

黄河口清水沟流路地貌特征研究

杜小康^{1,2}, 王开荣¹, 裴洪杨³, 窦身堂¹, 毕乃双², 张 辛¹

(1. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 黄河入海流路自 1976 年 5 月改道至清水沟流路以来, 其地貌形态一直处于剧烈的变化当中, 以往的研究虽然关注了典型断面主槽的形态特征及过流能力的变化, 但对于清水沟流路范围界限内河道断面整体形态及其沿程变化等地貌特征还缺乏系统研究。本文以 2019 年 10 月黄河口现行清水沟流路范围渔洼以下河段加测横断面为研究对象, 辨识现状地貌分布特点和横断面沿程形态特征, 并分析其成因。结果表明: 黄河口地貌形成受自然演变和人类活动的影响, 既具有主槽、滩地、堤防等河流地貌要素, 又具有滩涂、潮沟、拦门沙等海洋地貌要素。在有堤防河段, 主槽形态窄深, 过流能力较强; 在无堤防河段, 主槽形态宽浅, 过流能力较差; 从滩槽高差、唇滩高差、滩地横比降三个指标来看, 无堤防河段的“自然悬河”程度大于有堤防河段的“二级悬河”程度。黄河口悬河程度小于黄河下游大部分河段, 但黄河口尾间河道的滩地横比降依然远大于河道纵比降, 若发生漫滩洪水将极易引起顺堤行洪, 会对黄河口堤防安全造成极大威胁。

关键词: 形态特征; 地貌; 清水沟流路; 黄河口

中图分类号: TV856 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)12-0077-09

DOI: 10.11759/hyxx20201213001

黄河入海流路自 1976 年 5 月实施人工改道, 由清水沟流路入海已 40 余年, 受入海水沙、海洋动力、边界条件以及人工干预等众多要素的共同影响, 其形态调整剧烈且复杂, 其不断地淤积延伸是黄河下游河道淤积, 河床抬高以及形成地上悬河的主要原因^[1]。为此, 不少学者围绕黄河口尾间河道演变做了很多研究。其中胡春宏等^[2]基于河道横断面分析了黄河口尾间河道的萎缩过程及与水沙过程的响应; 杨卓媛等^[3]基于河道横断面, 计算黄河尾间河道的河段尺度平滩形态参数, 分析了 1990—2016 年黄河口尾间段河床形态的调整及过流能力变化过程; 张治昊等^[4]研究了水沙变异条件下河道形态调整规律, 并建立了河道形态萎缩的判别指标。以上诸多研究主要关注典型断面主槽的形态特征及过流能力, 而对于流路范围界限内河道断面整体形态及其沿程变化等地貌特征关注较少。然而黄河口流路范围界限内的整体形态, 尤其是河道的悬河程度, 不仅是黄河口的防洪安全评估的一项不可忽视的重要指标, 而且也是评估现行入海流路运用年限的重要依据。本文尝试以清水沟流路管理范围内渔洼以下河段加测横断面为研究对象, 辨识黄河口现状地貌分布特点和横断

面沿程形态特征, 分析其成因, 以期能够从整体上把握现行清水沟流路地貌特征现状, 从而为黄河口地区的防洪安全和经济发展提供参考。

1 数据来源及指标获取

1.1 研究区域及数据来源

本文以现行清水沟流路流域范围界限区域内的地貌及横剖面形态特征开展研究, 根据《黄河河口综合治理规划》, 清水沟流路管理界限是指渔洼以下河段, 左岸边界为北大堤、孤东防潮堤, 右岸边界为南防洪堤、南大堤, 南北约 40 km 的范围(图 1)。以往研究表明^[5], 黄河口感潮河段一般为 15~30 km, 在非汛

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405502); 黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2019-03, HKY-JBYW-2020-11)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC0405502; Special Fund for Basic Scientific Research Operation of Yellow River Institute of Hydraulic Research, Nos. HKY-JBYW-2019-03, HKY-JBYW-2020-11]

作者简介: 杜小康(1993—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 工程师, 主要从事河流动力学及河口海岸治理方面的研究, 电话: 0371-66023954, E-mail: 897463343@qq.com; 王开荣(1963—), 通信作者, 高级工程师(教授级), 电话: 0371-66024539, E-mail: kairongw@163.com

期, 潮区界大约在清 7 断面附近(距离口门约 30 km), 因此本文将清 7 断面以下河段作为感潮河段。

本文所采用的数据来自黄河水利委员会水文部门 2019 年 10 月测验的 9 个典型横断面数据(图 1), 其位置和长度如表 1 所示, 断面高程系统采用 1985 年国家高程基准。与以往统测断面不同的是, 渔洼至汉

3 共 7 个断面是在以往统测断面的基础上进行延长, 使其能够跨越清水沟流域范围界限; 汉补 1 断面和汉补 2 断面是补测的 2 个新断面, 均位于汉 3 断面下游, 最下游的汉补 2 断面距上游渔洼断面 65.7 km。通过上述断面测验, 以期掌握整个清水沟流路管理范围界限内的横断面形态特征。



图 1 清水沟流路范围内测验断面布置位置示意图(改绘自文献[6])

Fig. 1 Location of cross-sections in the Qingshuigou channel (redrawn from Ref.[6])

表 1 测验断面位置特征

Tab. 1 Characteristic parameters of the cross-sections

序号	断面名称	距渔洼距离/km	实测断面宽度/m	左端点		右端点	
				X	Y	X	Y
1	渔洼	0	5 631	642 450	4 176 899	646 644	4 173 141
2	清加 2	16.43	17 317	656 265	4 187 221	658 094	4 170 000
3	清加 4	29.04	30 578	666 053	4 194 437	672 127	4 164 468
4	清加 6	36.57	39 317	680 732	4 202 329	667 847	4 165 183
5	清加 8	46.11	30 160	687 895	4 191 181	674 765	4 164 028
6	汉 1(二)	49.61	22 409	686 510	4 192 056	689 203	4 169 809
7	汉 3	54.95	19 402	691 476	4 188 801	696 516	4 170 065
8	汉补 1	62.67	8 467	694 361	4 191 290	701 817	4 187 277
9	汉补 2	65.70	6 379	696 054	4 193 621	701 603	4 190 477

注: 断面位置坐标采用北京 1954 坐标系统。

1.2 指标获取方法

(1) 滩地横比降

滩地横比降分为左滩横比降、右滩横比降。在

本文中, 滩地横比降采用滩唇与临河滩面高程的差值与滩地宽度的比值。对于有堤防河段, 临河滩面高程取临近大堤除顺堤河以外 100 m 宽度滩面的平均

高程;对于无堤防河段,临河滩面取平均高潮线以上 100 m 宽度范围滩面的平均高程。具体如下式:

$$J = h/L, \quad (1)$$

式中, J 代表滩地横比降, h 代表滩唇与临堤滩面高程的差值, L 代表滩地宽度。

(2) 滩槽高差

临河滩面高程与平滩流量时主槽平均河底高程的差值^[7]。滩槽高差越小,说明河道萎缩严重,悬河程度越高。

(3) 唇滩高差

滩唇与临河滩面高差^[7]。本文当中取左、右岸较低滩唇高程与其相应侧临河滩面高程的差值。

(4) 河相系数

采用平滩流量时的河相系数^[8]。

$$\xi = \frac{\sqrt{B}}{H}, \quad (2)$$

式中, ξ 为平滩河相系数, B 表示主槽平滩河宽, H 表示主槽平滩水深。

(5) 主槽平滩过流面积

水位与左右岸最低滩唇高程齐平时的主槽过流面积。先判别主槽左、右岸滩唇的位置,以较低滩唇的高程为基准,以积分方式求得主槽过水面积。

2 横断面地貌分布和形态特征

2.1 典型河段横断面地貌分布特征

河口地貌是受河流和海洋动力等作用,经侵蚀、搬运和堆积过程所形成的相互消长的各种地貌总称,其既有河流地貌要素,又有海洋地貌要素。黄河口的河流地貌类型与黄河下游较为相似,所包含的自然地貌要素有主槽、滩地、自然堤、串沟、心滩等,包含的人工地貌要素有堤防、生产堤、控导、险工等;黄河口海洋地貌所包含的自然地貌要素有拦门沙、滩涂、潮沟等,包含的人工或人工与自然复合的地貌要素有防潮堤、汊河、流域依托陆域等。本文分别选取渔洼、清加 6、汊 1(二)、汊补 2 四个代表断面,对横断面地貌特征进行识别与分析,其平面位置如图 1 所示,这四个断面代表了清水沟流路四种不同的地貌分布特征,其中渔洼、清加 6 断面属于受两岸堤防约束的槽滩地貌,汊 1(二)、汊补 2 属于不受两岸堤防约束的槽滩地貌。

渔洼断面属于窄约束性槽滩地貌,该断面附近是近代黄河入海流路的摆动顶点,位于西河口水位站上游 12.2 km,两岸堤距相对较窄,约为 5.3 km

(图 2)。断面主槽单一,宽度为 572 m,平均高程为 4.66 m;两岸滩地有生产堤、串沟存在,其中左岸滩地宽 3 657 m,平均高程为 7.32 m,左滩横比降为 3.4%,右岸滩地宽 1 020 m,平均高程为 7.43 m,右滩横比降为 5.1%;在左右岸大堤临河侧均有约 1 m 深的顺堤河,说明渔洼断面两岸大堤临河侧出现过顺堤行洪现象。左岸北大堤背河侧平均高程为 6.2 m,比左岸临河滩面高程低 0.6 m,为典型的“二级悬河”形态。

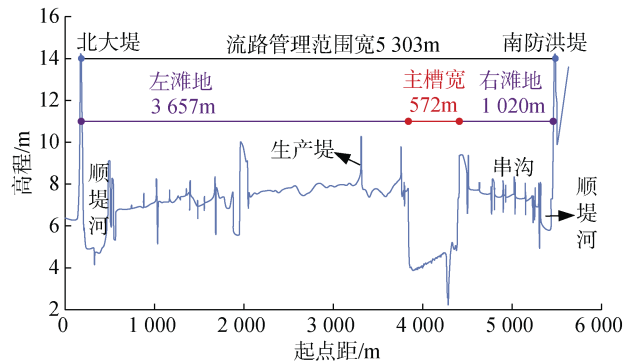


图 2 渔洼断面地貌形态结构
Fig. 2 Morphological structure of Yuwa Section

清加 6 断面属于宽约束性槽滩地貌,位于西河口水位站下游 24.37 km,渔洼断面下游 36.57 km,该断面横跨整个清水沟流路管理范围界限,自左端孤东防潮堤开始,至右岸南大堤横跨整个清水沟流路管理范围(图 3)。清加 6 断面两岸堤距相对较宽,约为 12.6 km;两岸大堤背河侧有属于清水沟流路范围的依托陆域存在,南北向流路管理范围最大宽度可达 37.5 km;清加 6 断面主槽宽 511 m,平均高程 1.39 m;滩地有生产堤、串沟存在,右岸有多个人海流路故道存在,如甜水沟、小岛河等,左岸滩地宽 5 328 m,平均高程为 3.78 m,左滩横比降为 3.9%,右岸滩地宽 6 808 m,平均高程为 3.53m,横比降为 2.3%。左岸依托陆域宽 11 228 m,平均高程为 1.38 m,横比降为 1.8%;右岸依托陆域宽 13 586 m,平均高程为 1.89 m,横比降为 0.59%,孤东油田在左岸流域依托陆域范围内,宽为 8 600 m。左岸临河侧比背河侧平均高 2.4 m,右岸临河侧比背河侧平均高 1.64 m,断面整体为二级悬河形态。主槽距左岸孤东围堤 16 556 m,距右岸故道甜水沟 6 269 m,距右岸小岛河 19 965 m。

汊 1(二)断面属于开放性槽滩汊河地貌,位于西河口水位站下游 37.41 km,渔洼断面下游 49.61 km,

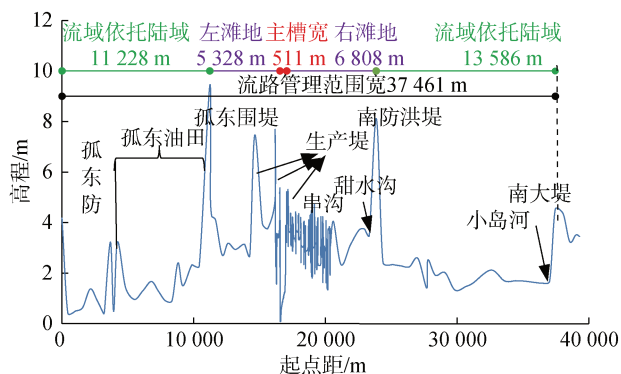


图3 清加6断面地貌形态结构

Fig. 3 Morphological structure of Qingjia 6 Section

位于现行清8汉河沙嘴中部区域(图1)。汉1(二)断面无堤防约束,其左右岸陆上边界均系平均高潮线,宽度约为22.4 km(图4);1996年5月之前行河主槽与现行清8汉河主槽共存,其中清8汉河主槽宽399 m,主槽平均高程为-0.12 m,1996年前行河主槽宽408 m,平均高程为-0.13 m;汉1(二)断面滩地包括左岸滩地、右岸滩地以及现行主槽与1996年前主槽的中间滩地,其中左滩地宽8 622 m,平均高程为0.73 m,左滩横比降约为4.1‰,右滩地宽12 062 m,平均高程为1.164 m,右滩横比降为4.0‰,中间滩地宽度为918 m,平均高程为2.37 m。该断面河漫滩地与潮滩共存,串沟和潮沟发育,现行河道主槽距左岸北汉河主槽约6.4 km。在现行主槽以及1996年前主槽附近的河滩地范围内分布了大面积喜淡水的芦苇草甸,在高潮线附近广泛分布有盐地碱蓬,以及少量的柽柳林,在高潮线以下受潮水影响,主要为无植被覆盖的裸滩^[9]。

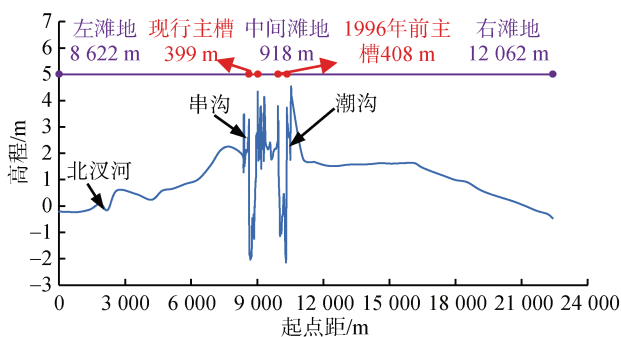


图4 汉1(二)断面地貌形态结构

Fig. 4 Morphological structure of Cha 1(2) Section

汉补2断面属于开放性槽滩拦门沙地貌,该断面无堤防约束,位于西河口水位站下游53.5 km,渔

洼断面下游65.7 km,位于清8汉河沙嘴顶部区域(图1)。其左、右岸陆上边界均系平均高潮线,宽度约为6.4 km(图5)。汉补2断面有左、右两个汉河存在,其中左汉河宽1 057 m,平均高程-0.17 m;右汉河宽860 m,平均高程0.18 m,在复杂的水沙动力作用下,主、支汉河可以相互转换。该断面发育有心滩、拦门沙等典型地貌单元,河漫滩地与潮滩共存,串沟和潮沟发育,其中左滩涂宽1 878 m,平均高程为0.49 m,左滩横比降约为6.2‰,右滩涂宽879 m,平均高程为1.164 m,右滩横比降为6.6‰,心滩(拦门沙)宽度为6 808 m,平均高程为0.93 m。该断面所在河段广泛分布了适宜于较高盐度的互花米草,以及少量的柽柳林。

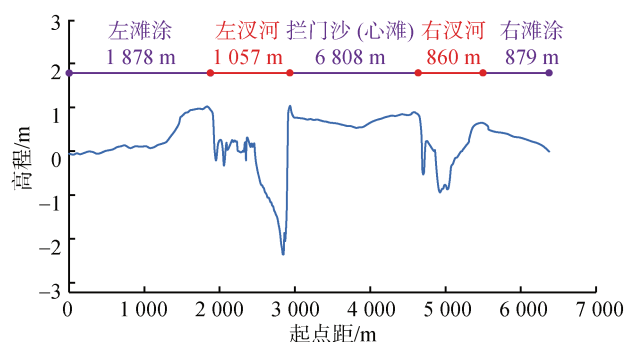


图5 汉补2断面地貌形态结构

Fig. 5 Morphological structure of Chabu 2 Section

2.2 尾间河道横断面沿程形态特征

根据尾间河道的特点,将渔洼以下尾间河道分为有堤防河段(渔洼断面至其下游约42 km内河段)和无堤防河段(渔洼断面下游42 km以下河段)。由于清7断面也在渔洼断面下游约42 km处,因此现状无堤防河段与感潮河段基本重合,受潮流动力的影响较大,有堤防河段基本不在感潮河段范围内,受潮流动力影响较小。

尾间河道左、右岸滩地平均高程较为一致,均沿程下降,主槽平均高程除部分河段略微抬升以外,整体也呈下降趋势(图6)。从表2可以看出,渔洼至汉补2河段主槽纵比降为0.74‰,左滩地纵比降为1.04‰,右滩地纵比降为1.05‰,滩地纵比降大于主槽纵比降,左右岸滩地高程沿程下降幅度大于主槽平均高程沿程下降幅度,无堤防河段纵比降小于有堤防河段纵比降,主槽及滩地高程沿程逐渐趋缓。整个渔洼以下河道左、右岸滩地平均高程均大于主槽

平均高程, 没有出现黄河下游部分河段的滩地高程小于主槽平均高程的情况^[10]。

利用主槽平滩过流面积以及河相系数两个指标来表征尾间河道主槽的横断面沿程形态特征。由图 7 和表 2 可知, 主河槽的过流面积沿程减小, 河相系数沿程增加, 主槽形态由窄深逐渐变为宽浅, 水流越来越容易漫滩。在有堤防河段, 主槽平均过流面积为 1 643.1 m²; 在无堤防河段, 主槽平滩过流面积为 1 373.8 m², 由前文分析可知, 无堤防河段的主槽纵比降小于有堤防河段的主槽纵比降, 因此无堤防河段主槽过流能力小于有堤防河段主槽过流能力。

表 2 渔洼以下河段主槽、滩地形态参数对比

Tab. 2 Comparison of morphological parameters of main channel and beach in downstream reach of Yuwa

	有堤防			无堤防			渔洼以下全河段		
	主槽	左滩地	右滩地	主槽	左滩地	右滩地	主槽	左滩地	右滩地
高程/m	2.28	5.09	5.13	-0.11	0.70	0.93	0.95	2.65	2.80
纵比降/%	0.85	1.14	1.17	0.54	0.85	0.83	0.74	1.04	1.05
过流面积/m ²	1 643.09	/	/	1 373.82	/	/	1 493.50	/	/
河相系数	5.73	/	/	12.60	/	/	9.55	/	/

注: 表中所指的高程、纵比降、过流面积、河相系数均为河段平均值。

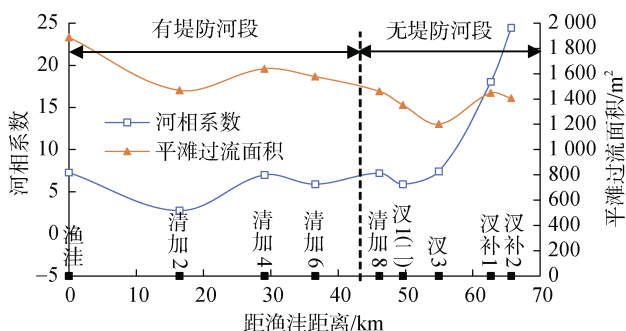


图 7 渔洼以下河段主槽平滩过流面积及河相系数沿程变化
Fig. 7 Average elevation change of the bankfull flow area and fluvial facies coefficient of the main channel along the river

利用滩槽高差、唇滩高差以及滩地横比降三个指标来表征尾间河道主槽的横断面沿程形态特征(图 8、图 9)。滩槽高差表现为沿程减小趋势, 唇滩高差表现为沿程先增加后减小的趋势。在有堤防河段, 平均滩槽高差为 2.76 m, 平均唇滩高差为 1.02 m; 在无堤防河段, 平均滩槽高差为 0.96 m, 平均唇滩高差为 1.71 m。无堤防河段的滩槽高差明显小于有堤防河段的滩槽高差, 无堤防河段的唇滩高差明显大于有堤防河段的唇滩高差, 相差幅度在 65%以上(表 3)。从滩地横比降这个指标来看, 左滩横比降呈沿程增加的变化趋势,

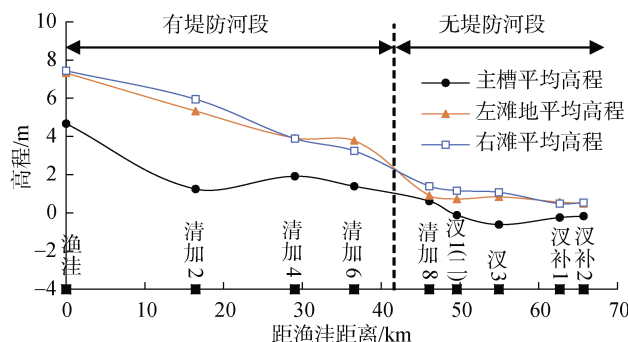


图 6 主槽及滩地平均高程沿程变化
Fig. 6 Average elevation change of the beaches and the river channel along the river

右滩横比降呈现先减小后增加的变化趋势(图 9)。在有堤防河段, 左、右岸滩地横比降较小, 左滩平均横比降为 3.1%, 右滩平均横比降为 3.8%, 右滩平均横比降大于左滩平均横比降(表 3); 在无堤防河段, 左、右岸滩地横比降有不同程度的增加, 左滩平均横比降为 5.0%, 右滩平均横比降为 4.6%, 相对于有堤防河段, 无堤防河段左、右滩横比降分别增加了 61.29%和 21.05%, 左岸滩地横比降增大幅度更为明显(表 3)。在整个渔洼以下河道, 左、右岸滩地平均横比降均大于 3%, 滩地横比降仍远大于河槽的纵比降。

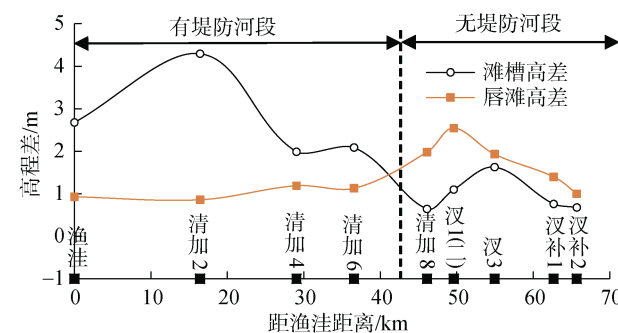


图 8 渔洼以下河段滩槽高差、唇滩高差沿程变化
Fig. 8 Change in the index of elevation difference between beach and main channel, and the index of the elevation difference between natural levee and beach along the river

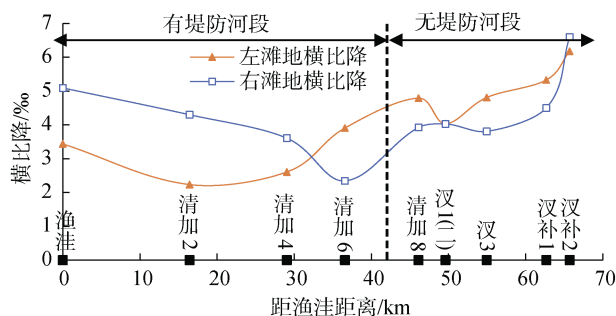


图9 渔洼以下河段左右岸滩地横比降沿程变化

Fig. 9 Change in beach transverse slope in left and right bank along the river

从以上三个指标来看, 渔洼至汉补 2 河段无堤防河段的悬河程度形势比有堤防河段更大。根据相

表 3 渔洼以下河段悬河指标在有、无堤防河段对比

Tab. 3 Comparison of the “above ground river” index between the reach with embankment and the reach without embankment

河段	滩槽高差/m		唇滩高差/m		左滩横比降/%o		右滩横比降/%o	
	数值	变化	数值	变化	数值	变化	数值	变化
有堤防	2.76	—	1.02	—	3.1	—	3.8	—
无堤防	0.96	-65.22%	1.71	67.65%	5	61.29%	4.6	21.05%

注: 表中所指的滩槽高差、唇滩高差、左滩横比降、右滩横比降均为河段平均值。

3.1 主槽形态特征成因

有堤防河段的平均过流面积为 1 643.09 m², 平滩河相系数为 5.73, 无堤防河段的平均过流面积为 1 373.82 m², 平滩河相系数为 12.60。与有堤防河段相比, 无堤防河段的主槽过流面积减小幅度明显, 整体减小了 16.3%, 平滩河相系数超过有堤防河段的 2 倍, 形态变得更为宽浅。

有堤防河段基本在潮区界以上, 该河段平均纵比降为 0.85, 明显大于无堤防河段。主槽受径流动力的影响, 几乎不受潮汐顶托的作用, 因此该河段流速较大。以往研究表明^[11], 流速是水流搬运能力的重要影响因素, 在其他条件一定的情况下, 当流速增加 1 倍, 水流的搬运能力则是原来的 64 倍。因此该河段水流挟沙能力较强, 落淤较少, 从而主槽形态相对窄深, 过流面积较大。

无堤防河段基本都在潮区界以下, 该河段平均纵比降为 0.54, 相对于有堤防河段明显减小, 在距口门附近的汉 3 至汉补 2 河段甚至出现倒比降(图 6)。受河道骤然大幅度展宽、水流扩散、潮汐顶托或盐水楔上溯、纵剖面倒比降等因素影响, 水流流速急速下降, 挟沙能力随着流速的降低而大幅下降, 而上

游所挟带的泥沙因为水流挟沙能力降低而大量落淤, 从而导致该河段主槽形态更加宽浅, 过流面积相对较小。

3 尾闾河道横断面形态特征成因

黄河现行清水沟入海流路是在大量淤积以及人工修筑堤防约束水流的基础上逐渐塑造形成, 其横断面形式与黄河下游一样同为复式断面。但由于在渔洼以下约 42 km 处以下河段无堤防约束, 没有人工干预因子的直接影响, 同时受径流和海洋等多种复杂动力因素的作用, 其形态成因与黄河下游河段相比又有所区别。

3.2 悬河形态特征成因

(1) 唇滩高差和滩地横比降

唇滩高差和滩地横比降这两个指标的成因互相关联, 且都有沿程增大的变化趋势。有堤防河段和无堤防河段平均唇滩高差均大于 1 m, 平均滩地横比降均大于 3%。

在有堤防河段, 河道两侧有堤防的约束, 左右岸滩地不受两侧海洋动力的作用。在左、右岸滩地唇滩高差差别不大的情况下, 主槽更靠近堤防的那一侧, 滩地宽度越小, 横比降越大。与此同时, 在有堤防河段分布有生产堤, 生产堤的存在减轻了洪水漫滩的次数, 这将导致淤积主要集中在主槽和嫩滩上, 而生产堤至大堤间的淤积量减少^[12], 从而导致唇滩高差和滩地横比降的增加, 这也是黄河下游典型“二级悬河”的形成原因。

在无堤防河段, 河道两侧无堤防的约束, 左右岸滩涂受海洋动力的直接作用。由于黄河口强浪主要来自东北方向^[13], 因此流路左岸侵蚀作用较强, 左滩横

比降大于右滩横比降(表 3),且左滩平均高程低于右滩地平均高程(表 2)。同时,现行清 8 汉河口门附近滩地广泛分布互花米草等植被^[14],占地面积约 3 485 hm²,这些植被减弱了河槽两侧的水流冲刷强度,促进了泥沙的落淤^[15];而平均高潮线附近盐度较大,植被分布较少,对水流动力减弱作用较小,冲刷较强,从而导致无堤防河段的唇滩高差和滩地横比降的增大,且左岸滩地的横比降大于右岸滩地的横比降。

(2) 滩槽高差

有堤防河段的平均滩槽高差为 2.76,无堤防河段的平均滩槽高差为 0.96。无堤防河段相对于有堤防河段,滩槽高差减小了 65.22%。这是由于一方面根据前述分析可知,尾闾河段的主槽形态沿程变得更为宽浅,而过流面积则沿程减少,因此无堤防河段的主槽深度整体小于有堤防河段;另一方面,无堤防河段因为没有堤防的约束,径流所挟带的泥沙在滩地淤积厚度相对于有堤防河段明显减小,滩地平均高程下降幅度较主槽平均高程下降幅度更大,从而导致滩槽高差沿程减小。

4 结论

本文以 2019 年 10 月黄河口现行清水沟流路范围渔洼以下河段加测横断面为研究对象,辨识现状地貌分布特点和横断面沿程形态特征,并分析其成因。得到主要认识如下:

1) 黄河现行清水沟流路尾闾河道横断面分为窄约束性槽滩地貌、宽约束性槽滩地貌、开放性槽滩汉河地貌、开放性槽滩拦门沙地貌四种地貌类型。其中窄约束性槽滩地貌和宽约束性槽滩地貌包含主槽、滩地、堤防等河流地貌要素,具有典型的河流地貌类型特征;而开放性槽滩汉河地貌和开放性槽滩拦门沙地貌除了含有上述部分河流地貌要素,还包括滩涂、潮沟、拦门沙等海洋地貌要素,兼具河流与海洋双重地貌特征。

2) 无堤防河段的主槽过流能力明显小于有堤防河段的主槽过流能力。有堤防河段平均主槽河相系数为 5.73,平均过流面积为 1 643.09 m²,平均纵比降为 0.85‰,主槽形态较为窄深,过流面积较大,纵比降较大,因此主槽过流能力较强;无堤防河段平均主槽河相系数为 12.60,平均过流面积为 1 373.82 m²,平均纵比降为 0.54‰,主槽形态较为宽浅,过流面积较小,纵比降较小,导致过流能力较小,因此无堤防河段更容易发生漫滩和出汉。以上两个河段主槽形态

差异的形成主要是由于有堤防河段基本在潮区界以上,无堤防河段基本都在潮区界以下,与有堤防河段相比,无堤防河段该河段河道大幅度展宽,水流扩散,潮汐顶托作用明显,水流流速急速下降,挟沙能力随之降低,导致落淤较多,从而使无堤防河段主槽过流面积减小,形态更加宽浅。

3) 无堤防河段的悬河程度明显大于有堤防河段的悬河程度。与有堤防河段相比,无堤防河段没有两岸大堤的约束,径流所挟带的泥沙在滩地淤积厚度相对于有堤防河段明显减小,而无堤防河段的主槽形态较为宽浅,从而导致无堤防河段滩槽高差相对较小;与此同时,无堤防河段高潮线附近植被分布较少,受海洋动力直接侵蚀作用较为明显,而其主槽两侧则由于互花米草等植被的存在促进泥沙落淤,从而导致无堤防河段的唇滩高差和滩地横比降相对较大。因此无堤防河段的“自然悬河”程度明显大于有堤防河段的“二级悬河”程度。

4) 从滩槽高差、滩地横比降两个指标来看,现行清水沟流路尾闾河道的悬河程度小于大部分黄河下游的悬河程度。但现行清水沟流路的滩地横比降依然远大于河槽纵比降,部分河段的大堤临河侧有明显的顺堤河,再加上两岸滩地串沟、潮沟广泛分布,当发生漫滩洪水时,极易造成顺堤行洪,对黄河口堤防造成极大的威胁。因此黄河口河道的悬河程度,尤其是有堤防河段的“二级悬河”依然是黄河口综合治理当中一项不可忽视的问题。

5) 本文只对黄河口现状大断面形态及成因进行了初步的探讨,对于入海水沙、海洋动力等要素对黄河口地貌形态演变的影响尚需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 黄海挺,杨作升,张彩云.黄河口拦门沙研究动态[J].海洋科学,2003,27(6):37-39.
HUANG Haiting, YANG Zuosheng, ZHANG Caiyun. The research trend of mouth sandbar in Yellow River[J]. Marine Sciences, 2003, 27(6): 37-39.
- [2] 胡春宏,张治昊.黄河口尾闾河道横断面形态调整及其与水沙过程的响应关系[J].应用基础与工程科学学报,2011,4:22-32.
HU Chunhong, ZHANG Zhihao. Relationship between Adjustment of Section Configuration and Flow-sediment of Tail Channels in the Yellow River Estuary[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 4: 22-32.
- [3] 杨卓媛,夏军强,周美蓉,等.黄河口尾闾段河床形态调整及过流能力变化[J].水科学进展,2019,30(3):

- 305-315.
 YANG Zhuoyuan, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry and bankfull discharge in the Yellow River Estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 305-315.
- [4] 张治昊, 戴清, 李敬义, 等. 黄河口尾间河道断面形态的萎缩调整规律研究[J]. *水道港口*, 2010, 31(5): 340-346.
 ZHANG Zhihao, DAI Qing, LI Jingyi, et al. Study on the atrophy and adjustment law of the cross section of the tail of the Yellow River mouth[J]. *Waterways and Ports*, 2010, 31(5): 340-346.
- [5] 余力民. 对黄河口演变两个问题的探讨[J]. *泥沙研究*, 1985, 2: 76-81.
 YU Limin. Discussion on two issues of the evolution of the Yellow River estuary[J]. *Sediment Research*, 1985, 2: 76-81.
- [6] 王开荣, 凡姚申, 韩沙沙, 等. 黄河现行清水沟流路汊河运用方案探讨[J]. *海洋科学*, 2020, 44(10): 91-100.
 WANG Kairong, FAN Yaoshen, HAN Shasha, et al. Discussion on the operation scheme of the current Qingshuigou channel of the Yellow River[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(10): 91-100.
- [7] 杨吉山, 许炯心, 廖建华. 不同水沙条件下黄河下游二级悬河的发展过程[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 66-76.
 YANG Jishan, XU Jiongxin, LIAO Jianhua. Development process of secondary suspended river in the lower Yellow River under different water and sediment conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 66-76.
- [8] 王开荣, 黄海军, 张永平. 黄河清水沟流路河口尾间段河床形态萎缩特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 15-22.
 WANG Kairong, HUANG Haijun, ZHANG Yongping. The characteristics of riverbed atrophy in the tail section of the estuary of Qingshuigou flow road of the Yellow River[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 15-22.
- [9] 王建步, 张杰, 马毅, 等. 基于 GF-1 WFV 影像的黄河口湿地植被盖度估测及分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(6): 43-53.
 WANG Jianbu, ZHANG Jie, MA Yi, et al. Vegetation fraction coverage estimation and analysis of the Yellow River Estuary wetland based on GF-1 WFV satellite image[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(6): 43-53.
- [10] 胡一三, 张晓华. 略论二级悬河[J]. *泥沙研究*, 2006, 31(5): 1-9.
 HU Yisan, ZHANG Xiaohua. Brief Discussion on the Secondary perched River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006, 31(5): 1-9.
- [11] 景可. 泾河, 北洛河泥沙输移规律[J]. *人民黄河*, 1999, 21(12): 18-19.
 JING Ke. Sediment transport law of Jinghe and Beiluo Rivers[J]. *Yellow River*, 1999, 21(12): 18-19.
- [12] 高季章, 胡春宏, 陈绪坚. 论黄河下游河道的改造与“二级悬河”的治理[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2004, 2(1): 8-18.
 GAO Jizhang, HU Chunhong, CHEN Xujian. A preliminary study on alteration of watercourse and improvement of the “secondary perched river” in the lower Yellow River[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2004, 2(1): 8-18.
- [13] 王万战, 张华兴. 黄河口海岸演变规律[J]. *人民黄河*, 2007, 29(2): 27-28.
 WANG Wanzhan, ZHANG Huaxing. Evolution Pattern of the Yellow River Estuary Coast[J]. *Yellow River*, 2007, 29(2): 27-28.
- [14] 路峰, 杨俊芳. 基于 Landsat 8 OLI 卫星数据的入侵植物互花米草遥感监测与分析——以山东黄河三角洲国家级自然保护区为例[J]. *山东林业科技*, 2018, 48(1): 56-59.
 LU Feng, YANG Junfang. Remote sensing monitoring and analysis of *Spartina Alterniflora* based on Landsat 8 OLI satellite data[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2018, 48(1): 56-59.
- [15] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 等. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(11): 2339-2357.
 GAO Shu, DU Yongfen, XIE Wenjing, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora* salt-marshes along the eastern China coastlines. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(11): 2567-2586.

Geomorphic characteristics of the Qingshuigou flow path in the Yellow River estuary

DU Xiao-kang^{1, 2}, WANG Kai-rong¹, PEI Hong-yang³, DOU Shen-tang¹,
BI Nai-shuang², ZHANG Xin¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Received: Dec. 13, 2020

Key words: morphological features; geomorphology; Qingshuigou flow path; Yellow River estuary

Abstract: The topography of the Yellow River flow path into the sea has undergone drastic change since it was diverted to the Qingshuigou flow path in May 1976. Although previous studies have studied the changes in the morphological characteristics and flow capacity of the main channel of the typical section, the overall shape of the channel section within the boundary of the Qingshuigou flow path and its change characteristics along the channel are still lacking in systematic research. Based on a measured cross section of the river below Yuwa in the current Qingshuigou flow path of the Yellow River estuary in October 2019, this study recognizes the geomorphic features of the typical cross section, calculates the cross-sectional morphological indicators, and systematically analyzes the morphological characteristics of the main channel and the degree of the perched river. Results show that the geomorphological structure of the Yellow River estuary, which is affected by natural evolution and human activities, exhibits not only the riverine characteristics of the lower Yellow River but also oceanic characteristics. In the reach with embankments, the main channel is narrow and deep in shape with a strong flow capacity, while in the reach without embankments, the main channel is wide and shallow in shape with a poor flow capacity. From three indexes of elevation difference between beach and main river channel, elevation difference between natural levee and beach, and the transverse beach slope, it can be seen that the degree of “natural perched river” in the reach without embankment is greater than the degree of “secondary perched river” in the reach with embankment. Although the degree of “perched river” at the mouth of the Yellow River is weaker than that at most of the lower reaches, the beach transverse slope is still much larger than the longitudinal slope of the river at the Yellow River estuary. If flooding occurs, it will easily flood along the embankment toe, posing a great threat to the security of the embankment in the Yellow River estuary.

(本文编辑: 康亦兼)