

# 塔里木河河槽形态调整特点及影响因素

袁寄望,宗全利,冯 博

(石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000)

**摘要:**为确定塔里木河干流河槽形态调整过程及特点,根据 2005—2013 年实测水沙数据及断面资料等,分析了塔里木河河槽形态演变特点及影响因素。结果表明:2005—2009 年中上游河段河槽逐渐萎缩,平滩面积总体呈下降趋势;2010—2013 年汛期水流冲刷强度增大,游荡型河段平滩河槽形态主要体现为横向调整,断面趋于宽浅,过渡段相对稳定,弯曲型河段汛期水流冲刷强度变化趋势与游荡型河段一致,期间平滩河宽变化较小,断面朝窄深方向发展;2009—2011 年游荡型河段和过渡段纵比降减幅分别为 1.7% 和 3.0%,河床比降趋于调平,弯曲型河段纵比降增幅为 1.6%,河床略微冲刷;水流冲刷强度能够较好地响应河槽形态变化,可用于预测塔里木河平滩河槽形态冲淤情况。中上游河岸土体在近岸水流作用下容易分解,稳定性差,在一定程度上加快了河床调整过程。

**关键词:**河槽形态;河床调整;水沙条件;河岸土体组成;塔里木河

中图分类号:TV147

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)03-0024-09

**Characteristics and influencing factors of channel geometry adjustments of Tarim River//YUAN Jiwang, ZONG Quanli, FENG Bo( College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)**

**Abstract:** In order to determine the process and characteristics of channel geometry adjustments of the Tarim River, the morphological evolution features and influencing factors were analyzed based on the measured flow and sediment data as well as the mainstream cross-sectional profiles from 2005 to 2013. The results show that the channel geometry in the middle and upper reaches shrank gradually from 2005 to 2009, with a decreasing trend of the bankfull area. The fluvial erosion intensity during flood seasons was enhanced from 2010 to 2013, resulting in a lateral adjustment for the bankfull channel geometry in the braided reach characterized with wider and shallower cross-sections. The adjustment of the transition reach was relatively stable. Variation trend of the fluvial erosion intensity during flood seasons in the meandering reach was similar to that in the braided reach, and the cross-sections developed to be narrower and deeper with slight bankfull width variation. From 2009 to 2011, the longitudinal channel slope in the braided reach and the transition reach decreased by 1.7% and 3.0%, respectively, resulting in a flat river bed slope. However, it increased by 1.6% in the meandering reach with little fluvial erosion. Fluvial erosion intensity can better respond to the channel geometry variation, which can be used to predict erosion and deposition of the bankfull channel. In addition, the stability of the river bank soil is poor and the river bank can be easily decomposed by the action of the near shore water flow, which accelerates the adjustment process to some extent.

**Key words:** channel geometry; channel adjustment; flow and sediment conditions; soil composition of a river bank; Tarim River

塔里木河(以下简称塔河)干流河段类型可分为游荡型,过渡段和弯曲型 3 种。长期存在的主要现象是河床冲淤变化十分频繁,局部河势摆动较大等<sup>[1]</sup>。近几十年来,由于气候变化和人类活动的影响,来流水沙条件发生了很大变化,尤其对人类活动的响应更为敏感<sup>[2-4]</sup>;2005—2009 年汛期水量呈逐

年递减,减幅约为 75%;2010—2013 年汛期水量增加,增幅在 272%~561%,但含沙量变化不大,可见汛期水量变化比较显著。冲积河流的河床形态调整主要取决于来水量、来沙量及其过程<sup>[5]</sup>,因此塔河干流河床形态也经历着新的冲淤调整过程;2005—2013 年塔河干流河段河槽先经历明显的持续萎缩,

基金项目:国家自然科学基金(51569029);石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZX201529);水利部黄河泥沙重点实验室开放课题(2015005)

作者简介:袁寄望(1992—),女,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:2233453659@qq.com

通信作者:宗全利(1979—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:quanli1871@126.com

而后持续冲刷。总体上,目前塔河河床形态调整仍然十分剧烈。

掌握塔河干流河段的河槽形态调整规律是塔河治理和维持水资源可持续利用的基础,在以往治理塔河工作中已经取得了很多重要成果。较早的有冯起等<sup>[6]</sup>根据塔河干流河道上游水沙条件,分析了河道的冲淤变化,提出了河道主槽摆动频繁,涨水冲刷,落水淤积等特点。随着水沙数据逐渐完善,研究者对塔河干流河床形态调整的研究更加深入。王延贵等<sup>[7-9]</sup>根据 1957—2000 年的水沙数据及对地形资料的对比分析,对干流河道的水力几何形态、河相关系及河势变化等方面进行了研究,分析了典型断面形态随流量的变化趋势,但没有涉及综合水沙条件对河床形态调整的影响。在河槽形态随来流水沙的变化过程方面,国内外有大量比较完善的研究成果,如 Leopold 等<sup>[10]</sup>通过分析美国西部大量平原河流的水沙资料,建立了河槽形态与相应年均流量之间的经验公式;He 等<sup>[11]</sup>用 2 年一遇的流量预测了多个断面的平滩河槽形态;也有学者指出平滩河槽形态可以用造床流量、床沙中值粒径和河床纵比降表示<sup>[12-14]</sup>。上述研究都是针对平衡状态下的冲积河流。对于经历了河床形态剧烈调整的非平衡河流,冯普林等<sup>[15]</sup>在 1973—1997 年水沙及断面资料的基础上,分析总结了黄河下游不同河段河槽横断面形态随时间和流量变化的特征,建立了河槽横断面形态指标与河段进口前期水沙系列的定量关系;费祥俊<sup>[16]</sup>提出来水来沙对黄河下游河槽形态及河型有塑造作用,并推出了河槽形态及河型与来水来沙之间的定量关系;吴保生等<sup>[17-18]</sup>认为河槽形态调整受前期水沙条件累积的影响,建立了平滩面积与前期几年来水量和来沙系数之间的计算公式,且取得了较好的相关关系;夏军强等<sup>[19-20]</sup>建立了平滩河槽形态参数与前期 5 年平均的汛期水流冲刷强度之间的经验关系,并用于预测该河段平滩河槽形态随水沙条件的变化趋势。以上研究成果为探究塔河河槽形态调整特点提供了重要参考依据。

本文采用 2005—2013 年塔河干流实测的水沙数据及典型断面汛后实测地形资料,确定水沙变化特点及典型断面形态变化过程,然后在分析河床形态与上游水沙条件之间的关系时,引入相应关系式,综合水沙条件,全面考虑汛期来水来沙对河槽形态的影响,以更加准确地描述河槽形态调整规律。

## 1 近期塔河干流河床演变特点

### 1.1 河段概况

塔河是中国流程最长的内陆河,从三源汇合处(肖夹克)至恰拉水文站,河段长度约为 900 km。由于沿程水量损失和工程引水,平均年径流量和输沙量沿程递减。恰拉水文站以下河段径流较小,水流已不是河道地貌演变的主要驱动力,本文暂不分析该河段。塔河干流发育辫状和蜿蜒 2 种河道平面形态。辫状河型主要分布在肖夹克至新其满河段,长约 250 km;典型的蜿蜒河型主要分布在曲毛格金下游<sup>[21]</sup>。干流来水的控制站主要有阿拉尔水文站、新其满水文站、英巴扎水文站、乌斯满水文站及恰拉水文站。汛期河床经常发生显著的垂向冲淤变化和横向摆动。塔河中上游河段基本情况如图 1 所示。

塔河三源汇合口到新其满水文站上游 47 km 的其满水库引水口为典型的游荡型河段,长约 190 km<sup>[7]</sup>。该河段总体为宽浅型,断面形态以“U”形为主。汛期时,洪水漫溢,河漫滩发育,河道边界条件经常处于变动状态,使得主槽位置极不稳定,河势多变<sup>[1]</sup>,河槽断面多为复式断面。图 2(a)为阿拉尔水文站附近 2011 年汛后典型断面,由图 2(a)可知,该河段右岸低滩滩地宽 91 m,边滩滩地宽约 520 m,高滩与主槽直接相邻,主槽区域宽度约为 1 280 m,为宽浅型河段。图 2(b)为三源汇合口附近典型断面,由图 2(b)可知,该河段出现较多心滩,一个断面中有两个或 3 个主槽,高滩和河槽的高程差并不大,且边滩和低滩高程与常水位相差不多,是泥沙淤积的主要位置,河槽和滩地地貌特征很难辨认。

其满水库引水口至帕满水库河段长约 70 km,

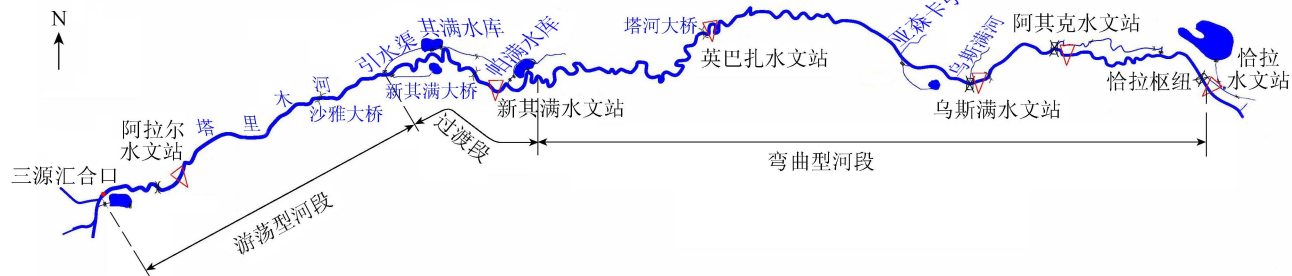
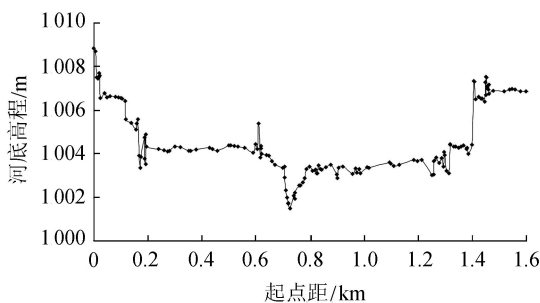
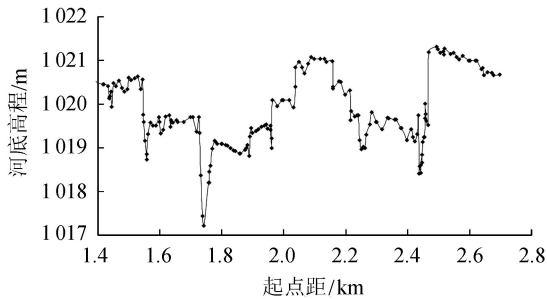


图 1 塔河中上游河段示意图



(a) 阿拉尔水文站



(b) 三源汇合口

图2 典型断面主槽形态

为游荡型向弯曲型发展的过渡河段,兼具游荡型和弯曲型河段的典型特征,河槽宽度与游荡型河段相比较较窄,主槽形态明显,主流摆动比较稳定<sup>[1]</sup>。

帕满水库至恰拉水文站河段长约 640 km,为弯曲型河段,河道外形蜿蜒曲折,河道宽度进一步缩窄,主流横向摆动不明显,河床主槽比较稳定,但是部分河段还是存在着显著的冲淤现象<sup>[1]</sup>。

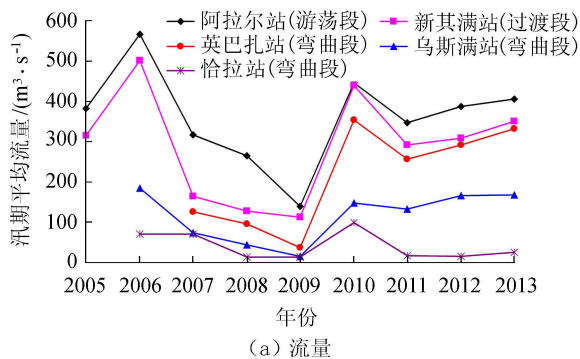
### 1.2 水沙特性变化

为确定塔河中上游河段平滩河槽形态调整特点,对该河段的水文数据进行分析。1990—2000 年平均年径流量为 45.8 亿  $m^3$ ,汛期径流量占全年的 76%;2005—2013 年平均年径流量为 45.2 亿  $m^3$ ,汛期径流量占全年的 79%;相比 1990—2000 年,平均年径流量有所减小,汛期水量占比增大。2005—2013 年汛期水量占比基本稳定,其中 2005—2009 年平均汛期径流量为 28.2 亿  $m^3$ ,占全年的 79%;2010—2013 年平均汛期径流量为 45.5 亿  $m^3$ ,占全年的 80%,比 2005—2009 年增大 61.3%。2005—2013 年汛期月均含沙量变化幅度不大,2005—2009 年汛期月均含沙量为 2.2  $kg/m^3$ ,2010—2013 年在流量有所增大的情况下,含沙量增大到 2.5  $kg/m^3$ 。总体上,近年来塔河干流含沙量变化较缓和,水量增大程度较剧烈。

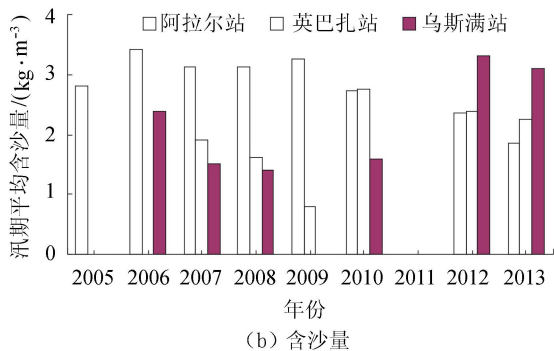
可用各水文站实测的汛期水沙数据代表进入干流的水沙条件<sup>[20]</sup>。为进一步分析塔河汛期水沙变化特点,图 3(a) 给出了 2005—2013 年各水文站汛期日均流量的逐年变化过程:2005—2009 年中上游河段汛期来流量呈逐年递减趋势,减幅在 63% ~ 90%;

2010—2013 年汛期水量增大,但期间各年汛期流量变幅不大;从图 3(a) 中还可看出水量沿程分配情况,2005—2013 年阿拉尔站平均汛期流量为 357.1  $m^3/s$ 、新其满站为 284.7  $m^3/s$ 、英巴扎站为 212.4  $m^3/s$ 、乌斯满站为 111.9  $m^3/s$ 、恰拉站为 40.5  $m^3/s$ 。上述相邻水文站之间的多年平均汛期流量减少量分别为 72.4  $m^3/s$ 、72.2  $m^3/s$ 、100.6  $m^3/s$ 、71.3  $m^3/s$ ,可见英巴扎下游河段流量递减幅度较大。

图 3(b) 为 2005—2013 年各个水文站汛期平均含沙量的逐年变化过程:2005—2009 年游荡型河段(阿拉尔站)汛期平均含沙量明显大于弯曲型河段(英巴扎站、乌斯满站);且整个河段含沙量变化趋势与流量变化趋势基本一致,都呈沿程减小趋势;2012—2013 年弯曲型河段汛期平均含沙量增大,尤其是乌斯满站附近河段,含沙量增大显著,多年平均汛期含沙量从 2005—2009 年的 1.8  $kg/m^3$  增大到 2.7  $kg/m^3$ 。



(a) 流量



(b) 含沙量

图3 各水文站汛期日均流量和含沙量

### 1.3 横向形态调整

平滩河槽形态变化可用平滩河槽形态特征参数(平滩河宽、水深、面积及河相系数)来描述。计算这些参数首先需要确定主槽范围及平滩高程<sup>[22]</sup>。由于塔河游荡型河段断面形态不规则,确定各断面的主槽区域及高程有一定困难,本文通过绘制相邻年份固定断面的汛后地形来确定各断面平滩高程,主要依据以下原则:①当主槽滩唇明显时,以两岸滩唇较低者为平滩高程;②当主槽滩唇明显,但与相邻断面的平滩高程差距较大时,通常考虑相邻断面的



滩唇高度,进行综合确定;③当主槽滩唇不明显或出现二级滩唇时,则参考该断面相邻测次的平滩高程,尽可能使滩唇高度不发生大的变动。

根据上述原则,确定了位于干流上5个典型水文断面2005—2011年汛后的主槽形态参数。河槽冲淤主要反映为平滩面积的变化<sup>[23]</sup>,故图4给出了不同断面的平滩面积变化。由图4可知,2005—2009年各断面的平滩面积总体上呈下降趋势,减幅在60.5%~97.3%;2010—2011年随着来水量的增大,河槽发生冲刷,2011年各断面的平滩面积累计增大(较2009年)143.9%~453.4%。可见由于2007—2009年径流量的持续偏枯,以及2010—2011年径流量的持续增大,平滩河槽形态调整十分剧烈。为了进一步了解平滩河槽冲淤调整过程,选取了2个典型断面作为代表:塔河上游的阿拉尔断面,其形态变幅较大,能够较好地响应水沙条件变化;英巴扎断面,其平滩面积相对稳定,主槽区域易于确定。

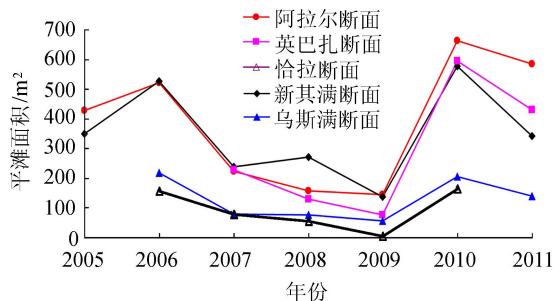
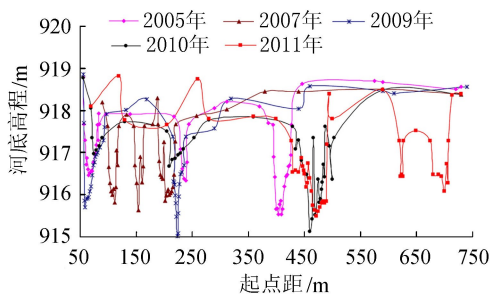
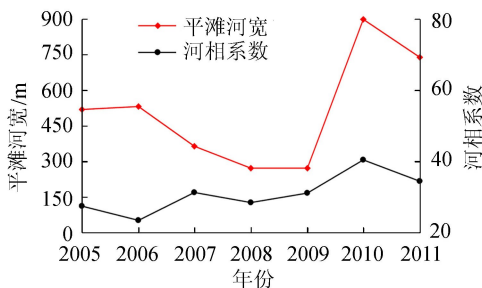


图4 不同断面平滩面积变化

阿拉尔断面2005—2011年汛后的平滩河槽形态、平滩河宽及河相系数的变化过程见图5。由图5可知,该断面形态变化复杂,2005—2009年河道主



(a) 平滩河槽形态变化过程

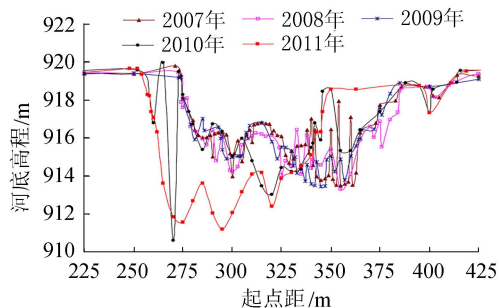


(b) 平滩河槽形态参数变化

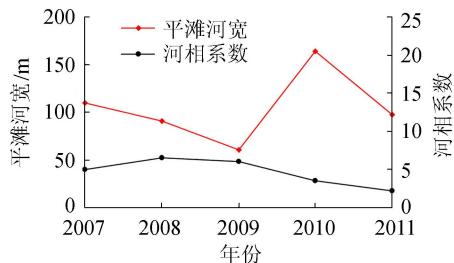
图5 阿拉尔断面平滩河槽形态及其参数变化

槽逐渐萎缩,平滩河宽减幅约为47.7%,平滩水深变幅不大,基本维持在0.53~0.98m之间,平滩面积减小了66.1%;2010年汛后断面右岸发生冲刷,左岸淤积,2011年右岸累计崩退(较2009年)400m,左岸淤积近70m,平滩河宽增加了330m,相应的平滩面积增大了303.4%。河相系数从2009年汛后的31.1增大到2011年的34.4,由于横向展宽显著,断面朝向宽浅方向发展。

弯曲型河段河槽形态变化相对稳定,图6为英巴扎断面2007—2011年汛后的平滩河槽形态、平滩河宽及河相系数的变化过程。由图6可知,2007—2009年河槽形态总体上变化不大,平滩河宽维持在60.9~110.0m,平滩面积在77.9~230.3m<sup>2</sup>之间变化;自2010起,河槽形态调整显著,与过去几年比较,2011年汛后该断面左岸累计崩退约18m,右岸淤积30m,虽然河宽缩窄,但平滩面积相比2009年增大了453.4%;河相系数从2009年的6.1减小到2.2,减幅达到63.9%,河槽形态趋于窄深。



(a) 平滩河槽形态变化过程



(b) 平滩河槽形态参数变化

图6 英巴扎断面平滩河槽形态及其参数变化

为了更准确地描述河槽形态调整特点,对中上游河段断面2009年和2011年汛后的平滩河槽形态特征参数进行对比分析,河相系数计算结果列于表1。结果表明:当河槽发生冲刷时,游荡段河宽增大,相比2009年,2011年河相系数由6.0~43.3增大到16.6~56.2,增大了4%~192%,断面趋于宽浅;弯曲型河段平滩河宽变化不大,河相系数减小了2%~70%,断面趋于窄深;所选典型断面的平滩河槽形态调整过程及特点符合河段的河槽形态调整规律,且近期塔河中上游河段平滩河槽形态的调整,主要表现为平滩河宽的变化。

表 1 塔河干流中上游河段典型断面的河相系数

游荡型河段			过渡段			弯曲型河段		
距三源汇合口 距离/km	河相系数		距三源汇合口 距离/km	河相系数		距三源汇合口 距离/km	河相系数	
	2009 年	2011 年		2009 年	2011 年		2009 年	2011 年
5	27.6	34.5	207	16.8	17.0	495	6.1	2.2
15	18.3	43.5	213	20.4	55.8	530	8.2	8.0
20	24.2	34.7	219	47.6	25.6	544	5.1	5.0
25	13.1	16.6	225	19.8	14.1	575	4.0	3.4
28	15.0	24.2	237	12.1	9.0	584	5.7	5.3
35	28.8	47.2	238	11.6	8.7	595	9.5	5.0
48	31.1	34.4	281	6.9	6.8	606	4.4	4.5
60	20.9	51.8				617	3.3	3.1
63	26.8	41.7				619	5.7	5.3
75	21.1	25.9				636	5.1	4.9
85	21.3	22.1				669	13.2	4.0
121	32.1	31.1				674	7.4	13.6
163	43.3	50.2				699	4.6	6.2
172	16.8	21.3				710	2.3	2.2
189	25.6	56.2				724	3.5	3.0
203	6.0	17.5				748	2.8	2.6

1.4 纵向形态调整

当来流水沙条件及边界条件与河道的输水输沙、断面过流能力不平衡时,河床在调整冲淤过程中,河床比降会发生相应变化,因此纵剖面的调整也是河槽形态演变的重要原因<sup>[1]</sup>。和 2000 年以前相比,塔河干流河道的河床纵比降发生了新的调整。

2009—2011 年干流河段纵向冲刷,淤积分布不均匀,整个河段比降基本变化不大,维持在 0.0160% 左右,相比往年有所减小。为详细分析各河段的冲淤情况,图 7 给出了不同河段 2009 年和 2011 年深泓线沿程变化情况,通过对沿程各断面深泓线高程与距拦河闸距离进行线性回归,得到各分河段比降。

图 7(a)为游荡型河段 2009—2011 年深泓线的变化情况,自三源汇合口到阿拉尔化工厂上游 1 km 河段深泓高程变化不大;阿拉尔化工厂上游 1 km 到科克库勒村河段,深泓下切较为突出,平均冲深达 0.64 m;科克库勒村到一棵树河段,冲淤过程沿河段交替进行,整个河段比降在 2011 年有所减小,从

2009 年的 0.023 5% 下降到 0.023 1%,由于冲刷距离较短,河道比降变化不大,并且这种趋势继续影响过渡段的主槽形态演变。

图 7(b)为过渡段 2009—2011 年深泓线的变化情况,纵比降比游荡型河段略有减小,但其河槽形态调整仍然与上游来水来沙条件有关,上游冲刷带来的泥沙在过渡段内大量落淤,导致纵比降变幅比游荡型河段大,河段比降从 2009 年的 0.023 3% 减小为 0.022 6%。

图 7(c)为弯曲型河段 2009—2011 年深泓线的变化情况,由于上游来水量增加,2011 年进入弯曲型河段的汛期水量是 2005—2008 年平均汛期水量的 1.7 倍(2009 年是枯水年,暂不将其考虑在内),而来沙量和上游相差不大,故弯曲型河段受上游来水的影响较大,河段比降从 2009 年的 0.012 4% 增大到 0.012 6%。

综上所述,2009—2011 年水沙条件的改变引起了河床纵剖面的调整,但河床纵向冲淤远不如横向

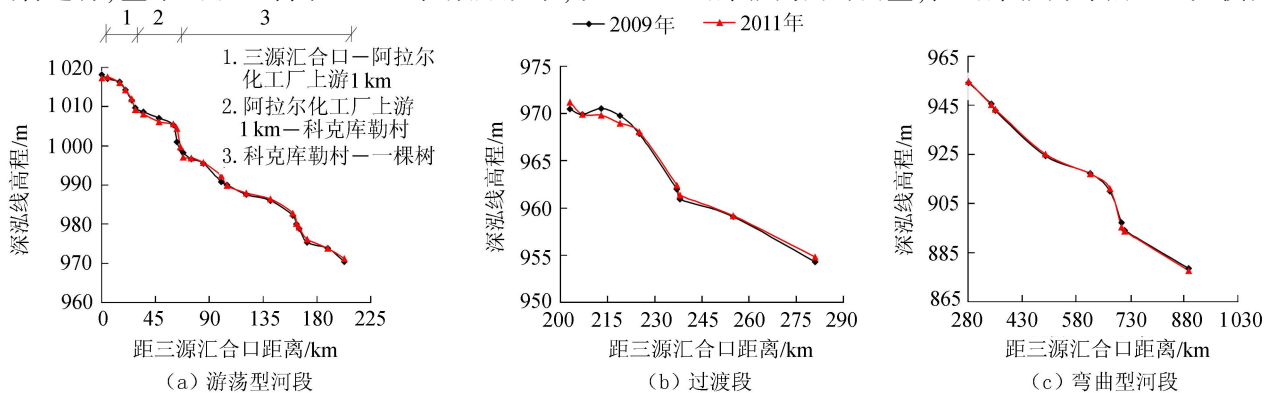


图 7 各河段深泓沿程变化

变形剧烈。对于河床纵剖面,如果河槽土体组成颗粒较细且均匀,冲刷时不易形成粗化层,则冲刷距离较短,河床纵比降有变缓的趋势,但若水少沙多,则河床纵比降变陡<sup>[24-25]</sup>。因此,游荡型河段在水多沙少及冲刷发展距离较短的情况下,河床纵比降趋于调平;这种变化趋势延伸到过渡段,过渡段纵比降进一步趋于调平;弯曲型河段同样受上游水沙量变化的影响,进入的水沙相比上游而言,属于水少沙多的情况,则纵比降有所增大,河床有轻微冲刷的现象,但调整幅度小于游荡型河段及过渡段。

## 2 影响河床调整过程的因素

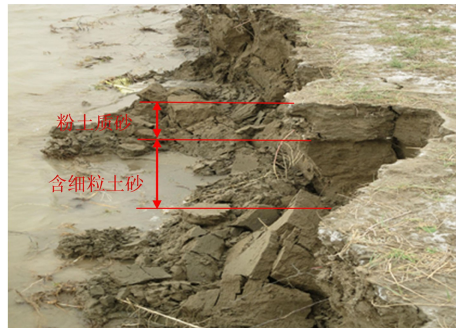
### 2.1 河床土体组成分析

河道主槽冲淤过程不仅与来流水沙条件有关,还与河岸土质条件(土体组成及其物理力学特性等)密切相关<sup>[26]</sup>。河床土质组成条件在一定程度上决定着河势的发展及纵横断面的调整形式,影响着下游断面形态的塑造<sup>[27]</sup>。通过分析塔河游荡段河床形态调整特点,得知该河段冲刷时右岸崩退严重,左岸淤积,所以只考虑右岸河床土体组成,而弯曲型河段主要表现为凹岸崩退,凸岸淤积长规律,土体组成应根据具体情况分析。本文在前人研究成果的基础上对河岸土体进一步探究,综合多种因素,深入分析河岸侵蚀特点。

图8为2016年5月实地拍摄的河道现状照片,可以看出,位于塔河上游局部河段的河床在水流冲刷作用下,河岸出现崩塌现象。对河岸冲刷较为严重的



(a) 阿拉尔新大桥附近



(b) 沙雅大桥附近

图8 塔河上游河岸侵蚀现状(2016-05-24)

河段进行了现场取样,分别在阿拉尔新大桥,沙雅大桥等6个不同河段取样,每个取样点用环刀取样并进行现场称重,所有原状土体用铁皮密封,铁皮筒直径为0.11 m,高度为0.25 m,土样包括28筒原状土。

通过典型河岸土体现场取样与室内土工试验情况,确定了土体基本物理性质、土体力学特征以及河岸土体的垂向组成。图9为塔河中上游河岸泥沙级配构成,依据土体分层取样结果,塔河中上游河段河岸表层土体主要由粉土质砂和含细粒土砂组成,0~2.5 m为黏土和粉细砂互层,2.5~20.0 m以粉细砂为主,其中三河源、阿拉尔新大桥、托帕可科其提村、琼吾斯库木及沙雅大桥位于塔河上游,床沙中值粒径为0.064~0.183 mm,泥沙较细,抗冲刷能力较弱,主槽处的泥沙相比河岸较粗,抗冲刷能力比河岸土体强。土体物理力学特性表明,无植被覆盖的土体天然状态时内摩擦角为30.72~33.93°,黏聚力为3.14~16.51 kPa,含水率为19.84%~30.21%,干密度为1.34~1.61 g/cm<sup>3</sup>,所取断面含水率均较高,且干密度相对较小,表明土体单位体积内土颗粒较少,相对松散,对应的黏聚力小,土体容易冲刷。故随着2010—2011年汛期水量的增大,必然会引起近岸及河床的持续冲刷。又由于主槽河床的抗冲性较强,河床形态调整主要表现为平滩河宽的变化。中游弯曲型河段部分河岸土体组成没有垂向分层结构,主要由级配不良砂组成,如二师31团4连位于中游的下游河段,中值粒径为0.131~0.193 mm,河岸泥沙颗粒较粗,土体的含水率和干密度与上游相比,在其变化范围之内,而黏聚力降低,河床形态调整更容易受水沙变化的影响。由于局部河段护岸工程的作用,在一定程度上限制了平滩河宽的变化,河床在水流的长期冲刷下不断冲深下切。

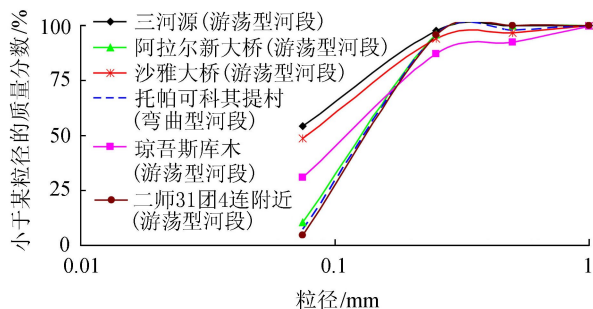


图9 塔河各河段泥沙级配构成

### 2.2 水流冲刷强度

Xia等<sup>[28]</sup>研究荆江河段河槽形态调整特点的有关成果表明,平滩河槽形态调整与前期水沙条件存在很大的相关性,来流水沙条件可以用汛期的水流冲刷强度表示,并建立了河段汛期平均的水流冲刷强度经验



公式用来反映平滩河槽形态随来流水沙的调整变化:

$$\bar{F}_f = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} \frac{Q_j^2}{S_j \times 10^8}$$

式中: $\bar{F}_f$ 为汛期水流冲刷强度; $N_f$ 为汛期的总天数(塔河干流河段汛期一般在6—9月); $Q_j$ 、 $S_j$ 分别为汛期的平均流量和悬移质含沙量。

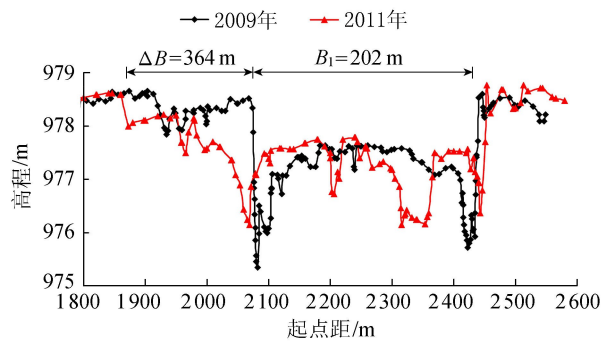
采用2005—2013年塔河干流各水文站来水来沙数据资料,确定每个河段的汛期范围、汛期天数和悬移质含沙量,进一步计算出每年的水流冲刷强度如表2所示。

表2 塔河干流汛期平均流量、含沙量及水流冲刷强度

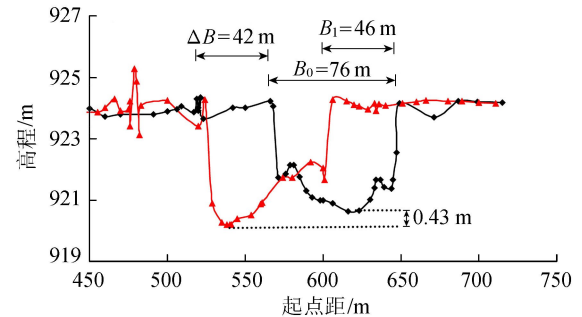
年份	游荡型河段			弯曲型河段		
	$Q/$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$S/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$\bar{F}_f$	$Q/$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$S/$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$\bar{F}_f$
2005	382.7	2.8	0.00059			
2006	566.3	3.4	0.00098	183.6	2.5	0.00019
2007	316.2	3.1	0.00035	96.6	1.6	0.00006
2008	264.4	3.1	0.00027	68.1	1.8	0.00003
2009	139.3	3.3	0.00006	36.4	0.8	0.00002
2010	446.2	2.7	0.00096	254.7	2.2	0.00045
2011	346.8			196.1		
2012	388.0	2.4	0.00086	253.6	2.3	0.00030
2013	405.3	1.9	0.00130	256.3	2.7	0.00030

从表2中可以看出,2005—2009年游荡型河段汛期平均含沙率变化不大,基本维持在 $3.0 kg/m^3$ 左右,而水量却大幅度逐年减小,结合汛期水流冲刷强度公式可知,水量减小会使水流冲刷强度降低,因此水流冲刷强度呈逐年减小的趋势,减幅约为89.8%。2010年水量剧增,且2010—2013年每年水量变化不大,虽然水量相比2009年之前有所增大,但平均汛期含沙量减小到 $2.3 kg/m^3$ 。河流含沙量降低,沙量补给不足,造成河床冲刷加剧<sup>[29]</sup>,因此水流冲刷强度增大。由于水流冲刷强度增大,位于游荡型河段的海娄牧场断面2011年河宽累计崩退大约202 m,河宽增加,水深减小,使得平滩河槽形态趋于宽浅(图10(a),图中 $B_0$ 为2009年的平滩河槽宽度, $B_1$ 为主槽右岸自2009年到2011年的累计河岸淤积宽度, $\Delta B$ 为主槽断面左岸自2009年到2011年的累计河岸崩退宽度),并可见 $\Delta B$ 的变化可反映水沙条件对河床形态调整的影响。比较冲刷强度的大小,可以预测在2012—2013年此断面仍然处于持续冲刷状态,河床形态调整进一步加剧。

各河段2005—2013年平均汛期水量沿程变化情况有所不同,水量沿程变幅较大,流经阿拉尔站的汛期水量为37.073亿 $m^3$ ,流经恰拉站的水量只有4.753亿 $m^3$ ,水量流失原因主要是河道损失和灌溉引水;其中,河道损失水量占66.6%,而灌溉引水只占33.4%。由此可知,河道大部分损失的水量显著地改



(a) 海娄牧场处主槽断面



(b) 亚森卡得引水口上游2 km附近处主槽断面

图10 典型断面平滩河槽形态变化

变了河床形态,期间各个河段汛期水量沿程损失程度不同,游荡型河段、过渡段及弯曲型河段水量损失分别为7.420亿 $m^3$ 、8.886亿 $m^3$ 及16.034亿 $m^3$ ,单位河长的水量损失分别为:游荡型河段0.039亿 $m^3/km$ 、过渡段0.034亿 $m^3/km$ 、弯曲型河段0.040亿 $m^3/km$ ,弯曲段沿程损失水量较大,水流冲刷强度减弱也较为明显。结合表2分析可知,2005—2009年弯曲型河段相比游荡型河段汛期水量及沙量都有所减小;2010—2013年平均汛期水量是2005—2009年的2.5倍,且2010年的水流冲刷强度迅速增大到2009年的22倍。同样由于水流冲刷强度增大,河槽形态发生一定程度的调整,如位于亚森卡得引水口上游2 km附近的主槽断面自2009—2011年主槽右岸宽度累计缩窄约46 m,左岸崩退近42 m,深泓处大约冲深0.43 m(图10(b))。

以往的研究结果表明平滩河槽形态调整与综合水沙条件有较好的相关性,且二者之间存在幂函数关系<sup>[30]</sup>。建立5个典型断面的平滩河槽形态参数与汛期水流冲刷强度的函数关系如表3所示。

表3 不同水文断面的河槽形态参数

河段	典型断面	相关系数 $R^2$		函数指数	
		平滩河宽	平滩水深	平滩河宽	平滩水深
游荡型河段	阿拉尔	0.81	0.83	0.3661	0.1888
	过渡段	0.87	0.74	0.4077	0.2441
	英巴扎	0.89	0.98	0.2802	0.3350
弯曲型河段	乌斯满	0.71	0.87	0.2792	0.1694
	恰拉	0.36	0.96	0.0208	0.4072

由表3可知,除恰拉水文断面的平滩河宽与汛

期水流冲刷强度的相关性较弱,其余各断面的平滩河宽、平滩水深均与水流冲刷强度有较高的相关程度,能较好地响应水沙条件变化。分析其原因,由于弯曲型河段下游河道水量沿程损失比较严重,为有效解决这个问题,加强了河道护岸工程,故当来水量增大或减小时,水深的变化更能代表河床形态调整;此外还可看出,各断面平滩河宽、平滩水深的函数指数均大于0,表明平滩河槽形态参数与汛期水流冲刷强度呈正相关。

### 3 结论

a. 2005—2013年塔河中上游河段平滩河槽经历了持续萎缩及持续冲刷的过程;2005—2009年各典型断面的平滩面积减小,减幅在60.5%~97.3%;2010—2013年河槽发生冲刷,游荡型河段的平滩河槽形态以横向调整为主,断面朝宽浅方向发展,相比游荡型河段,过渡段河槽形态调整幅度有所减小,弯曲型河段河槽形态主要体现为平滩水深变化,河宽变幅较小,河槽形态变窄变深;2009—2011年塔河整个上游河段近期纵比降趋于调平,中游河段河床略微冲刷。

b. 塔河干流中上游河段河岸土体主要由粉土质砂及含细粒土砂组成,其中,中游部分河段河岸土体由级配不良砂组成,土体在近岸水流冲刷下容易分解,抗冲性差,稳定性较小,进一步加剧了河床形态调整。

c. 汛期水流冲刷强度沿程变化比较显著,位于游荡型河段的断面冲淤过程最为剧烈;除弯曲型河段下游护岸断面外,其余典型断面的平滩河宽、平滩水深与汛期水流冲刷强度的相关程度均较高,且二者之间呈正相关关系,故平滩河槽形态调整能够较好地响应水沙条件变化。

### 参考文献:

[1] 胡春宏,王延贵. 塔里木河干流河道演变与整治[M]. 北京:科学出版社,2005.

[2] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(1):1-6. (in Chinese))

[3] 杨帆,薛联青,张洛晨,等. 塔里木河生态水流情势分析及其适应性利用[J]. 水资源保护,2018,34(5):41-49. (YANG Fan, XUE Lianqing, ZHANG Luochen, et al.

Analysis of ecological water regime in Tarim River and its adaptive utilization [J]. Water Resources Protection, 2018,34(5):41-49. (in Chinese))

[4] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. 水资源保护,2017,33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. Water Resources Protection,2017,33(3):31-37. (in Chinese))

[5] WU B S, XIA J Q, FU X D, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(10):1585-1601.

[6] 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):40-45. (FENG Qi, CHEN Guangting, LI Zhenshan. Investigating into the variation of erosion and siltation on the modern channel of Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 1997,17(1):40-45. (in Chinese))

[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. (in Chinese))

[8] 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 Tarim River [J]. Journal of Sediment Research, 2002,27(6):19-25. (in Chinese))

[9] 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. (in Chinese))

[10] LEOPOLD L B, MADDOCK T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications [R]. Washington D. C. : Geological Survey, 1953.

[11] HE L, WILKERSON G V. Improved bankfull channel geometry prediction using two-year return-period discharge [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2011, 47(6): 1298-1316.

[12] HARMAN C, STEWARDSON M, DEROSE R. Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry [J]. Journal of Hydrology, 2008, 351(1/2): 13-25.

[13] LEE J S, JULIEN P Y. Downstream hydraulic geometry of alluvial channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,132(12): 1347-1352.

[14] WOHL E, MERRITT D M. Reach-scale channel geometry of mountain streams [J]. Geomorphology, 2008(3/4):



- [15] 冯普林,梁志勇,黄金池,等. 黄河下游河槽形态演变与水沙关系研究[J]. 泥沙研究,2005,20(2):66-74. (FENG Pulin, LIANG Zhiyong, HUANG Jinchi, et al. Study on relation between the change of channel form and the series of water and sediment in Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2005,20(2):66-74. (in Chinese))
- [16] 费祥俊. 黄河下游来水来沙对河槽形态与河型的塑造作用[J]. 泥沙研究, 2016, 31(4):9-14. (FEI Xiangjun. Effect of flow and sediment on shaping channel geometry and river pattern of the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2016,31(4):9-14. (in Chinese))
- [17] 吴保生,张原锋,夏军强,等. 黄河下游高村站平滩面积变化分析[J]. 泥沙研究,2008,23(2):34-40. (WU Baosheng, ZHANG Yuanfeng, XIA Junqiang, et al. Variation of bank full area at Gaocun station in the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2008, 23(2):34-40. (in Chinese))
- [18] WU B S, WANG G Q, XIA J Q, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River [J]. Geomorphology, 2008, 100(3):366-376.
- [19] XIA J Q, ZONG Q L, ZHANG Y, et al. Prediction of recent bank retreat processes at typical sections in the Jingjiang reach [J]. Science China (Technological Sciences), 2014,57(8):1490-1499.
- [20] 夏军强,宗全利,邓珊珊,等. 三峡工程运用后荆江河段平滩河槽形态调整特点[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2):238-245. (XIA Junqiang, ZONG Quanli, DENG Shanshan, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry of Jingjiang reach after operation of Three Gorges Project [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015,49(2):238-245. (in Chinese))
- [21] 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 Guoan, 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. (in Chinese))
- [22] XIA J Q, WU B S, WANG G Q, et al. Estimation of bankfull discharge in the Lower Yellow River using different approaches [J]. Geomorphology, 2010, 117(1/2):66-77.
- [23] 侯志军,李勇,庞隆霞. 黄河尾间河道平滩流量变化对来水来沙的响应[J]. 水利水电科技进展,2011,31(2):23-27. (HOU Zhijun, LI Yong, PANG Longxia. Response of bankfull discharge in tail reaches of Yellow River Estuary to runoff and sediment load[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011,31(2):23-27. (in Chinese))
- [24] 钱宁,张仁. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [25] 赵业安,潘贤弟,韩少发,等. “河流建库后下游河床演变与河床演变理论问题”专题总报告 I:河流建库后下游河床演变[J]. 泥沙研究,1982,7(1):68-76. (ZHAO Ye'an, PAN Xiandi, HAN Shaofa, et al. Fluvial processes and theoretical problem of Lower Yellow River after construction of reservoir (special report I): fluvial processes of Lower Yellow River after construction of reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 1982, 7(1):68-76. (in Chinese))
- [26] 夏军强,宗全利. 长江荆江段崩岸机理及其数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [27] 赵业安,周文浩. “黄河下游河道演变基本规律”研究综述[J]. 人民黄河,1996(9):4-9. (ZHAO Ye'an, ZHOU Wenhao. Basic development law and prospect prediction of the lower reaches of Yellow River [J]. Yellow River, 1996(9):4-9. (in Chinese))
- [28] XIA J Q, LI X J, LI T, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the Lower Yellow River [J]. Geomorphology, 2014, 213:255-265.
- [29] 刘成,何耘,刘桢. 河流输沙量变化的主要驱动因素[J]. 水利水电科技进展,2017,37(1):1-7. (LIU Cheng, HE Yun, LIU An. Key drivers of changes in sediment loads of rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(1):1-7. (in Chinese))
- [30] 李洁,夏军强,邓珊珊,等. 近期黄河下游游荡段滩岸崩退过程及特点[J]. 水科学进展,2015,26(4):517-525. (LI Jie, XIA Junqiang, DENG Shanshan, et al. Recent bank retreat processes and characteristics in the braided reach of the Lower Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4):517-525. (in Chinese))

(收稿日期:2018-05-08 编辑:郑孝宇)

