的平原型河段,流经新疆尉犁县,沿岸分布大量农田与生态恢复林带,其中有农田262 km<sup>2</sup>、天然胡杨林163 km<sup>2</sup>,是区域农业灌溉与生态用水的重要供水通道。河道的稳定性对生态与粮食安全、防洪安全至关重要,自2000年以来,塔里木河向下游实施了23次生态输水,为了保证下游生态水量和输水效率,干流连续多年修建大量河道整治工程对塔河进行综合治理,工程修建和生态系统的重建势必改变河道水沙条件及其冲淤变化规律,进而影响河道河势和形态演变。为此,本文基于近32 a来的Landsat卫星影像资料和水文站数据,对克勒力克至英巴扎河道平面形态特征、演变规律和趋势开展研究,揭示其长期变化规律,为河道整治、生态保护、农业可持续发展和防洪安全保障提供参考。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

克勒力克至英巴扎河段地处塔里木河干流中下游,地理坐标为40°99′~41°17′N,83°62′~84°23′E,位于塔里木盆地北部(图1)。该区域以新生代沉积为主,基岩出露稀少,河床质多为粉砂、细砂及部分壤质沙,抗冲刷能力弱,易发生冲淤变化。该河段为典型的平原型干旱内陆河流地貌,地势平坦开阔。受青藏高原与喜马拉雅山脉阻隔,印度洋暖湿气流难以抵达,气候极端干旱,年降水量不足106 mm,而年蒸发量超过2000 mm,且风沙活动频繁。该段河道全长约136 km,水面宽度介于

140~850 m,整体呈宽浅型且河道蜿蜒曲折,水流缓慢,泥沙沉积显著,河势变化频繁,裁弯取直现象突出。沿岸分布有大量农田、天然胡杨林,区域生态较为敏感。研究段上、下游水文站分别为新其满和英巴扎水文站。

河道来水来沙条件的年际波动是导致河道平面形态在过去32 a间发生持续变化的重要因素。图2为1993—2024年新其满和英巴扎水文站年径流量和年输沙量变化,可以看出,年径流量在不同年份之间波动较大,如2009年新其满站与英巴扎站的径流量分别为 $8.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而2022年则升至 $85.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $52.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。输沙量总体与径流量呈正相关,且两站之间的年输沙量差值始终为正,表明河道整体处于淤积状态。

### 1.2 数据与方法

本研究采用的遥感数据来自中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。由于研究时间跨度为1993—2024年,Landsat系列卫星所搭载的传感器经历了多次更迭,本文选取了Landsat 4-5 TM、Landsat 7-ETM和Landsat 8-OLI的汛期影像,所用多光谱波段空间分辨率为30 m。为保障解译质量,选择云层覆盖度低于10%的影像数据,具体参数见表1。

在河道边界提取过程中,考虑到塔里木河宽浅且水位变化频繁,采用相对稳定的河畔植被边界作为河道宽度测量边界,以减少水位变化带来的影响,提高数据的可比性和测量准确性<sup>[23-24]</sup>。图像预处理在ArcGIS中完成,包括波段组合、假彩色合成和影像增强。随后采用目视解译方法,提取1993—2024年克勒力克至英巴扎段河道深泓线及左右岸边界线,用于计算断面宽度、岸线长度、弯曲度指数及冲淤面积。

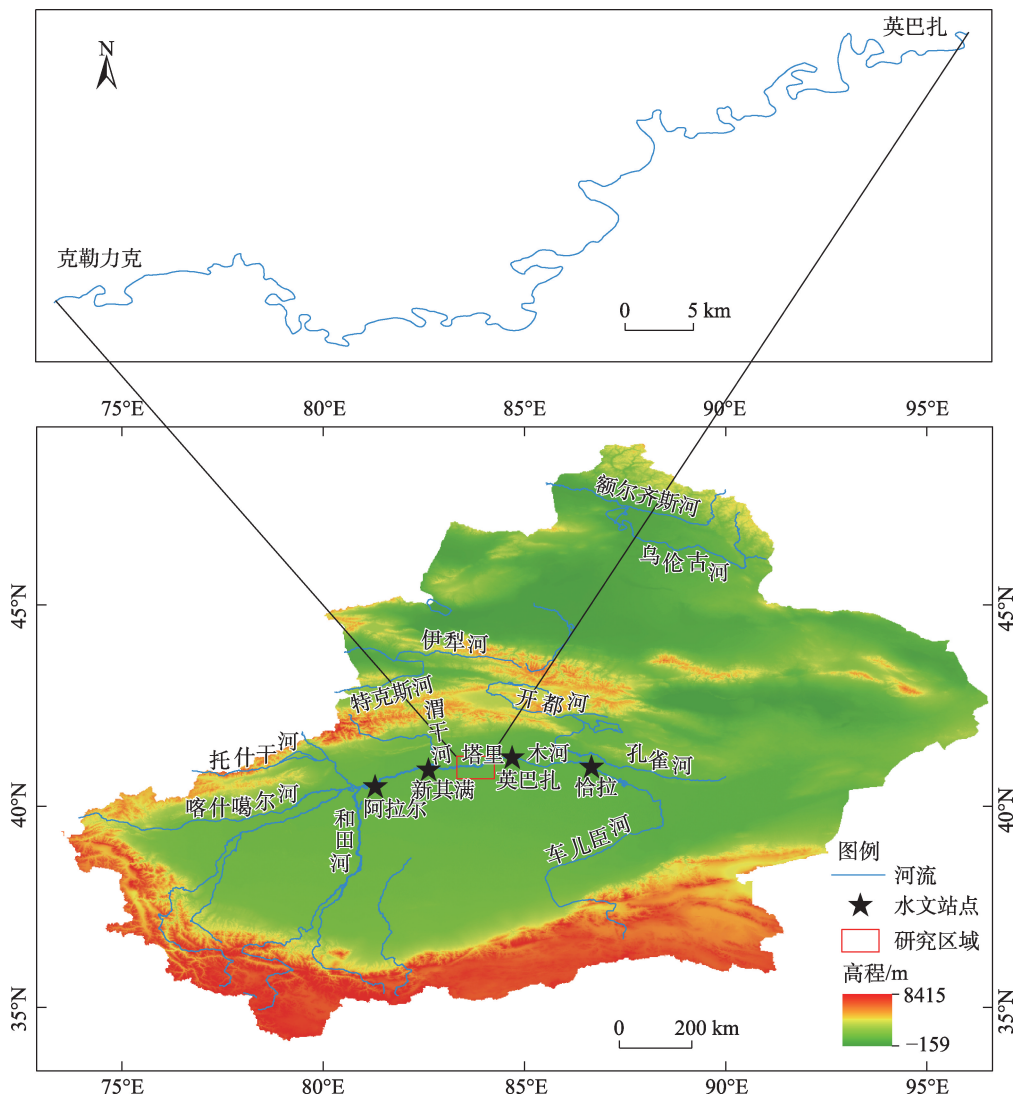
弯曲度指数(Sinuosity Index, SI)是评价河道弯道弯曲程度的重要指标之一,其计算方法如公式(1)。

$$SI = S/L \quad (1)$$

式中: $S$ 表示河段实际长度(km); $L$ 表示河段起止点之间的直线距离(km);在本文中 $L$ 为克勒力克至英巴扎的直线距离,为54.56 km。

左右岸侵蚀堆积面积,通过ArcGIS中的“擦除(Erase)”功能,分别提取后期新增区域(淤积区)与前期消失区域(侵蚀区)。计算公式如下所示。

ChinaXiv:202606.00046v1



注:底图采用国家地理信息公共服务平台标准地图制作,审图号为GS(2024)0650号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

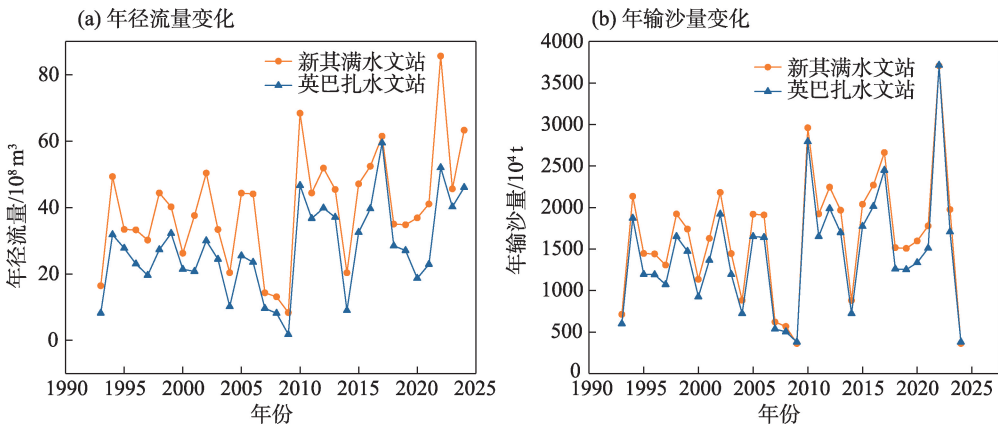


图2 新其满和英巴扎水文站年径流量和输沙量变化

Fig. 2 Changes of annual runoff and sediment transport at the Xinqiman and Yingbazha hydrological stations



表1 研究区 Landsat 数据参数及来源

Tab. 1 Parameters and sources of Landsat data for the study area

卫星识别号	行/列号	影像日期/年-月-日				
Landsat 4-5 TM	144/032	1993-08-28	1994-02-20	1995-11-06	1996-12-10	1997-02-28
Landsat 4-5 TM	144/032	1998-09-27	1999-12-27	2000-10-10	2001-12-16	2002-03-06
Landsat 7-ETM	144/032	2003-11-20	2004-12-24	2005-12-11	2006-03-01	2007-07-10
Landsat 7-ETM	144/032	2008-08-29	2009-07-31	2010-12-09	2011-07-21	2012-07-23
Landsat 7-ETM	144/032	2013-09-12	2014-07-13	2015-09-18	2016-07-02	-
Landsat 8-OLI	144/032	2017-07-29	2018-08-17	2019-12-16	2020-07-21	2021-07-24
Landsat 8-OLI	144/032	2022-09-05	2023-09-08	2024-06-22	-	-

$$\Delta A_+ = A_{t+1} - A_t \text{ (淤积)} \quad (2)$$

$$\Delta A_- = A_t - A_{t+1} \text{ (侵蚀)} \quad (3)$$

式中:  $\Delta A_+$  为淤积面积( $\text{m}^2$ );  $\Delta A_-$  为侵蚀面积( $\text{m}^2$ );  $A_t$  和  $A_{t+1}$  分别为前后两个时期的河道边界矢量范围面积( $\text{m}^2$ )。

2 结果与分析

2.1 河道弯曲度指数

从图3中可见,克勒力克至英巴扎河段弯曲系数由2.20增加至2.56,增幅达16.4%;河道长度由119.80 km增长至128.20 km,年均增长0.27 km,二者呈现同步上升趋势。这表明在自然作用与人类活动共同影响下,该河段以蜿蜒演变为主,弯曲加剧趋势明显。

图3还显示出,1993—2024年克勒力克至英巴扎河段弯曲系数出现多次下降,反映河道在不同阶段发生了调整。需要说明的是,弯曲系数下降并不

完全对应裁弯取直,部分年份的下降可能与河段实际长度缩短或局部河湾调整有关。在各下降阶段中,2014—2015年和2021—2022年弯曲系数下降幅度较大,分别由2.48、2.47骤降至2.31、2.24,降幅分别为6.90%、9.30%。结合径流量数据分析表明,年径流量显著增加后弯曲系数骤降,说明在较强水动力作用下,局部河段更易发生调整,部分河段可能伴随裁弯取直或新槽贯通,使深泓线长度在短期内明显缩短。其中,2014—2015年年径流量由  $20.35 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至  $47.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,增长132%,2021—2022年亦由  $41.08 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至  $85.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,径流量增加为局部河道调整提供了较强的水动力条件。32 a间克勒力克至英巴扎河段共识别出5次裁弯取直事件,主要集中在阿扎提塔木与吉格代提坎一带,该区域周边分布有  $3.87 \times 10^3 \text{ m}^2$  农田与  $2.13 \times 10^3 \text{ m}^2$  天然胡杨林。裁弯改变了原有水路,造成两岸的农田、胡杨林及部分密灌林地出现灌溉困难,哈德墩镇原有的引水系统亦受到影响,部分区域水源失衡,植被出现退化趋势。

2.2 断面宽度

河道断面宽度作为表征河道形态特征的关键性指标,其变化能够反映河床几何形态的演化过程。为探究宽度的时空演变并识别控制因素,本文将依据以下原则划分并布设典型横断面。在显著影响河道形态与演变的弯道顶点及上下游过渡段优先设置断面,例如断面AA'、BB'、EE'、FF'、GG'、MM',弯道为侧向侵蚀与凸岸淤积最活跃区,用于刻画曲率变化对河宽与断面形态的影响。在分汊与合流的控制位置设置断面,例如断面CC'、GG'、SS',用于识别因分汊再分配、合流束窄导致的宽度突变及与深泓线长度、弯曲系数的协同变化。在人类活动对河岸稳定性和河道形态产生直接或潜在显著影响的区域(村庄、农田)加密断面,例如断面HH'、

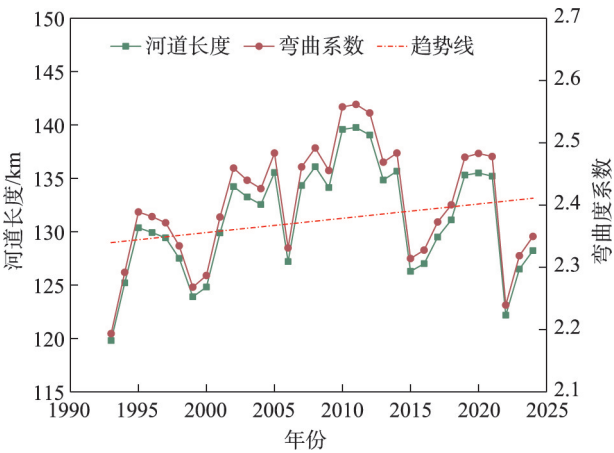


图3 1993—2024年塔里木河干流克勒力克至英巴扎段弯曲系数变化

Fig. 3 Change of bending coefficient from Kelelik to Yingbazha in the main stream of Tarim River from 1993 to 2024



JJ', 评估取水、排水与岸坡利用对宽度与稳定性的影响。在裁弯取直形成的新河段设置断面 DD'、KK', 用于评估裁弯取直对河道加宽与主槽线路调整的影响。基于以上原则, 选取了 12 个典型断面(图 4), 分析不同年份各断面处的河道宽度及其变化规律(图 5, 图 6)。

图 5 为各个典型断面 2024 年的河道宽度相对于 1993 年的变化情况。从图中可以看出, 自河道上游 AA' 断面至下游 SS' 断面, 河道宽度变化率差异较大, 断面 AA'、GG'、MM'、SS' 宽度变化率在 75%~165%, 断面 BB'、FF'、JJ' 宽度变化率在 28%~54%, 断面 CC'、EE'、HH' 宽度变化率在 -1%~-7%。值得注意的是, DD'、KK' 断面为新槽发育段, 1993 年尚未形成, 宽度为 0 m, 因此, 图 5 中未显示其相对变化率。

断面 AA'、GG'、MM' 宽度持续增加, 呈显著拓宽趋势, SS' 断面变化幅度相对较小但仍有增长(图 6a)。其中, 上游断面 AA', 1996 年河宽仅为 108.17 m, 随径流量增大, 河弯持续被冲刷, 2024 年宽度增至 741.39 m, 增幅达 585%。中游断面 GG' 位于弯道凹岸, 主流在此转向贴岸冲刷, 冲刷重心长期偏向左岸。1993 年断面宽度为 257.60 m, 至 2024 年拓宽至 588.62 m, 增幅达 128.5%。下游断面 MM' 位于河湾区, 由于交替冲淤演变主槽迁移频繁, 宽度由 1993 年的 219.75 m 增加至 2024 年的 589.75 m。

断面 CC'、EE'、HH' 宽度总体保持稳定(图 6b), 但在个别年份受强径流或局部冲淤作用影响出现短期波动。断面主要分布于顺直河段或凸岸一侧, 水流动力弱、冲淤作用有限。河宽整体稳定,

有利于维持农业引水与沿岸植被。断面 BB'、FF'、JJ' 整体趋势平缓上升, 宽度变化率低于 55%, 且在上升过程中伴随一定年际波动(图 6c)。这类断面多处于顺直段且靠近侧滩发育区, 滩体在汛期冲刷与枯水期淤积交替作用下位置和形态频繁调整, 使得河宽缓慢增加的同时, 局部年份会出现短期波动。DD'、KK' 两断面为裁弯形成的新槽段, 贯通后宽度迅速增加并趋于稳定。且分别于 1998 年与 2015 年贯通, 2024 年宽度分别拓宽至 180.13 m 和 258.90 m, 表明新主槽在强径流驱动下快速发育并趋于稳定(图 6d)。河道拓宽将导致水位降低、堤岸冲刷加剧, 并可能引发原有生态引水口失效、农田灌渠废弃。为保障灌溉安全与堤防稳定, 应对这些区域采取护岸措施或河道内控导工程, 抑制过度拓宽趋势。

### 2.3 河势演变特征

从图 7 中可以看出, 深泓线横向摆动明显, 局部迁移幅度较大。整体上, 深泓线演变主要受洪水期强水动力、新槽贯通以及主槽调整的共同影响, 局部裁弯取直进一步加剧了河势变化, 特别是在下游和新槽连接段, 河道冲刷增强, 迁移趋势突出。

以 1993 年深泓线为基线, 取 A、B、C、D 4 个裁弯点为基准点, 作其切线方向的垂线(即法线)与后续年份深泓线相交于点  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ , 其中  $i$  表示后续不同时期对应的交点序号, 两点之间的距离即为迁移距离。表 2 中给出了各典型点在不同时期的偏移数据。由表可知, 研究期内深泓线整体以向北偏移为主(负值占比 58%), 年均迁移速率为  $-0.1 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ , 表明河床主槽受凹岸侵蚀影响持续向北摆动。分段



图 4 典型断面位置

Fig. 4 Location of the typical cross section

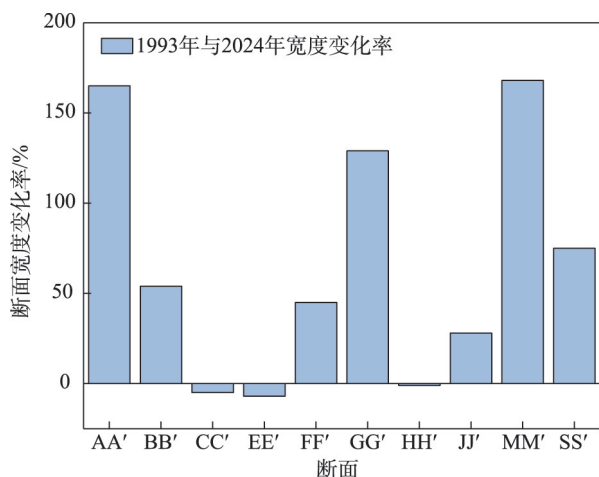


图5 1993—2024年断面宽度变化率

Fig. 5 Change rate in cross-sectional width from 1993 to 2024

时序分析显示,深泓线迁移存在阶段性突变,迁移速率在某些相邻年份骤然增大,增大原因主要是该段河道发生裁弯取直或撇弯切滩,如C点所在河段受新槽贯通的影响深泓线迁移,从2013—2018年的

0.0086 km 变化至2018—2024年的-2.620 km; A点所在河段在河湾颈口冲刷与强径流共同作用,颈口被贯穿,新槽形成并取代原有主槽,促使深泓线迁移,从2003—2008年的0.150 km变化至2008—2013年的-1.278 km。整体而言,A、B、C、D 4个点多年平均摆动幅度均超过1.3 km,最大达3.016 km,表明河道整体向北(天山山脉)迁移。

## 2.4 河岸线变化特征

2.4.1 长度变化 为量化研究区岸线变迁特征,本文基于1993—2024年多期遥感影像,通过目视解译与ArcGIS矢量化提取了克勒力克至英巴扎段左、右岸岸线,计算其长度参数(表3),其中变化速率为相邻两期岸线长度变化除以时间间隔;变化率为该阶段内岸线长度变化值与上一期长度比值。正值表示岸线外扩(增长),负值表示岸线退缩(收缩)。

由表3可知,1993—2024年两岸岸线先收缩后回升,研究期末(2024年)较期初(1993年)实现净增长。左岸由119.16 km增至123.93 km,净增长



图6 典型断面宽度变化

Fig. 6 Width changes of typical cross sections

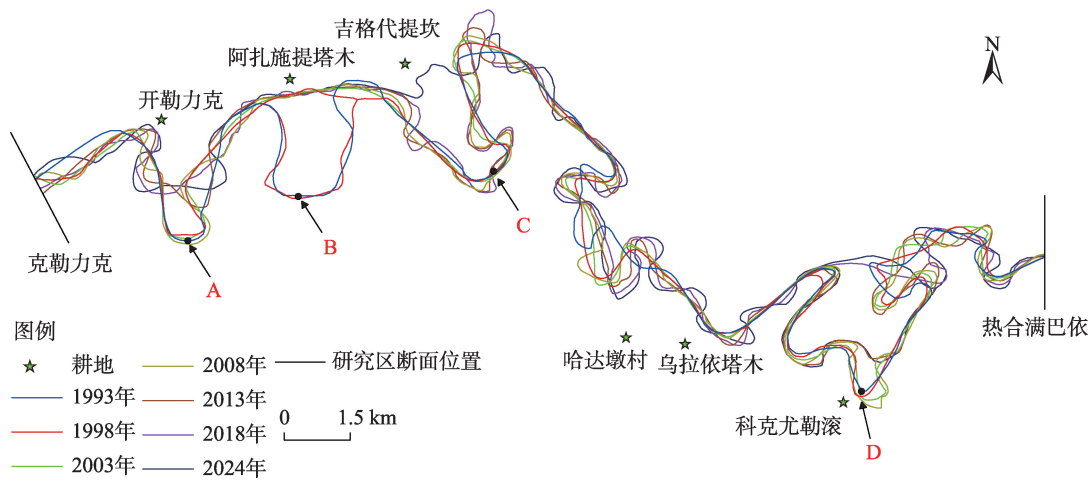


图7 1993—2024年塔里木河干流克勒力克至热合满巴依段深泓线变化  
Fig. 7 Change of thalweg from Kelelik to Rehemanbayi in the main stream of Tarim River from 1993 to 2024

表2 塔里木河干流克勒力克至热合满巴依段河道最大深泓点变化距离

位置	时期						
	1993—1998年	1998—2003年	2003—2008年	2008—2013年	2013—2018年	2018—2024年	1993—2024年
A	-0.126	-0.067	0.150	-1.278	0.030	-0.140	-1.301
B	0.481	-0.026	-0.024	0.043	0.032	-0.041	-2.322
C	-0.030	-0.0045	0.063	-0.187	0.0086	-2.620	-2.779
D	0.094	0.110	0.103	-1.261	-0.026	-2.033	-3.016

注: +代表深泓点向南偏移, -代表深泓点向北偏移。

表3 1993—2024年塔里木河干流克勒力克至英巴扎段河岸线变化

Tab. 3 From 1993 to 2024, the shoreline changes of the main stream of the Tarim River from Kelelik to Yingbazha				
年份	河岸	长度/km	变化速度/(km·a <sup>-1</sup> )	变化率/%
1993	左岸	119.16	-	-
	右岸	118.57	-	-
1998	左岸	111.79	-1.47	-6.18
	右岸	109.85	-1.74	-7.36
2003	左岸	110.55	-0.25	-1.11
	右岸	112.41	0.51	2.34
2008	左岸	116.61	1.21	5.48
	右岸	116.46	0.81	3.60
2013	左岸	114.01	-0.52	-2.23
	右岸	114.97	-0.30	-1.28
2018	左岸	106.24	-1.55	-6.81
	右岸	114.17	-0.16	-0.69
2024	左岸	123.93	2.95	16.65
	右岸	120.04	0.98	5.14

4.77 km;右岸由 118.57 km 增至 120.04 km,净增长 1.47 km。左岸净增约为右岸 3 倍,表明河道阶段性向左迁移。1998 年左、右岸分别收缩 1.47 km·a<sup>-1</sup>与 1.74 km·a<sup>-1</sup>,这主要是因为河道发生裁弯取直岸线缩短。2018—2024 年为左、右岸变化最剧烈阶段,增长率分别达 16.65%和 5.14%,这是由于该阶段洪水频发,2022 年流量达到最大 85.62×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,加上河床质主要由粉砂、细砂组成,主槽向左岸冲刷加强。

河道形态演变是引起河道岸线变化的主要原因。从图 8 中可以看出,1993—1998 年年径流量增加,凹岸冲刷加剧,阿扎施提塔木位置处形成了新冲刷沟槽,哈达墩村上游处由于凹岸冲刷推动河湾向外扩展,局部形成心滩。1998—2003 年部分河段河道变窄、裁弯发育,流路多表现为不规则形态;2003—2008 年新河道被冲刷拓宽,旧河道废弃。2008—2018 年河湾颈口束窄后被贯穿,再次发生裁弯(吉格代提坎、科克尤勒滚处),在洪水时期旧河道仍然过水,随着新河道河宽增加,旧河道逐渐废

ChinaXiv:202606.00046v1



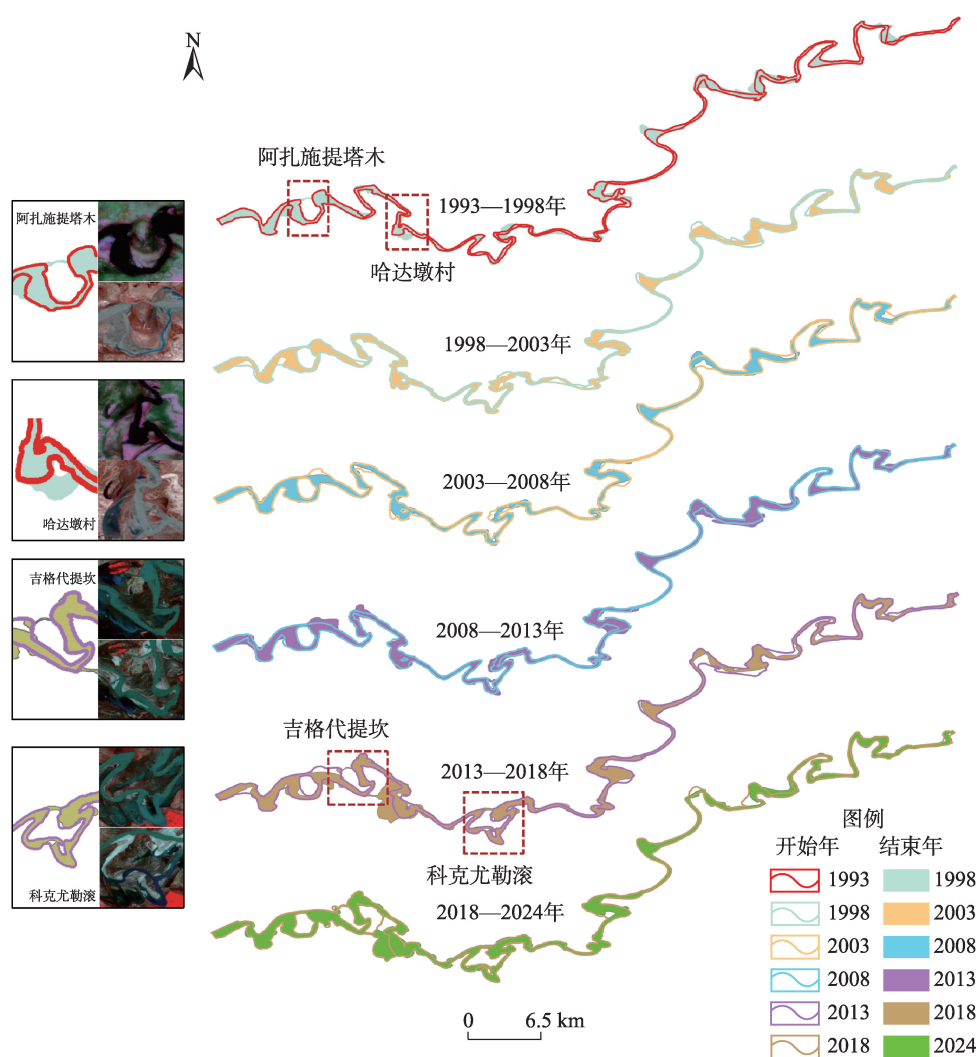


图8 1993—2024年研究区河岸线演变情况分布

Fig. 8 Spatial distribution of bank line evolution in the study area from 1993 to 2024

弃。2018—2024年绿色岸线与前期几乎重叠,反映出河道形态变化趋于稳定。

整体来看,研究期内河道表现出明显演变特征,断面持续拓宽、河湾摆动剧烈,期间共发生5次裁弯和3次主槽改道,形成典型“Ω”型河湾。河湾颈口缩窄至临界宽度后触发自然裁弯,揭示了研究区河流动力的高度活跃性。河道形态演变改变了水流格局,左岸迁移与冲刷侵占了周边农田,主槽改道则导致取水与生态引水效率下降。

**2.4.2 侵蚀和淤积状况** 河流的退化与演变可通过岸线的侵蚀与淤积特征体现。为探讨近32 a来克勒力克至英巴扎河段河岸的动态变化,对1993—2024年干流两岸的侵蚀与淤积进行了定量分析,通过叠加相邻年份岸线矢量图,构建变化多边形,将左、右

岸在各时期发生面积减少部分定义为侵蚀区,面积增加部分为淤积区,最终计算出对应侵蚀与淤积面积(表4)。

1993—2024年塔里木河克勒力克至英巴扎段两岸侵蚀与淤积过程呈现明显的阶段性波动(表4)。1993—1998年河道摆动频繁,洪水期流量波动大,两岸均处于强侵蚀状态,左岸侵蚀 $6.82\text{ km}^2$ ,右岸 $6.59\text{ km}^2$ ,淤积面积较小。1998—2003年主槽右移,左岸淤积增至 $5.22\text{ km}^2$ ,侵蚀下降,反映出水流变迁和滩地初步发育。2003—2008年侵蚀与淤积面积基本持平,河道趋于动态平衡。2008—2013年年径流量突增,流速增强,两岸侵蚀面积大幅上升,而淤积面积仅为 $0.21\text{ km}^2$ (左岸)和 $0.67\text{ km}^2$ (右岸)。此后,2013—2018年侵蚀强度明显减弱,两岸

表4 1993—2024年塔里木河干流克勒力克至英巴扎段沿岸线蚀淤变化

Tab. 4 From 1993 to 2024, the erosion and deposition changes along the coastline from Kelelik to Yingbazha in the main stream of the Tarim River were analyzed

时期	河岸	侵蚀/km <sup>2</sup>	淤积/km <sup>2</sup>
1993—1998年	左岸	6.82	0.96
	右岸	6.59	1.37
1998—2003年	左岸	3.06	5.22
	右岸	3.44	2.77
2003—2008年	左岸	1.97	2.57
	右岸	1.93	2.58
2008—2013年	左岸	5.26	0.21
	右岸	5.18	0.67
2013—2018年	左岸	1.92	3.54
	右岸	2.81	3.74
2018—2024年	左岸	3.25	2.11
	右岸	2.28	1.72

淤积面积分别上升到3.54 km<sup>2</sup>和3.74 km<sup>2</sup>,边滩扩张,部分弯道在此阶段已被截断,初步形成新的主槽通道,原主槽废弃。2018—2024年河道整体趋于稳定,仅局部区域仍存在轻微摆动或冲刷,演变速率明显减缓。

### 3 讨论

通过近32 a遥感监测与水文数据分析,揭示克勒力克至英巴扎河段在自然过程与人类活动共同作用下的演变规律。结果表明,该河段呈现出明显的蜿蜒化趋势,弯曲系数由2.20增至2.56,深泓线年均增长0.27 km。这一现象与塔里木河极端干旱区河道高活跃性的特征相符,同时,在较大来水过程中,凹岸近岸切应力上升、深泓向凹岸缓慢偏移,弯道半径随之减小,推动弯曲持续发育。

断面宽度变化显示明显的空间分异。弯道凹岸断面AA'拓宽达585%,顺直段断面保持稳定,反映了不同河段动力环境的显著差异,值得注意的是,在河道拓宽过程中,往往伴随流速下降、挟沙能力下调,易出现滩体生长与床面抬高,从而形成拓宽-减速-淤积的次级反馈。研究期间,五次裁弯事件均发生在高径流时期,表明水动力条件是触发河道改造的关键因素。裁弯新槽在贯通后迅速拓宽并快速稳定,体现了新主槽发育的高效性,这是由于水流侧向侵蚀使颈口束窄至临界阈值,进而触

发自然裁弯,裁弯后河道流程缩短,局部河段比降增大,短暂增强输沙能力,新槽在来沙回补下快速稳定。

河势演变呈现明显不对称性。深泓线整体北偏(年均0.1 km·a<sup>-1</sup>),左岸岸线增长量为右岸的3倍,共同证实了主槽向天山山脉方向迁移的趋势;分汊、合流控制段的流量再分配与局部束窄,提高了左侧主槽的沿程连续性,在高径流量下,这种连续性被放大。与既有研究对比,本河段的剧烈演变与塔里木河干流其他段落在河道摆动、冲淤交替及裁弯取直等方面表现出较好的一致性<sup>[19,21-22]</sup>,但本研究通过长时序监测,量化了平原蜿蜒段特有的阶段性演变模式。河道持续向天山山脉方向迁移已导致5个引水口废弃,直接影响沿岸农田与胡杨林的灌溉保证率。基于上述发现,建议在河流沿岸未修建堤防的河段加以措施,平衡裁弯阈值与河湾稳定性。

### 4 结论

本文选取塔里木河克勒力克至英巴扎河段作为研究对象,基于1993—2024年洪水期的Landsat系列遥感影像,对河段河道轮廓线、深泓线、河道宽度和岸线侵蚀和淤积面积的演变特征进行定量分析,主要得到以下结论:

(1) 研究河段以粉砂、细砂为主、抗侵蚀性低,在较大来水过程下凹岸侵蚀增强、深泓线向凹岸偏移,弯道半径减小,河道长度、弯曲指数同步增长,弯曲程度加大、侧向迁移加强,弯道持续发育。

(2) 从河道断面宽度来看,断面宽度整体增长趋势,弯道凹岸(断面AA')因持续冲刷,宽度从最小108.17 m增至741.39 m,增幅达585%;顺直、凸岸断面(CC'、EE'、HH')总体稳定,仅在强径流期出现短期波动;裁弯贯通段(DD'、KK')河宽迅速增至约180~259 m后趋于稳定。

(3) 深泓线整体向北(天山方向)迁移,年均速率0.1 km·a<sup>-1</sup>,2018—2024年为迁移峰值期(最大偏移2.62 km)。

(4) 岸线方面,左岸年均增速149.25 m·a<sup>-1</sup>,为右岸45.81 m·a<sup>-1</sup>的3倍,主槽左偏明显;1993—1998年岸线大幅收缩(左岸-6.18%,右岸-7.36%)与裁弯后河道顺直有关,2018—2024年左岸骤增16.65%,源于新河道发育、旧河道废弃。

## 参考文献(References):

- [1] 李玉建, 侍克斌, 严新军. 塔里木河干流泥沙治理途径初探[J]. 人民黄河, 2005, 27(1): 26-27. [Li Yujian, Shi Kebin, Yan Xijun. Preliminary study on sediment management approaches in the main stream of the Tarim River[J]. Yellow River, 2005, 27(1): 26-27. ]
- [2] 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 215-222. [Chen Yaning, Cui Wangcheng, Li Weihong, et al. Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 215-222. ]
- [3] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近50年来生态环境变化的驱动力分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 262-272. [Hao Xingming, Chen Yaning, Li Weihong. The driving forces of environmental change during the last 50 years in the Tarim River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 262-272. ]
- [4] 夏德康. 塔里木河干流泥沙运动及河道变迁[J]. 水文, 1998, 18(6): 43-48. [Xia Dekang. Sediment movement and channel change in the main stream of the Tarim River[J]. Journal of China Hydrology, 1998, 18(6): 43-48. ]
- [5] 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, 27(6): 19-25. [Wang Yangui, Hu Chunhong, Zhou Wenhao, et al. Study on river patterns of the Tarim River[J]. Journal of Sediment Research, 2002, 27(6): 19-25. ]
- [6] 王延贵, 胡春宏. 塔里木河干流河道整治的对策[J]. 中国水利, 2003, 23(7): 53-55. [Wang Yangui, Hu Chunhong. Study on essentiality and harnessing schemes in the Tarim River[J]. China Water Resources, 2003, 23(7): 53-55. ]
- [7] 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 Yangui, Hu Chunhong, Zhou Wenhao, et al. Evolution characteristics of Tarim River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(12): 27-33. ]
- [8] 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, 31(4): 21-29. [Hu Chunhong, Wang Yangui. Study on comprehensive regulation measures of the main stem Tarim River (I)—Fluvial processes[J]. Journal of Sediment Research, 2006, 31(4): 21-29. ]
- [9] 胡春宏, 王延贵. 塔里木河干流河道综合治理措施的研究(II)—干流河道整治与生态输水泥沙研究[J]. 泥沙研究, 2006, 31(4): 30-38. [Hu Chunhong, Wang Yangui. Study on comprehensive regulation measures of the main stem Tarim River (II)—Channel regulation and water transport measures for eco-environment[J]. Journal of Sediment Research, 2006, 31(4): 30-38. ]
- [10] 闫正龙, 汤国安. 塔里木河下游生态应急输水植被恢复的遥感监测[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 58-60. [Yan Zhenglong, Tang Guo'an. Remote sensing based monitor of vegetation recovery in lower reaches of Tarim River following implementation of emergent water transportation project[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(3): 58-60. ]
- [11] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 380-386. [Deng Mingjiang. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 380-386. ]
- [12] Yan Z L, Huang Q, Tian H F, et al. Remote sensing analyses of spatio-temporal changes of the ecological environment in the lower reaches of the Tarim River[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 679-687.
- [13] Sun Z, Chang N B, Opp C. Using SPOT-VGT NDVI as a successive ecological indicator for understanding the environmental implications in the Tarim River Basin, China[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010, 4(1): 043554.
- [14] 谭克龙, 王晓峰, 高会军, 等. 塔里木河流域综合治理生态要素变化的遥感分析[J]. 地理信息科学学报, 2013, 15(4): 604-610. [Tan Kelong, Wang Xiaofeng, Gao Huijun, et al. Analysis of ecological elements of comprehensive harnessing in Tarim River Basin using remote sensing[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(4): 604-610. ]
- [15] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析[J]. 地理信息科学学报, 2019, 21(3): 437-444. [Zhu Changming, Li Junli, Shen Zhanfeng, et al. Time series monitoring and comparative analysis on eco-environment change in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(3): 437-444. ]
- [16] 周龙, 杨鹏年, 王永鹏, 等. 塔里木河下游河段耗水特征与输水方式演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 144-154. [Zhou Long, Yang Pengnian, Wang Yongpeng, et al. Characteristics of water consumption and the evolution of water delivery methods in the lower reach of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 144-154. ]
- [17] Yu G A, Disse M, Huang H Q, et al. River network evolution and fluvial process responses to human activity in a hyper-arid environment—Case of the Tarim River in Northwest China[J]. Catena, 2016, 147: 96-109.
- [18] 余国安, 李志威, 黄河清, 等. 人类活动影响下的干旱区河流地貌演变——以塔里木河为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 183-192. [Yu Guo'an, Li Zhiwei, Huang Heqing, et al. Human impacts on fluvial processes in a very arid environment—case of Tarim River in China[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 183-192. ]
- [19] 郑刚. 塔里木河干流阿拉尔河段冲淤变化研究[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(20): 118-120, 124. [Zheng Gang. Study on erosion and deposition change in Alar Reach of Tarim River[J]. Heilongjiang Science, 2024, 15(20): 118-120, 124. ]
- [20] 郭庆超, 王新平, 周军, 等. 塔里木河干流近期治理后水沙运动规律研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. [Guo Qingchao, Wang Xinping, Zhou Jun, et al. Study on Water and Sedi-



- ment Movement Patterns in the Main Stream of the Tarim River After Recent Regulation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. ]
- [21] 高久洲, 李琳, 戴文鸿, 等. 基于数字岸线系统分析塔里木河英巴扎至乌斯满河道演变[J]. 泥沙研究, 2024, 49(5): 42–49. [Gao Jiuzhou, Li Lin, Dai Wenhong, et al. Evolution characteristics of the Tarim River from Yingbazha to Wusiman based on the digital shoreline system[J]. Journal of Sediment Research, 2024, 49(5): 42–49. ]
- [22] Li Z, Yu G A, Brierley G J, et al. Migration and cutoff of meanders in the hyperarid environment of the middle Tarim River, north-western China[J]. Geomorphology, 2017, 276: 116–124.
- [23] Gurnell A M. Channel change on the River Dee meanders, 1946–1992, from the analysis of air photographs[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1997, 13(1): 13–26.
- [24] 梅艳国, 王随继. 1977年以来黄河临河段河岸冲淤变化及河道萎缩速率[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1509–1519. [Mei Yanguo, Wang Suiji. Variation of channel lateral erosion/accretion and channel shrinkage rate in the Linhe Reach of the Yellow River since 1977[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1509–1519. ]

## Characteristics of river channel evolution in the section of the Tarim River mainstem between Kelelik and Yingbazha

TAN Fangjie<sup>1,2</sup>, LI Lin<sup>1,2</sup>, ZONG Quanli<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>4</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 4. Tarim River Basin Mainstream Water Resources Management Centre, Yuli 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** To explore the evolution characteristics of erosion and deposition in the main stream of the Tarim River from Kelelik to Yingbazha, this study analyzes typical river channel parameters, including section width, thalweg length, curvature index, and shoreline length, based on Landsat satellite imagery and hydrological station water and sediment data during the flood periods from 1993 to 2024. In the past 32 years, the bending coefficient of the river channel has increased from 2.20 to 2.56, the average annual growth of the thalweg length is 0.27 km, and the meandering trend of the river channel has intensified. The maximum widening range of the upstream section of the river section exceeds 585%, whereas the middle and lower reaches are relatively stable. The thalweg shifts northward, with an average annual migration rate of  $0.1 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ , and the local bending causes the maximum swing amplitude of the main trough to exceed 3 km. Over the 32 years, the main stream of the Tarim River experienced five cycles of bending and straightening, which led to the adjustment of the main channel and the deviation of the flow direction, resulting in the abandonment of the five water inlets. The average annual growth rate of the left bank shoreline length is  $0.149 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ , which is three times that of the right bank, and the main channel continues to shift to the left bank. River meandering and erosion may threaten the irrigation guarantee rate and flood control safety of coastal farmland and ecological forests. The results of this study can serve as a basis for the planning and design of river flood control and regulation projects from Kelelik to Yingbazha.

**Keywords:** mainstream of Tarim River; evolution characteristics; Landsat satellite image; plain-type river