

中国冲积大河的河型分布与成因

李志威¹, 刘 晶¹, 胡世雄¹, 田世民², 潘保柱³

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;
3. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:结合遥感影像、野外调查和水沙数据,以冲积大河为研究对象,分析中国大河的河型分布及成因。中国大河的冲积河段以弯曲与辫状河型为主,局部河段为分汊与网状河型。综合考虑河型分布的一般性和特殊性,认为相对输沙率(来沙量与输沙能力之比)、相对河岸侵蚀切应力(近岸水流切应力与河岸临界抗冲切应力之比)和河谷地形控制(如节点和宽度)是决定河型成因的 3 个最主要的因素。

关键词:冲积大河;河型分布;弯曲河流;辫状河流;分汊河流;网状河流

中图分类号:TV147.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)02-0007-07

Distribution and formation of river patterns of large alluvial rivers in China//LI Zhiwei¹, LIU Jing¹, HU Shixiong¹, TIAN Shimin², PAN Baozhu³(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The distribution of patterns of large alluvial rivers in China and the reason for their formation were analyzed based on remote sensing images, field survey data, hydrological data, and sediment data. Alluvial reaches of rivers in China are mainly meandering and braided reaches, while some local reaches are anabranching and anastomosing reaches. With the general and special characteristics of the distribution of river patterns taken into account, three critical factors are considered to be the main reasons for the formation of river patterns; the relative sediment transport rate (the ratio of the incoming sediment load to the sediment transport capacity), the relative riverbank erosion shear stress (the ratio of near-bank flow shear stress to the critical erosion-resistant shear stress of the river bank), and control of valley terrain (e. g., the valley node and channel width).

Key words: large alluvial river; river pattern distribution; meandering river; braided river; anabranching river; anastomosing river

地球表面河流的数量庞大,平面形态千差万别,对它们采取一致性规则的形态学分类,有助于认识其分布与成因。早期,由于河型分类的需要,中国冲积平原的不同河型特征和成因已多有分析^[1],对于某些特殊河型的分布与成因已有所研究,如游荡与分汊河型^[2-3]。近期,对于全球冲积大河与热带雨林河流的河型分布及地貌意义已有所关注^[4-5]。然而,对于中国的青藏高原、西部干旱区及东北河流的河型分布及成因则缺乏全面系统的总结与分析。

研究河型分布的前提条件是对河型分类概念与界定有明确的判定。河型分类是指按照不同分类依据、规则、属性将冲积河流进行分类。不同的研究者按不同的观点和方法,对河型分类具有不同的结果。Leopold 等^[6]最早将冲积河流划分为顺直、弯曲和辫

状 3 种基本类型。自此以后,河型分类研究引起了地貌学家和河流学家的广泛兴趣,而且分类体系不断变化。具体而言,第 1 个分类方向是将 3 种基本河型分成若干亚类及子河型,如 Chang^[7]将辫状划分陡坡辫状和缓坡辫状;Schumm^[8]依据来沙组成将河流分为床沙质型、混合型和冲泻质型 3 大类,又以河谷比降、水流功率和来沙量分成 14 种亚类;Rosgen^[9]将河流类型细化分成 7 个大类和数 10 种亚类。最近,Eaton 等^[10]再次将河型简化为辫状、分汊和单河道。第 2 个分类方向是在 2 种基本河型(顺直、弯曲)基础上加入其他独立的河型,如钱宁^[11]将河流分为顺直、弯曲、分汊和游荡,Knighton 等^[12]和 Makaske^[13]分别将分汊河流及网状河型作为独立的河流类型。王随继等^[14]根据最新河型研

究进展,以河流地貌观点给出的分类体系是直流、曲流、分汊、辫状和网状。

目前,关于河型成因的分歧较大,某些不完备的成因分析仍具有参考意义,如钱宁^[11]认为河岸抗冲性与床沙质来量是决定河型的主要因子;尹学良^[15]认为河型主要由上游来水来沙条件、边界条件和下游侵蚀基准面决定。Twidale^[16]和 Kleinhans^[17]全面综述了河型分类、形成原因、发育条件及分类的意义。针对不同河型的成因与划分标准,目前存在各种思路和控制变量,尚未达成共识但控制因素基本相近,如 van den Berg^[18]将床沙中值粒径、平滩河流功率和河谷比降作为控制因素,Alabyan 等^[19]只强调将河流功率作为划分标准,Lewin 等^[20]将大尺度沙丘发育、沙质河床分汊和河湾开始发育作为区分河型的内因,Dade^[21]将河床比降、床沙粒径和泥沙运动均衡作为划分标准。

本文参考钱宁^[11]的最新河型分类体系,采用顺直、弯曲、辫状、分汊和网状 5 个基本类型,并将游荡河型归为辫状河型之内。对于山区河流的冲积河段,其河型受山体形态与地质构造控制影响较大,不在本文的讨论范围之内。顺直河型被认为是一种短暂存在或短河段发育的河型^[22],也不作为本文研究范围。本文在遥感影像判读、野外调查和水沙数据的基础上,分析中国冲积大河的河型分布和河道基本特征,并初步探讨其形成原因与形成条件。

1 中国冲积大河的河型分布

中国河流水系众多,流域面积超过 1 万 km² 的河流有 79 条,1000km² 以上的河流有 1580 条,大于 100 km² 的大约有 5 万余条,难以逐一罗列和研究。由于中小河流数量多,同时受季节性影响较大,很多

河流还受到水利工程的控制,代表性不强且难以反映自然状况。冲积大河的流域面积大,多数河段处在自然或近似自然状况,所以本文着重研究冲积大河。中国水系主要分为长江水系、黄河水系、珠江水系、东北水系、淮河水系、辽河水系、海河水系、塔里木河水系和雅鲁藏布江水系,这 9 大河流域基本囊括了中国大江大河和西南河流。本文的遥感影像来源于 Landsat 和 Google Earth,水沙数据来源于《中国泥沙公报(2000—2014)》,而且 2009—2016 年笔者针对长江源、黄河源、雅鲁藏布江和塔里木河等开展了连续多年野外调查。

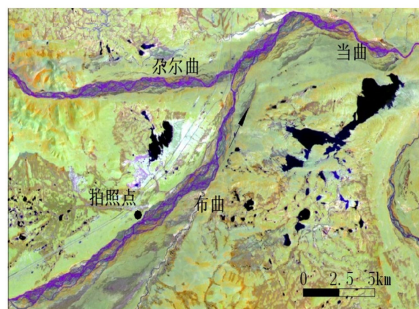
1.1 长江水系

主要分析长江源水系、中下游干流和主要支流,包括汉江、洞庭湖水系(湘资沅澧)和鄱阳湖水系(赣抚信修)的河型(表 1)与河道特征。长江源区位于青藏高原腹地,水系众多,河网密布,尚无人类活动干扰,是分析冲积河型分布与成因的理想对象。选取长江源区的 4 条代表性河流沱沱河、通天河、楚玛尔河和当曲(图 1),沱沱河-通天河河段以沱沱河源头延伸到通天河的曲麻莱县为止。

沱沱河-通天河的平均坡降为 0.18%,其坡降呈现先缓后陡的变化。沱沱河在流出冰川源头 25 km 后,经历一段 5.3 km 的陡峭峡谷,坡降高达 1.81%。在整个 727.3 km 的统计河段中,河道平面 9 次呈现宽窄交替的藕节状形态,宽谷段为辫状河段,窄谷段为山体限制河段。沱沱河-通天河的沿程河型变化依次是峡谷段(5.3 km)、辫状段(74.7 km)、峡谷段(13.4 km)、辫状段(7.3 km)、峡谷段(33.3 km)、辫状段(270.1 km)、峡谷段(33.3 km)、辫状段(50.2 km)、弯曲段(15.3 km)、辫状段(107.6 km)、辫状段(109.4 km)。沱沱河-通天河的宽谷河段,水

表 1 长江源、中下游和主要支流的河型与基本特征

河段名称	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
沱沱河	33°43'N, 91°0'E	辫状	卵砾石	283.1		9.18	-4.2
楚玛尔河	35°11'N, 91°46'E	辫状	卵砾石	250~300		5.74	-6.2
当曲	32°54'N, 94°9'E	辫状	卵砾石	370		7.52	-4.1
通天河	34°13'N, 93°8'E	辫状	卵砾石	370	94	128	-2.6
长江中游	30°45'N, 111°16'E	弯曲	二元结构	1000~1400	35900	7072	14~18
长江下游	29°47'N, 116°15'E	分汊	沙质	1000~1400	39000	8964	16~18
汉江中游	32°33'N, 111°29'E	分汊	沙质	800~900			22
汉江下游	31°10'N, 112°33'E	弯曲	二元结构	1000~1300	4770	475.2	24
湘江下游	26°15'N, 111°35'E	分汊	沙质	1200~1700	952	659.7	16~18
资江下游	28°34'N, 112°5'E	分汊	沙质	1200~1800	196	229.6	20
沅江下游	28°44'N, 111°14'E	分汊	沙质	1100~1700	1010	640.6	20
澧水下游	29°35'N, 111°22'E	分汊	沙质	1400	539	147.7	20
赣江下游	27°44'N, 115°22'E	分汊	沙质	1400~1800	861	683.0	17.8
抚河下游	28°44'N, 111°14'E	分汊	沙质	1400~1800	139	127.6	18
信江下游	28°26'N, 117°57'E	分汊	沙质	1400~1900	206	179.7	20
修水下游	29°12'N; 115°30'E	分汊	沙质	1400~1800	35.7	34.90	18



(a) 沱沱河与当曲汇合处(2010-08-01)



(b) 当曲支流——布曲(2010-07-14)

图1 长江源的河流形态

流平缓,流路众多且不稳定,沙洲和浅滩林立,对应着辫状河型。

楚玛尔河的统计河段只从多尔改错东端出口至汇入通天河,其平均坡降为0.13%,沿程坡降变化较多。楚玛尔河在流出多尔改错后,流经长达136.4 km的一片高原湖泊湿地,平均坡降为0.09%,沿程山体限制性弯曲河段,河宽130~250 m。在整个362.2 km的统计河段中,河道平面3次呈现宽窄交替的藕节状形态,辫状河段2个。楚玛尔河的沿程河型转化依次是山体限制性河段(136.4 km)、峡谷段(12.6 km)、辫状段(32.4 km)、峡谷段(29.3 km)、辫状段(151.3 km)。

当曲的统计河段从海拔5 097 m的图像清晰的河道为起点,至囊极巴陇与沱沱河汇合为止,其平均坡降为0.19%,支流入汇如庭曲和布曲(图1(b))。当曲源头区经历82.7 km的峡谷段,其坡降为0.47%。在整个327.8 km的统计河段中,河道平面7次呈现宽窄交替的藕节状形态,其中辫状河段4个。当曲的沿程河型转化依次是峡谷段(82.7 km)、辫状段(31.8 km)、峡谷段(62.9 km)、辫状段(12.3 km)、峡谷段(16.4 km)、辫状段(50.7 km)、峡谷段(20.5 km)、辫状段(50.5 km)。

长江源水系的窄谷河段,河道处在两侧山体中间,对应着山体限制河段,每一个窄谷河段作为一个节点,不仅影响着河道走向,还对上游宽谷段起控制作用,这种控制作用主要体现维持上游辫状河型和阻止宽谷段泥沙下泄。

长江中游(湖北宜昌至江西湖口)长938 km,河

宽1~3 km,上荆江为微弯河段,下荆江为典型弯曲河段,局部存在沙洲和边滩,数量较少,下荆江近130 a以来发生过多自然裁弯(如古长堤(1887年)、尺八口(1909年)、河口(1911年)、碾子湾(1949年)和沙滩子(1972年))以及人工裁弯(如中洲子(1966年)和上车湾(1968年))。长江下游长862 km,河宽1~4 km,河段内沙洲和江心洲数量众多,沙洲和河道稳定,植被生长情况较好,可认为是分汊型河道。

汉江中下游主要位于江汉平原,约652 km,其中游(丹江口至碾盘山)低水时河宽300~400 m,洪水期可达2~3 km,共有大小沙洲143个和边滩38个,沙洲众多,河流分汊明显,部分沙洲较稳定,部分河段沙洲散乱分布,故判断其为具有辫状特性的分汊河段。汉江下游(碾盘山至汉口)河道呈现上宽下窄的特点,上半部河宽约800~1 100 m,下半部河宽约200~400 m,河道弯道众多(66个),弯曲系数1.81,故认为其为弯曲河流。

洞庭湖水系(湘资沅澧)主要位于湖南省境内,湘江(永州到乔口)河宽250~1 000 m,河道沿程有众多沙洲,不仅长度较大,而且洲体表面植被茂密,较为稳定,如橘子洲。资江(桃江至益阳甘溪港)河宽300~500 m,分布着较多的沙洲,尤其是入湖河段连续发育数个沙洲。沅江(凌津滩镇到汉寿)凌津滩镇至常德段较窄,河宽200~500 m,连续分布10个长度较大且稳定的沙洲;常德以下河段较宽,河宽800~1 500 m,河道主要是以弯曲河段为主,几乎不存在沙洲,以弯曲河段汇入洞庭湖。澧水(石门至津市小渡口)河宽200~500 m,沙洲数量不多,但沙洲面积较大。可见,湘资沅澧4条支流以分汊河段为主,局部存在若干弯道。

鄱阳湖水系属于长江下游的主要支流,赣江下游(万安到吴城)河宽600~1 600 m,河段沙洲、江心洲数量较多且分布较广。抚河(抚州至青岚湖)河宽400~800 m,存在众多边滩,河中沙洲零散,汇入湖口处发育数个江心洲,形态稳定,植被茂密。信江(上饶至余干)河宽200~600 m,沙洲数量多,且较稳定。修水下游(柘林水库至吴城镇)河宽250~400 m,沙洲分布较广,汇入湖口处有多个江心洲,将河道分成2股至多股分汊河道。可知,鄱阳湖水系除了限制性河段之外,可认为是分汊河段。

长江源、中下游和主要支流的河型与基本特征如表1所示,表中二元结构指河岸上部为细沙及黏土含量,下部为粗沙与卵石。

1.2 黄河水系

主要分析黄河源区、中下游及支流渭河下游的

冲积河型(表2)。黄河源是指位于龙羊峡水库以上的河段,流域面积12.2万km²,其冲积河型具有多样性^[23]。黄河源玛多至达日段,河长约325 km,流域面积20 930 km²,沙洲密布,河道被分成十数股小汉道,形成辫状河段(图2(a));达日到玛曲段河长585 km,流域面积41 029 km²,上游段为山体限制性的顺直或弯曲河段,直至玛曲的若尔盖冲积盆地,冲积河型沿程由分汊、网状和弯曲组成(图2),沙洲与河道较稳定,灌木与乔木茂密。玛曲至唐乃亥段河长373 km,流域面积35 924 km²,为峡谷河段。

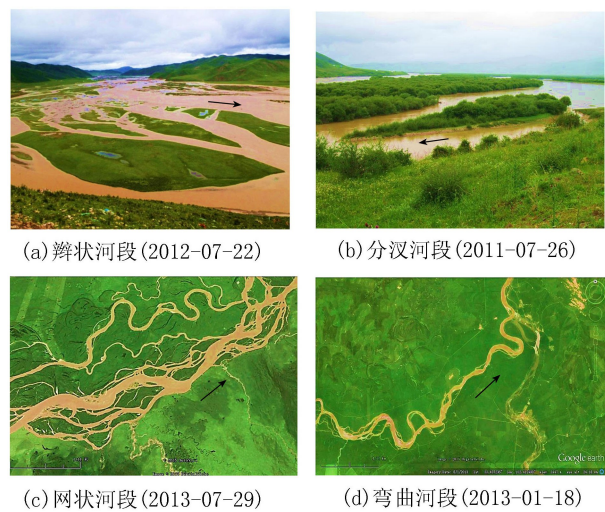


图2 黄河源河流形态

黄河中下游的冲积河段是众所周知的游荡(辫状)河段,来沙量大且粒径细,河道散乱多汊,曾经数千年河性游荡不定,且缓慢淤积抬升,形成地上悬河。黄河下游除了辫状河段之处,其下游河段河宽500~1 000 m,河道多有弯道出现,但弯曲系数较小

(1.10~1.35),可认为是顺直微弯河段。渭河下游(咸阳至入河口)河长208 km,河宽250~400 m,有数十个弯道,1949—2005年发生过14次自然裁弯,可认为是弯曲河段。

1.3 珠江水系

珠江是东、西、北江及下游三角洲诸河的总称,本文只考虑其下游的东、西、北三江的河型(表3)。西江下游河口段(广东三水县至企人石)全长139 km,河宽700~1 700 m,沙洲数量多,且沙洲植被生长茂盛,沙洲稳定,对河型有显著影响,属于分汊河段。北江下游河段(广东飞来峡至三水县)河宽500~1 000 m,存在较多沙洲,也属于分汊河段。东江下游河段(广东枫树坝水库至东莞石龙)河宽200~800 m,河道蜿蜒曲折,存在约65个弯道,认为其为弯曲河段。

1.4 东北水系

本文只涉及中国境内的黑龙江上中游以及支流松花江、嫩江和牡丹江的河型(表4)。黑龙江上中游段(漠河至乌苏里江汇流口)在黑龙江省境内长1 887 km,总流域面积180多万km²,窄深段河宽200~400 m,宽浅段河宽2~5 km,河道蜿蜒曲折,弯道众多(图3(a))。由于寒冷天气和冻土的影响,下游某些河段被汉道分割,流路较多,为网状河段(图3(c))。

东流松花江(嫩江入汇后的松花江,即黑龙江三岔河口至同江市)河长939 km,流域面积18.6万km²,流经松嫩平原及三江平原的河段河道较宽阔,河谷宽约2~10 km,且大部分河道内沙洲较多,汉道交织,河道中存在众多浅滩,而且某些河段多股河道并行,整个河段既有分汊河段也有网状河段。西流松花江中下

表2 黄河源、中下游及渭河下游的河型与基本特征

河段名称	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
达日以上	35°5'N,97°54'E	辫状	卵砾石、植被	540	111	42.40	-4~5.2
达日—玛曲	33°45'N,99°38'E	分汊、网状、弯曲	卵砾石、植被	610	504	153.6	-4~5.2
黄河中游	35°39'N,110°35'E	辫状	粉沙	650	89 900	377.2	8~14
黄河下游	34°57'N,113°28'E	顺直微弯	粉沙	650	72 200	301.4	12~14
渭水下游	34°19'N,108°42'E	弯曲	粉沙	450~700	32 300	68.05	6~13

表3 珠江下游的河型与基本特征

河段名称	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
西江	23°9'N,112°34'E	分汊	沙质	1 70	6 380	2 182	14~22
北江	23°44'N,113°11'E	分汊	沙质	1 70	536	417.2	14~22
东江	24°5'N,115°13'E	弯曲	二元结构	1 500~2 400	239	233.4	14~22

表4 黑龙江水系的河型与基本特征

河段名称	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
黑龙江	53°19'N,121°28'E	弯曲、分汊、网状	二元结构、植被	600~900	648	1 146	-33(冬)、18(夏)
东流松花江	45°26'N,124°39'E	分汊、网状	二元结构、植被	500	1 260	632.0	3~5
西流松花江	43°43'N,126°41'E	弯曲、网状	二元结构、植被	500	207	147.5	3~5
嫩江	50°8'N,125°17'E	弯曲、网状	二元结构、植被	500	145	206.0	2~4
牡丹江	44°2'N,128°55'E	弯曲、网状	二元结构、植被	500~600	71	52.5	3.9



(a)弯曲河段(2013-04-10)



(b)分叉河段(2014-04-10)



(c)网状河段(2010-10-05)

图3 东北水系河流形态

游河段(嫩江汇入之前的松花江河段,即丰满水电站至松花江河口)长 361.6 km,流域面积 3.1 万 km²。河道蜿蜒曲折,发育较多弯道,且河道单一,没有明显沙洲存在,属于弯曲河段。下游河段沿岸多沙洲,河道中汊河、串沟和江心洲岛较多,江心岛上丛生柳条杂草,使得河流散乱分汊,多汊并行,整体河道认为是弯曲河段兼有网状河段。

嫩江(河源至三岔河口)全长 1 370 km,流域面积 29.7 万 km²,河宽 5 ~ 8 km,最宽处可达 10 km 以上。在新多金村之前,河道蜿蜒曲折,存在 38 个弯道,虽存在一些沙洲使得河流分汊,但沙洲数量较少,且分布较散,故判断这段河道属于弯曲河段。在新多金村至汇流口的大部分河段中,沙滩、沙洲、江汊众多,且较为稳定,将河流分割得散乱分汊,河道呈不规则网状分布,属于网状河段。牡丹江中下游河段(吊水楼瀑布至河口)全长 530 km,流域面积 2.7 万 km²,大部分河段河宽 150 ~ 300 m,河道单一,蜿蜒曲折,共有百余个弯道,江中存在少量沙洲,但只存在局部小河段,且分布较分散,对河型影响不大,属于弯曲河流。入汇松花江附近,受江心洲及大块陆地的分割影响,河道散乱分汊,呈不规则网状分布,但此河段较短,故判断其为弯曲河段兼有网状河段。

1.5 辽河、海河和淮河水系

辽河(福德店水文站至入海口)河长 1 345 km,流域面积 21.9 万 km²,河宽 1 ~ 2 km,整个河道蜿蜒曲折,弯道众多,发育超过 200 个弯道,河道稳定,是典型的弯曲河流。海河(天津金刚桥至大沽口)是华北地区最大的河流,干流河段长 76 km,河身曲

折,弯道较多,尽管目前处在人工控制之下,而且水量较少,也属于是弯曲河流。淮河(桐柏县至三江营)介于长江和黄河之间,全长 1 000 km,流域面积 27 万 km²,河宽 150 ~ 700 m,最宽可达 1 ~ 2 km,大部分河段河道单一,蜿蜒曲折,有百余个弯道存在,无明显沙洲,判断其为弯曲河流。辽河、海河和淮河的河型与基本特征见表 5。

1.6 塔里木河和雅鲁藏布江水系

塔里木河位于塔里木盆地北部,由阿克苏河、叶尔羌河和田河在肖夹克汇合而成,全长 2 197 km,流域面积 19.8 万 km²,窄段河宽 300 ~ 500 m,宽段河宽 1 ~ 3 km。塔里木河干流的水文站从上游至下游依次是阿拉尔、新其满、英巴扎、乌斯满、恰拉。据水文资料分析(表 6),阿拉尔站 1957—2000 年的多年平均年径流量为 45.82 亿 m³,多年平均年输沙量为 2 253 万 t。阿拉尔站的 76% 径流量和 95% 年输沙量集中于 6—9 月^[24]。塔里木河上游河段(肖夹克至英巴扎)长为 495 km,沙洲边滩众多,河道分汊摆动,为辫状河道(图 4(a))。塔里木河中游(英巴扎至恰拉段)长 398 km,河道平面形态蜿蜒曲折,局部河段的弯曲度超过 1.5,是典型的蜿蜒型河流(图 4(b))。恰拉以下河段为塔里木河下游河段,长 428 km,仍是弯曲型河段,但是因为中上游的耗水,水量大幅减少,河道宽度沿程缩窄至 150 m。

雅鲁藏布江中游段(里孜至派乡)位于欧亚板块碰撞的挤压带,河长 1 293 km,流域面积 16.4 万 km²。宽窄相间的河谷,宽段为辫状河段(图 5)加上窄段的峡谷限制体,谷底宽达 2 ~ 8 km,河床内不稳定的沙

表 5 辽河、海河和淮河的河型与基本特征

河段名称	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
辽河	42°58'N, 123°32'E	弯曲	二元结构	700	417	29.35	4 ~ 9
海河	39° 8'N, 117°11'E	弯曲	二元结构	548	7.38	8.203	4 ~ 14
淮河	32°23'N, 113°23'E	弯曲	二元结构	910	896	269.7	11 ~ 16

表 6 塔里木河和雅鲁藏布江河型与基本特征

河 段	起始经纬度	河型	河岸物质组成	年降水量/mm	年输沙量/万 t	年径流量/亿 m ³	平均气温/℃
塔里木河上游	40°47'N, 80°94'E	辫状	细 沙	17 ~ 43	2 253	45.862	10.6 ~ 11.5
塔里木河中下游	41°04'N, 82°76'E	弯曲	细 沙	17 ~ 43			10.6 ~ 11.5
雅鲁藏布江中游	29°33'N, 84° 8'E	辫状	卵砾石	428.7	1 463	1 359	-1 ~ 14



(a) 上游辫状河段(2012-07-18)



(b) 中游弯曲河段(2010-08-04)

图4 塔里木河河流形态



图5 雅鲁藏布江中游的辫状河道

洲众多,构成高原独特的复杂辫状河道。

2 河型成因

冲积河型的形成是水流泥沙输移与河床河岸边界长期相互作用的平面形态表现。冲积河流河型的成因主要取决于流域的特性,如来水来沙量及其过程和来沙粗细^[11],部分取决于河道的滨河植被和河谷控制(如节点)。要分析河型成因,首先要区别原因与结果,如在河床演变学的时间尺度(<100 a)上河道形态和河床比降是河型形成的结果,而非河型形成的原因;其次要区别主要因素和次要因素,如来水来沙量是主要因素,而滨河植被和节点控制是次要因素。床沙粗细不是判断河型成因的依据,因为对于辫状河道,有沙质河床(如黄河中下游、塔里木河上游)和卵石河床(如长江源、黄河源、雅鲁藏布江)。对于弯曲河道,也有沙质河床(如长江中游荆江河段、黑龙江水系、塔里木河上游)和卵石河床(黄河源干流及其支流白河、黑河、泽曲)。滨河植被不是冲积大河的河型成因的控制因素,对于冲积中小河流形成弯曲或分汊河道具有一定调控作用。因此,冲积河型成因既需要从主要因素着手分析,也需要针对次要因素逐一比较,从中对不同河型进行总结,归纳出最关键的影响因素。

这里参考钱宁^[11]关于决定河型形成的主要因素是床沙质来量与河岸抗冲性的认识,同时作者基于长期野外调查和对中国冲积大河的河型分布认识,提出如下决定河型形成的关键无量纲因素:

$$R_p = f\left(\frac{q_s}{q_s^*}, \frac{\tau_b}{\tau_{b,c}}, V_T\right) \quad (1)$$

式中: R_p 为冲积河型(弯曲、辫状、分汊、网状)量化指标; q_s 为平滩水位时上游来沙量,以推移质为主,则为推移质输沙率,以悬移质为主,则为悬移质输沙率; q_s^* 为平滩水位时河道输沙能力,以推移质输沙为主的河流,则采用推移质输沙能力,如 Meyer-Peter 和 Müller 推移质输沙率公式及其修正公式,以悬移质输沙为主的河流,则采用悬移质水流挟沙力,如张瑞瑾水流挟沙力公式; τ_b 为近岸水流切应力, $\tau_b = \sqrt{gHS}$,其中 g 为重力加速度, H 为近岸水深, S 为近岸水流比降; $\tau_{b,c}$ 为河岸临界抗冲切应力,具体来说河岸物质组成较细且含有黏土成分则具有更强的抗冲切应力,若河岸的滨河植被形成根土复合体,如树木、草甸或泥炭,则抗冲切应力显著增加; V_T 为表征河谷局部地形控制作用,如宽窄相间的节点易在宽段发育沙洲形成辫状或分汊河道(如长江中下游分汊河段),若宽段足够宽则可能由于河道改道形成多河道并行的网状河道(如黄河源玛曲河段)。

对于辫状河道, $q_s/q_s^* \gg 1$ 且 $\tau_b/\tau_{b,c} \gg 1$,即来沙量远大于推移质输沙能力或悬移质水流挟沙力,河床处在不断淤积抬升过程,而且河岸临界抗冲切应力远小于近岸水流切应力,河岸和河漫滩易冲刷,使得河道展宽。河床的淤积与河岸易冲刷,使得河床易形成不稳定性沙洲,河道多汊道,处在冲淤交替过程中,如长江源、黄河源玛多—达日河段、黄河中下游、塔里木河上游、雅鲁藏布江中游等辫状河流均是洪水期来沙量大,且河岸缺少黏性物质,河岸不稳定,河床冲淤变形剧烈,河道也不稳定。

对于弯曲河道, $q_s/q_s^* \approx 1$ 且 $\tau_b/\tau_{b,c} > 1$,即年来来沙量基本等于推移质输沙能力或悬移质水流挟沙力,河床处在冲不淤或微冲微淤或非汛期淤积而汛期冲刷的动态平衡状况。汛期河岸抗冲刷能力弱于水流切应力,凹岸出现冲刷及崩岸,非汛期河岸抗冲刷能力强于水流切应力,凹岸保持稳定,凸岸边滩出现淤积,从而使得凹岸横向蚀退速率与凸岸横向淤积速率基本保持同步,河湾横向蜿蜒和稳定发育。例如长江中游荆江河段、黑龙江水系、塔里木河中下游、汉江下游、黄河源的若尔盖弯曲河流、渭河下游、辽河、海河、淮河等,单一弯曲河道稳定,而且河岸侵蚀速率较低。

对于分汊河道, $q_s/q_s^* \approx 1$ 且 $\tau_b/\tau_{b,c} \geq 1$,即年内

来沙量基本等于推移质输沙能力或悬移质水流挟沙力,河床处在不冲不淤的动态平衡状况,河岸的展宽受沙洲横向发育、次汉淤积和主汉冲刷有关,基本可认为汛期河岸抗冲刷能力基本等于水流切应力,但局部河岸或沙洲仍发生局部冲刷,非汛期河岸抗冲刷能力强于水流切应力,河岸、河漫滩和沙洲淤积,分汉河道具有较强的稳定性。局部河谷的控制作用也发挥着一定作用,如长江中游武汉河段的天兴洲分汉河道。在长江城陵矶以下的沙质河床广为分布,其边界特点是抗冲性较强的节点与第四纪松散沉积物相间分布,河道呈宽窄相间藕节型。分汉河段的纵向输沙特点是窄段汛期比降大,宽段比降小,挟沙水流进入宽段后因流速降低而大量沉积,当进入汛期后至枯水期,窄段比降减小而宽段比降增大,汛期沉积的泥沙从宽段冲刷进入窄段,从而使泥沙沿程间歇性输移。从河道平面的水沙输移来看,分汉河道因进口节点挑流控导作用,不同流量级下主流线摆幅甚大,使得次汉能够长期维持而不衰亡,同时导致洲头附近存在由次汉一侧指向主汉出现较强的横向比降和泥沙输移。可知,来水来沙在节点控导作用下产生不同的水沙输移强度,是分汉河道形成和维持的主要动力条件,参与该冲淤过程主要是悬移质造床,例如,长江下游、黄河源玛曲的局部河段、洞庭湖水系下游、鄱阳湖水系下游、珠江、黑龙江水系的部分河段,稳定的沙洲或江心洲基本植被化,河道稳定,基本处于冲淤平衡状况。

对于网状河道, $q_s/q_s^* \approx 1$ 且 $\tau_b/\tau_{b,c} \leq 1$,即年内来沙量基本等于推移质输沙能力或悬移质水流挟沙力,河床处在不冲不淤的动态平衡状况。网状河道的河岸因植被作用,其抗冲刷能力一般强于水流切应力,除非遇上低频率洪水,发生漫滩冲刷,河道改道形成新流路,如黑龙江水系的部分河段,春季上游冰雪和干流冰雪已融化,下游河道未融化或部分融化,导致河道输沙能力不足,水流漫滩冲刷,河道改道形成新流路。

3 结 语

中国大河的冲积河型具有独特性和多样性,以弯曲和辫状河型为主导,分汉河型出现于多个冲积大河的部分河段,网状河型只存在极少数河流的特定河段,从整体来看洞庭湖水系和鄱阳湖水系也可看作网状河段。同一条冲积大河从源头到下游,其河型沿程是不断变化,如长江沿程由辫状、弯曲至分汉,而黄河沿程则由辫状、分汉、网状、弯曲、辫状(游荡)至微弯,具有河型多样性。冲积河型的成因在定性上主要由 2 个无量纲因素(来沙量与输沙能

力之比和近岸水流切应力与河岸临界抗冲切应力之比)决定,河谷局部地形控制作用在局部河段对于分汉和网状河段发挥一定辅助作用。

值得一提的是,对于缺少长系列水沙与地形测量资料的青藏高原河流、西北干旱区河流和东北寒带河流,这些河流既处在自然状况而且缺少深入研究,未来一段时期它们很可能是国内河流地貌学与河床演变学的重要对象。然而,单独研究任何一条河流的河型成因和河床演变都面临较多困难,而且短期野外考察也难取得实质性突破,采用多源遥感影像解译不失为一个新研究方法。对某个区域彼此独立且互不从属的若干冲积河流,具有相同的冲积河型,若将这个区域的冲积河流归为一个冲积河群,如长江源的辫状河群和黄河源的若干弯曲河群,这些冲积河群可为研究其内部共性与外部差异提供了新思路。同时,运用室内宽体水槽塑造和模拟弯曲与辫状河道,也是在可控水沙和边界条件下研究河型成因的有效实验方法。

参考文献:

- [1] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.
- [2] 许炯心.我国游荡河型和江心洲河型的地域分布特征[J].科学通报,1990(6): 439-442. (XU Jiongxin. The geographic distribution characteristics of wandering river and mid-bar river in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1990(6): 439-442. (in Chinese))
- [3] 许炯心.中国江心洲河型的地域分布特征[J].云南地理环境研究,1992,4(2): 46-55. (XU Jiongxin. Areal distribution of the stable braided river channel pattern in China [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1992,4(2): 46-55. (in Chinese))
- [4] LATRUBESSE E M, STEVAUX J C, SINHA R. Tropical rivers [J]. Geomorphology, 2005, 70(3/4): 187-206.
- [5] LATRUBESSE E M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers [J]. Geomorphology, 2008, 101(1): 130-145.
- [6] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel patterns: braided, meandering and straight [R]. Washington D. C. : United States Geological Survey, 1957.
- [7] CHANG H H. Minimum stream power and river channel patterns [J]. Journal of Hydrology, 1979, 41(3/4): 303-327.
- [8] SCHUMM S A. Patterns of alluvial rivers [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1985, 13(13): 5-27.
- [9] ROSGEN D L. A classification of natural rivers [J]. Catena, 1994, 22(3): 169-199.

(下转第 87 页)

- 研究[J]. 建筑材料学报,2001,4(2):196-198. (JIANG Hongyi, LIANG Bo, ZHANG Lianmeng. Investigation of MPB with super early strength for repair of concrete[J]. Journal of Building Materials,2001,4(2):196-198. (in Chinese))
- [15] 雒亚莉,陈兵. 磷酸镁水泥的研究与工程应用[J]. 水泥,2009(9):16-19. (LUO Yali, CHEN Bing. Research on magnesium-phosphate cement and its applications[J]. Cement,2009(9):16-19. (in Chinese))
- [16] 赖振宇,李倩. 磷酸镁水泥固化放射性废物研究现状[J]. 广东化工,2012,39(8):201. (LAI Zhenyu, LI Qian. Research Status on solid radioactive wastes of magnesium phosphate cement[J]. Guangdong Chemical Industry,2012,39(8):201. (in Chinese))
- [17] 赖振宇,钱觉时,卢忠远,等. 不同温度处理对磷酸镁水泥性能的影响[J]. 功能材料,2012,43(15):2065-2070. (LAI Zhenyu, QIAN Jueshi, LU Zhongyuan, et al. Effect of different temperature treatment to properties of magnesium phosphate cement[J]. Journal of Functional materials,2012,43(15):2065-2070. (in Chinese))
- [18] 马保国,王景然,李相国,等. 不同环境条件下磷酸镁水泥对硝酸铅的固化[J]. 功能材料,2013,44(21):3183-3185. (MA Baoguo, WANG Jingran, LI Xiangguo, et al. The solidification of magnesium phosphate cement with lead nitrate in different environmental [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44 (21): 3183-3185. (in Chinese))
- [19] QIAO Fei, CHAU C K, LI Zongjin. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24:695-700.
- [20] DING Zhu, LI Zongjin. Effect of aggregates and water contents on the properties of magnesium phospho-silicate cement[J]. Cement and Concrete Research,2005,27(1):11-18.
- [21] ROMILDO D, FILHOA T, GHAVAMI K. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibers[J]. Cement and Concrete Composites,2005,27(4):537-546.

(收稿日期:2016-02-15 编辑:熊水斌)

(上接第13页)

- [10] EATON B C, MILLAR R G, DAVIDSON S. Channel patterns: braided, anabranching, and single-thread [J]. Geomorphology,2010,120(3):353-364.
- [11] 钱宁. 关于河流分类及成因问题的讨论 [J]. 地理学报,1985,40(1):1-10. (QIAN Ning. On the classification and causes of formation of different channel patterns [J]. Acta Geographica Sinica, 1985, 40 (1): 1-10. (in Chinese))
- [12] KNIGHTON A D, NANSON G C. Anastomosis and the continuum of channel pattern [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1993,18(7):613-625.
- [13] MAKASKE B. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products [J]. Earth Science Review,2001,53(3/4):149-196.
- [14] 王随继,任明达. 根据河道形态和沉积特征的河流新分类 [J]. 沉积学报,1999,17(2):240-246. (WANG Suiji, REN Mingda. A new classification of fluvial rivers according to channel planform and sediment characteristics [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17 (2): 240-246. (in Chinese))
- [15] 尹学良. 河型成因研究 [J]. 水利学报,1993,24(4):1-11. (YIN Xueliang. Formation of river patterns [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1993,24(4):1-11. (in Chinese))
- [16] TWIDALE C R. River patterns and their meaning [J]. Earth-Science Review,2004,67(3/4):159-218.
- [17] KLEINHANS M G. Sorting out river channel patterns [J]. Progress in Physical Geography,2004,34(3):287-326.
- [18] van den BERG J H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers [J]. Geomorphology, 1995, 12 (4): 259-279.
- [19] ALABYAN A, CHALOV R S. Types of river channel patterns and their natural controls [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1998,23(5):467-474.
- [20] LEWIN J, BREWER P A. Predicting channel patterns [J]. Geomorphology,2001,40(3/4):329-339.
- [21] DADE W B. Grain size, sediment transport and alluvial channel pattern [J]. Geomorphology, 2001, 35 (1/2): 119-126.
- [22] 倪晋仁,王随继. 论顺直河流 [J]. 水利学报,2000,31(12):14-21. (NI Jinren, WANG Suiji. On straight river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(12):14-21. (in Chinese))
- [23] LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al. Analysis of controls upon channel planform at the First Great Bend of the upper Yellow River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences,2013,23(5):833-848.
- [24] 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):27-35. (WANG Yangui, HU Chunhong, ZHOU Wenhao, et al. Evolution characteristics of Tarim River [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(12):27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2016-02-16 编辑:郑孝宇)