



水利部科学技术局

电力工业部科学技术委员会

水利水电 科技进展

第一册

水利出版社



水利水电科技进展

第一册

水利部科学技术局
电力工业部科学技术委员会

水利出版社

内 容 提 要

本书由五篇专题论文组成,包括河床演变,明渠不恒定流,空穴流,高坝泄洪消能和封闭泄水管道的通气等内容。

这些专题论述,都较系统地介绍了本专题的当前发展水平和发展趋向,并附以近年的主要参考文献,是一本为赶超世界先进水平的重要参考资料。

本书可供从事水利水电科研、设计和施工的科技人员阅读,亦可供有关院校师生参考。

21100165

水利水电科技进展 第一册

水利部科学技术局

电力工业部科学技术委员会

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9 $\frac{1}{2}$ 印张 215千字

1980年9月第一版 1980年9月北京第一次印刷

印数 0001—3240册 定价 1.30元

书号 15047·4064

前 言

为了实现我国四个现代化的伟大任务和加速水利水电建设的步伐，科学技术的现代化需要走在前面。要做到这一点，就需要了解国内外水利水电科学技术在各个专业领域内的基本情况和发展趋向，作为确定赶超起点和方向的参考。为此，我们组织出版《水利水电科技进展》（第一册），其内容，有些侧重国内，有些侧重国外，多数同时包括国内外情况。

本书收入河床演变，明渠不恒定流，空穴流，高坝泄洪消能及封闭泄水管道通气等与水力学有关的专题五篇。

我们诚恳希望广大读者对本书的内容提出宝贵意见。

水利部科学技术局
电力工业部科学技术委员会
1979.12.

目 录

前 言

河床演变科学研究动态及发展方向·····	钱宁 (1)
明渠不恒定流研究的现状和发展·····	林秉南 (30)
国外空穴流的研究进展·····	许协庆、周胜 (64)
关于高坝泄洪消能的若干进展 ·····	陈椿庭 (115)
封闭泄水管道的通气 ·····	高又生 (138)

河床演变科学研究动态及发展方向

钱 宁

(清华大学水利系)

一、前 言

研究在水流的作用下河床的形态及其变化的科学叫做“河床演变学”。水流与河床构成一个矛盾的统体。水流作用于河床,使河床发生变化,河床的变化又反过来影响水流的结构,它们相互影响,相互制约,永远处于变化和发展的过程中。

“河床演变学”是一门新兴的学科。对于水利工作者来说,它和“河流动力学”一起,是综合开发河流水利资源和整治河道的理论基础。对于地质地理学家来说,它是动力地貌的一个分支——“河流地貌学”。

二、学科发展的经过

在五十年代以前,“河床演变学”还不是一门独立的学科。当时在为改善通航条件而进行的河道整治中,经常还引用早在1908年法格(O. Fargue)在法国加隆河(Garrone River)上通过长期观察而提出的五条河湾基本定律。对于河床演变中的某些个别问题,虽然也有零星的论文散见于期刊中,但尚未见有这方面的综合性的专著。1955年出版的列里亚夫斯基(S. Leliavsky)的《河流水力学导论》一书,也还是以泥沙运动为主要的讨论内容,只有一章涉及到某些弯道的河床演变问题^[1]。在印度及巴基斯坦,主要是通过灌溉渠道的水流的观察,提出了所谓冲积河流的均衡理论(Regime Theory),讨论了河流的调整作用及形态特征的某些方面^[2, 3]。这类著作有较强的地区性,在普遍推广应用时,还存在一定问题。

从六十年代开始,陆续有一系列专著问世。据不完全统计,截至1977年为止,仅普通河床演变学的书籍和论文集就有十几种之多,其中包括^[4~13]:

- (1) 地貌学中的河流过程, 1964年;
- (2) 河流地貌论文集, 1967年;
- (3) 河流——动力及形态学, 1968年;
- (4) 河流及河流阶地, 1970年;
- (5) 河流地貌文献集, 1972年;
- (6) 河流地貌学, 1973年;
- (7) 河流过程及沉积学, 1973年;

(8) 河流的工作, 1974年;

(9) 河槽的变迁, 1977年;

(10) 河流系统, 1977年。

这些论著涉及的方面很广, 有它独特的研究对象和研究方法, 标志着河床演变学正逐步发展成为一门独立的学科而取得其应有的地位。

在我国, 劳动人民在和河流长期作斗争的过程中, 对河流的性质有了一定的认识。早在两千年以前, 贾让就用“游荡”两个字来形容黄河的情况。明代刘天和经过“周询广视, 历考前闻”, 全面地总结了造成黄河迁徙不定的六点原因^[14]。

“河水至浊, 下游束隘停阻则淤, 中道水散流缓则淤, ……一也。从西北极高之地建瓴而下, 流极湍悍, 堤防不能御, 二也。易淤故河底常高, ……水行地上, 无长江之渊深, 三也。旁无湖泊之停滞, 四也。孟津而下, 地极平衍, 无群山之束隘, 五也。中州南北悉河故道, 土杂泥沙, 善崩易决, 六也”。见解十分精辟。当然, 对江河特性的真正深入系统的研究, 也只有当中国人民在共产党的领导下获得彻底解放, 生产力和科学技术得到充分发展以后才有可能。

和国外的发展相对应的, 我们也是在进入六十年代以后, 才陆续有一些专门著作出版^[15~17]。对黄河下游的游荡性河道, 长江中、下游的江心洲河道, 以及长江荆江段的弯曲性河道的演变特性, 修建官厅水库、三门峡水库及丹江口水库后下游的河流再造床过程, 长江、钱塘江、珠江及黄河河口的演变规律等方面, 都取得了长足的进展。可以预期, 河床演变作为一门学科, 今后必将在我国得到蓬勃的发展。

由于社会制度和具体条件的不同, 在研究工作的侧重点和研究手段及方法上, 国外有国外的做法, 我们有我们的特色。在社会主义的新中国, 国家对江河治理十分重视。结合具体生产任务, 由国家投入力量, 在大江大河上, 选择重点河段, 布设站网, 定时、定位地进行观测。观测河段一般长几十公里, 也有超过一百公里以上的。观测次数一年中至少几次, 有多到十几次的, 较大洪峰通过前后, 都有测次。这样, 我们就能够取得河床演变全过程的资料, 掌握各种来水来沙条件对河床演变的影响。中国是一个历史悠久, 文化昌盛的国家, 上至中央朝廷编纂的史书和故宫汇集的档案, 下至地方县志中, 对水旱灾害和河流变迁都有详细的记载, 这就为了解江河的历史演变创造了卓越的条件。在西方国家, 政府部门也在大江大河上进行一些观测。例如, 美国对密西西比河裁湾后的影响及密苏里河的河床演变, 都曾做过观测和研究, 取得一些宝贵的资料^[18、19]。但是, 总的来说, 国家在这方面投入力量是不大的。在另一方面, 由于交通方便, 量测仪器先进, 各处均有详尽的航测图, 有很多科研工作者, 根据工作需要或个人兴趣, 有时甚至利用休假节日, 在一些中小河流进行简单的量测, 或利用大比尺地图作定量的分析, 日积月累, 也取得了大量第一手的资料^[20~35]。这部分资料虽不包括河床演变的全过程, 但却反映了各种地质地理条件下的特点, 有一定的参考价值。在某些地区, 如加拿大的北部和美国的阿拉斯加州, 当地地广人稀, 很多土地还是从未经开垦的处女地, 河流在漫长的岁月中, 在地面上所留下的痕迹都完整地保留了下来。利用这些局部地形和植物群落的生态特征, 也为研究河流的历史演变过程开辟了广阔的前景^[36~38]。

三、河床演变学的学科内容及现状

河流两岸自古以来即为人类繁衍生息之所，河流对人类活动的影响十分深远。出于生产的需要，人们在江河上修建了大量水利工程。这些工程的建成，破坏了河流的相对平衡，引起了河流的再造床过程。对于这些变化，如果事先不能作出预报，及时采取措施，则不但会带来新的困难，甚至还会发展到使工程失效。要想了解河流因受人为影响而发生的变化，必须首先掌握河流在天然条件下的形成过程及其演变规律。这两个方面的不同要求，组成了河床演变学的学科内容。

具体地来说，河床演变学包括下面几个主要方面：

(一) 流域与水系^[30]

河流作为流域的一个组成部分，它的特性，归根结底是流域的特性决定了的。

早在四十年代，霍登(R.E.Horton)就曾提出过一个水系形成的简单模式^[40]。图1(a)为霍登设想的河谷边坡剖面图，其中 o 为分水岭， c 为坡脚，河谷边坡上下两段较平，中间较陡。当降雨量大于土壤入渗量时，将会形成地表径流，随着流程的加长，地表径流的流量越来越大。从地表物质的侵蚀情况来看，整个坡面可以分为三段：上段 oa 内水流的剪切力小于土壤抗冲力，属于无侵蚀带。中段 ab 冲刷最为强烈。下段 bc 由于坡度较平，来自坡面上游的物质不能被水流所带走，将会在这里沉积下来。无侵蚀带的存在，使得在没有地质构造运动的前提下，河流一般不可能切穿分水岭，袭夺邻近流域的河流。缓坡沉积带的存在，则使流域面上的产沙量小于进入河道的沙量。流域面积越大，单位面积的产沙量越小。在美国的西南部，单位面积产沙量就和流域面积的0.23次方成反比^[41]。在我国西北的黄土丘陵沟壑区，情况有所不同。这里的流域剖面如图1(b)所示。在塬、梁、峁的坡脚下，一般不存在开阔平坦可供泥沙沉积的地方。极大部分河流又都处于缓慢

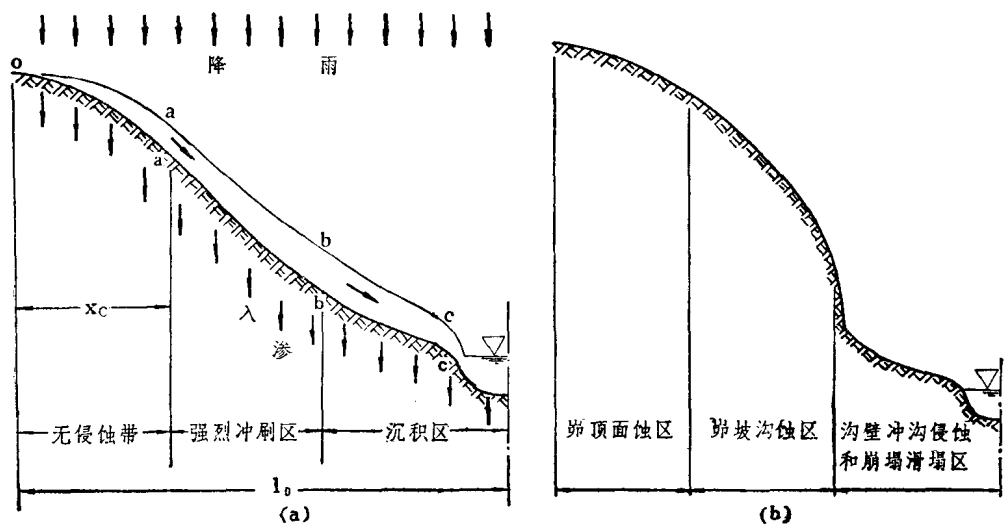


图1 河流及河谷剖面图
(a)河谷边坡上的土壤侵蚀分带；(b)黄土丘陵区河谷剖面图

下切阶段，没有永久性的泥沙堆积。因而，在单位面积的产沙量和流域面积之间，就看不出有什么相关^[42]。

降雨以后，流域面上径流泥沙的产生和汇流过程是一个十分复杂的问题，过去的分析计算都限于简化的情况，反映不了错综复杂的自然现象。当前的趋势是，企图通过模型来进行研究，其中包括物理模型和数学模型^[43~47]。由于模拟坡面泥沙运动所存在的困难，流域模型试验一般还仅限于清水定床的汇流，对于动床试验来说，则只有一些定性的结果。

水系是由大大小小的沟道和河流所组成，可按河道的大小进行分级。目前习惯的做法是把最小的、不分枝的支流作为第一级河流，两条第一级河流相汇以后所形成的河流作为第二级河流，汇合了两条第二级河流的，作为第三级河流。靠近河口的一段河流，级别最高，这个级别也就作为整个流域的级别^[48]。

水系作为一个整体，自有一定的规律性。在标志流域及水系特征的某些因素之间，存在一定的关系。霍登及其后继者曾从大量实测资料中总结出五条水系组成的几何规律，即：河流数量规律，河流长度规律，河流面积规律，河流坡度规律及河流高差规律，其中河流数量规律的表达形式如下：

$$N_u = R^{k-u} \quad (1)$$

N_u 为级别为 u 的河流的数目； k 为干流的级别； R 为分枝比（ $=N_u/N_{u+1}$ ）。自从六十年代以来，地貌现象的研究正越来越多地从定性的描述走向定量，其中水系的统计分析是重要的突破口之一^[49]。对于地理学上网络现象的分析，现在已有专门著作出版^[50]。大量研究工作表明，在水系的发育中，沟道与河槽的形成以及它们之间的相汇可以有各种不同的方式，整个过程具有随机性质，服从一定的概率规律。所谓水系组成的几何规律，在很大程度上，只不过是把分级的逻辑应用到天然分枝网络的必然产物。这一类问题，在统计数学上，可以采用信步漫行（Random Walk）的模式进行研究。有关这方面的最新进展可以参阅文献^[51]。

（二）河型分类及成因

把河流按不同性质进行分类，是系统概括河床演变现象的一个重要前提。正是在这一点上，当前的工作做得还很不够，认识还不统一。表1为一些学者所建议的河型分类，有按河流平面形态分类的，这样可以分成弯曲、顺直、网状、单股、分汊、江心洲等；也有包含了河流运动特性在内的，如周期展宽、蜿蜒、游荡、摆动等。在自然现象的分类中，最好采用统一的标准，或者按照形态分类，或者按照运动特性分类，至少对于同一级的分类，应该尽可能不采用混合型的划分准则。从这个角度考虑，国外通用的河型分类方法（见里奥普及康德拉契也夫的分类）有其一定的优越性。但同样是分汊（或网状）河流，长江中、下游那样具有江心洲的河道，相对来说，都比较稳定；而黄河下游则除了支汊很多以外，还具有主流摆动不定，平面外形多变的特点。这两类河流实质上反映了两种不同的河型。为此，我们建议，在按河床演变性质分类时，可以首先根据平面形态进行一级分类，把河流分为弯曲、分汊及顺直三种基本河型。然后又把分汊型河流按照其运动特性进行二级分类，分为相对稳定（长江中、下游型）及游荡（黄河下游型）两个亚类。具体分

类的方法如下^[52]：

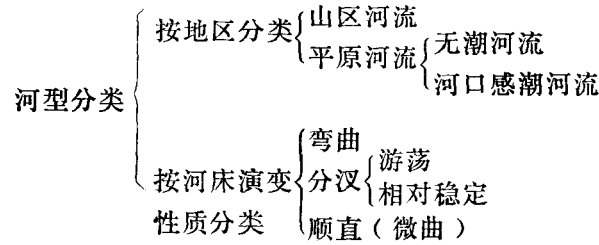


表 1 河 型 分 类 一 览 表

研究工作者	河 型 分 类			
	弯 曲		非 弯 曲	
里 奥 普	弯 曲		顺 直	网 状
康德拉契也夫	自 由 弯 曲	非 自 由 弯 曲	单 股	分 汉
罗 辛 斯 基	弯 曲		周 期 增 宽	游 荡
武汉水利电力学院	蜿 蜒		顺 直 微 弯	分 汉 游 荡
方 宗 岱	弯 曲		江 心 洲	摆 动

在各种河型的成因问题上，同样存在着不同的看法。归纳起来，大致有四种主要的论点：

（1）认为流域来水来沙条件及河谷比降是塑造河型的决定因素。例如，河谷比降大，流域来沙多，河床堆积抬高，洪峰暴涨猛落，是造成游荡性河道的原因^[17]。流量变幅不大，洪水不足以造成切滩改道，汛期微淤，非汛期微冲，长期内大致保持冲淤平衡，则有利于形成弯曲性河道^[53]。洪水变差不大，洪峰流量变差系数 C_v 小于0.3时，都能形成长江中、下游型的分汉性河道^[54]等等。

（2）认为河床边界条件是决定河型的主要因素。在顺直的河槽中，常存在依附于主槽两岸的犬牙交错的边滩，这种边滩以缓慢的速度向下游移动。罗辛斯基及库兹明提出，边滩移动速度和河岸冲刷速度的相互关系对河型的形成有决定性的作用^[55]。当河岸较易冲刷，或边滩下移较慢，在边滩的下移还没有来得及掩护原来被冲刷的河岸时，河岸有可能已经冲成曲率较大的凹岸。这样发展下去，就会形成弯曲性河道。如果河岸的可冲性很小，将会保持顺直的外形；相反地，如果河岸的可冲性很大，则会发展成为游荡性河流。对于长江中、下游型的分汉性河道来说，则除了河岸必须很容易崩塌后退，有可能展宽分汉以外，还要求河段的进口有一定长度的束窄段。通过这样的节点后，主流流向不会有大幅度的变迁，并随着水位的涨落，进入汉道的水流的动力轴线能在两汉之间往复摆动，使每股汉道都有发生冲刷的机会，有利于汉道长期保持稳定^[56]。

（3）认为不同河型的形成反映了河流自动调整作用的一个环节。河流塑造出一定的

河型, 通过这种河型所具有的独特的比降, 断面形态和糙率来体现出一定的输水能力和挟沙能力, 使得来自上游的水和泥沙能够通过河段下泄, 尽可能保持相对平衡, 并使能量消耗的沿程分布遵循一定的统计规律^[52]。对于后者来说, 杨志达 (C.T. Yang) 曾设想在满足上述输水排沙的前提下, 单位重量的水在单位时间内所损耗的能量, 力求达到当地具体条件许可范围内的最小值^[57], 写成数学方程, 为:

$$UJ = \text{最小} \quad (2)$$

其中 U 为平均流速, J 为比降。将水流连续方程及水流运动方程代入上式后, 得:

$$UJ = n^{-0.6} Q^{0.4} J^{1.3} B^{-0.4} = \text{最小} \quad (3)$$

如果河岸极易冲刷, 则河流调整的结果将以增加河宽为主, 最终发展成为游荡性河流。如果两岸有一定的抗冲性, 且坍塌的强度又不是很大, 则河流将加大河长, 减小比降, 发展成为弯曲性河流。对于两岸受到约束, 河宽既不可能增加, 河长也不可能加大的顺直型河流来说, 则只有通过主流流路的弯曲来满足式 (3) 的要求。

(4) 认为应该从流体力学的角度, 研究各种河型形成的内在机理。在这方面又有两型不同的途径。一种是从流体的稳定性考虑^[58~61], 在基本流动上面, 叠加了在河宽方向及水流方向均具有一定周期性的扰动, 然后再看这样的扰动是逐渐衰减还是不断扩大。这样的分析表明, 对于给定的水流阻力和水深来说, 如果河宽小于某个临界值, 河流将发生弯曲; 而一个较宽的河流将分成更多的支汊, 河流越宽, 则支汊越多。另一种分析是, 从水流的大尺度紊动着手^[62]。过去把紊动看成是纯粹杂乱无章的随机现象, 晚近的研究, 证明紊流结构自有一定的规则性, 表现为一连串可以观察到的现象, 尽管每一现象围绕它的平均值有各种各式随机的偏差^[63, 64]。从边界上所产生的小尺度漩涡在脱离边界、上升到主流区的过程中, 会逐步扩大, 然后在行经一段距离以后, 又崩解为很多小尺度的漩涡。这个距离具有一定的周期性, 弯曲性河道的形成显然与这种周期性的大尺度漩涡有关。

在河型成因问题的研究工作中, 很多学者通过在室内模拟天然河道来进行试验研究。这方面的先驱者是美国的弗立特金 (J.F. Friedkin), 他在四十年代曾对弯曲性河流的形成及演变进行了大量试验^[65]。事实上, 弗立特金在模型小河中得到的是顺直型河道中主流流路的弯曲, 而不是真正具有河环的弯曲性河流。六十年代初期, 长江水利科学研究院河流研究室及尹学良分别采用在边滩上植草护滩及在洪水加入粘土颗粒的办法, 把边滩固定下来, 从而在试验室中得到了真正的弯曲性河流^[66, 67]。1972年美国的舒姆 (S.A. Schumm) 等采用了类似尹学良的办法, 也在模型小河中复制了弯曲性河道^[68]。这些试验结果都表明, 河岸可冲刷性在河型形成中的重要意义。舒姆也曾在流域来沙只有床沙质的情况下进行造床试验, 所采用的泥沙中径为 0.70 毫米, 比降的变化范围为 0.001~0.020, 流量为 4.23 升/秒。试验结果见图 2。这一张图在文献中曾被广泛引用, 它表明即使当河床为抗冲性很低的砂土时, 在相当大的河谷比降范围内都有可能形成顺直型河流。在这个问题上, 应该强调的是, 把室内模型小河的试验结果应用到天然河流上时, 必须有“相似律”的概念。我们所说的河岸的可冲刷性是指相对于水流来说的, 它不仅决定于河岸的组成物质及植物生长情况, 而且还与水流的大小强弱有关。对比天然河流和舒姆所进行

的模型小河的情况，这两者的比降和粒径都是属于同一个数量级的，而天然河流的流量却要比模型小河的流量超出不止一个数量级，这样，天然河流河岸的相对可冲刷性要比模型小河大得多。也就是说，在天然河流里，如果河床及河岸都由砂土组成，则一般都是分汊的。只有当河岸中含有相当数量的粘土时，才会保持稳定的顺直的外形。

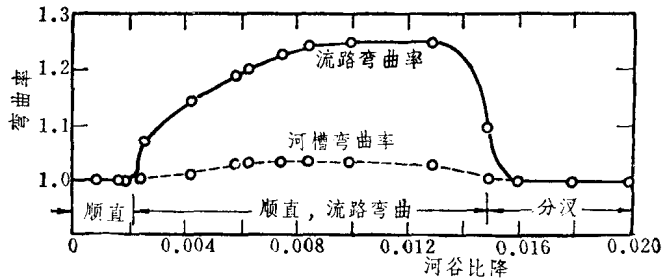


图 2 弯曲率与河谷比降的关系图（舒姆的试验）

（三）各类河流的河床演变规律

1. 弯曲性河流

弯曲性河流具水流结构的主要特点是存在着弯道环流，在天然河流中，这种环流结构还相当复杂，见图 3。这种弯道环流的存在对弯曲性河道的河床演变有十分深远的影响^[69]。它使表面流速较高的水流引向凹岸，在这里冲刷形成深槽，使河底含沙量较高的水流引向凸岸，在这里堆积形成边滩。在凹岸崩塌和凸岸淤涨的同时，整个河道在平面上将作一定的位移。凹岸的后退往往不是连续进行的。坍塌了一段时间以后，将会稳定一段时间，然后在下一次发生较大洪水时，又引起强烈的坍塌。滩岸这种间歇性的后退，将会在凸岸形成一组滨河床沙坝，成为一条完整的弧线，称为河漫滩鬃岗地形。鬃岗形成以后，在两组沙岗之间的低洼地带，会很快生长树木。从这些树木的生长年龄，可以判断鬃岗的形成年代^[36]。这样，根据鬃岗地形的航测照片和该地区的植物群落和生态调查，我们不但可以对河湾的移动方向及移动过程中的变形情况有所了解，而且还可以进一步分析它在不同时期的发展速度。

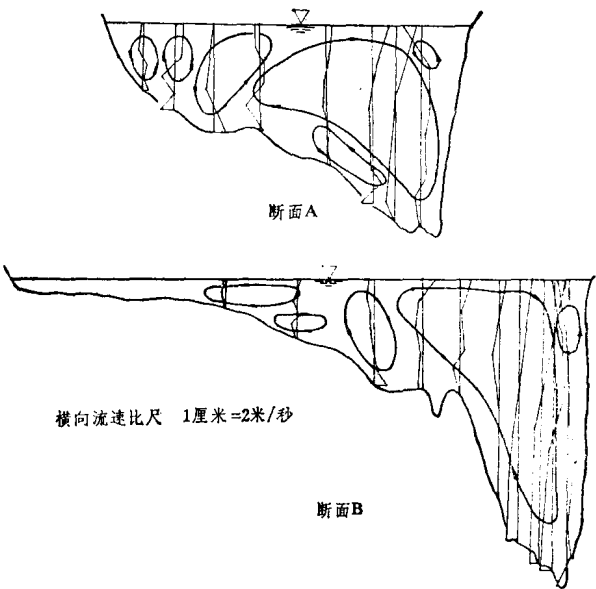


图 3 荆江来家铺河段断面横向流速及环流分布图

图 4 (a) 是加拿大皮顿河 (Beaton River) 某一个河湾的鬃岗地形 [37, 38], 这里的鬃岗平均波长 11.6 米, 高 52 厘米, 已有三、四百年的历史。沿着虚线 AB 河流的蠕动发展最快, 称为河湾的蠕动轴线。在图 4 (b) 中, 绘出了河湾发展过程中沿着蠕动轴线河湾弯曲半径的变化。当河道一开始由直变弯时, 曲率半径较大, 但在河湾向前发展不久, 弯曲半径和河宽的比值就在 3 的上下波动, 这一点决不是偶然的。在图 5 中, 我们绘出了国内外一些弯曲性河流的曲率半径 R 与直段河宽 B 的关系, 点群在对数纸上很好地分布在一条直线附近, 直线的方程式为:

$$R/B = 3 \quad (4)$$

拜格诺 (R.A.Bagnold) 曾就弯道的阻力损失问题进行了分析, 发现当 R/B 在 2~3 的范围内时, 阻力损失最小 [70]。说明河湾塑造的结果也是为了使河流所消耗的能量为最小。

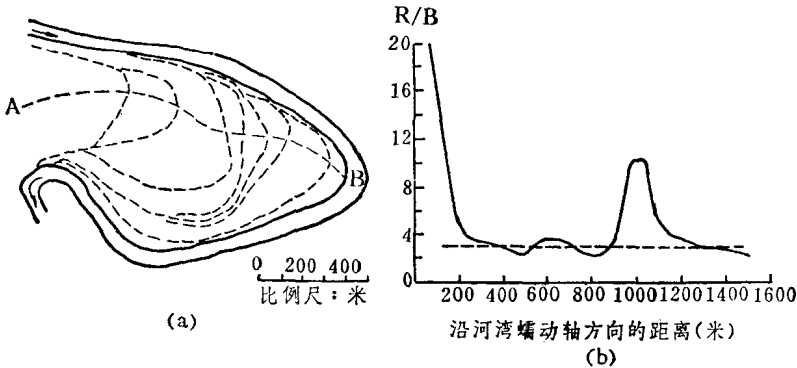


图 4 加拿大皮顿河河湾鬃岗地形及河湾发展过程中沿 AB 轴方向的弯曲半径的变化图
(a) 一部分鬃岗的平面分布; (b) 河湾发展过程中沿蠕动轴方向的弯曲半径的变化

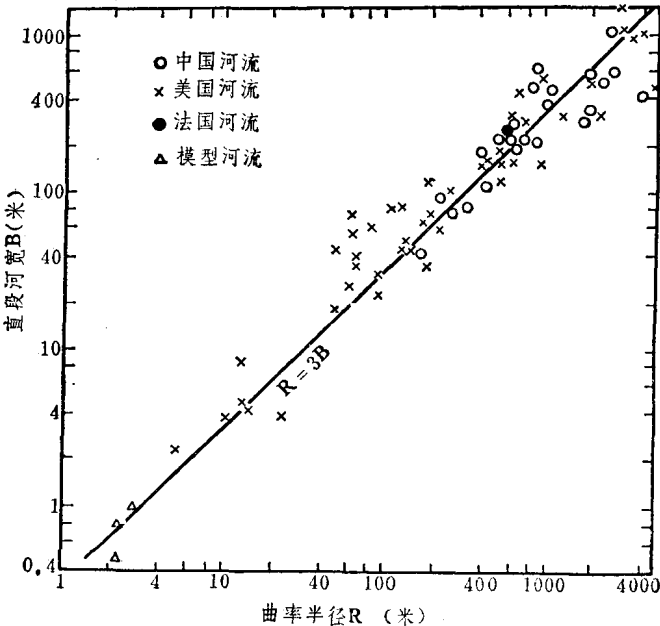


图 5 河湾曲率半径与直段河宽的关系图

2. 分汊-游荡性河流

游荡性河道除了江心多沙洲, 水流散乱以外, 主要表现为主流位置迁徙不定。图 6 为黄河下游及孟加拉国布拉马普特拉河 (Brahmaputra River) 主槽在年内的摆动过程, 随着流量的升降, 河道的流路相应发生变化, 引起边滩和沙洲岸线的前进和后退, 后者反过来又会影响水流的流路。有时主流所据的支汊逐渐淤塞, 水流流入另一股地势较低、流向较顺的支汊, 这时就会造成主槽的突然摆动。过去认为游荡性河道的断面都比较宽浅, 事实上也不尽如此。布拉马普特拉河是类似长江那样的大河, 流域面积 935000 平方公里, 河长 2900 公里, 年径流量 6609 亿立方米, 年沙量 6.17 亿吨, 河宽 5~13 公里, 最大水深 20~45 米, 宽深比要比黄河大很多, 但就形态及动态特征来说, 依然是一条游荡性河流^[71]。

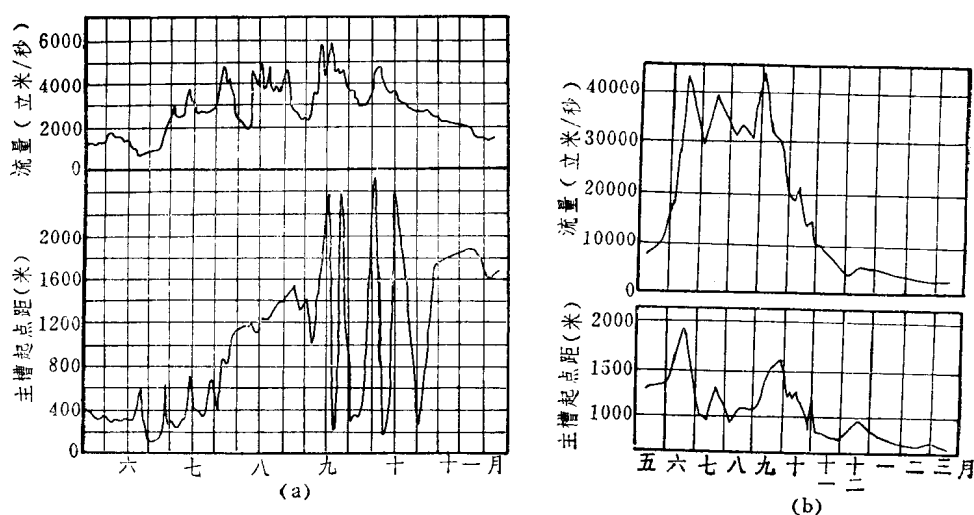


图 6 游荡性河道主槽的摆动图

(a) 秦厂水文站1955年6~11月主槽摆动; (b) 布拉马普特拉河主槽摆动

河槽平面位置发生变化以后, 由于险工挑溜角度的改变或滩岸的坐湾刷尖, 河势的变化会向下游传播。黄河下游的群众有“一弯变, 弯弯变”或“一枝动, 百枝摇”的经验。这样的摆动以两岸的险工或胶泥嘴作为支点, 支点位于左岸时, 河道的摆动方向是顺时针的; 如果位于右岸, 则河道就朝反时针方向偏转。黄河下游的游荡性河段, 沿程宽窄相间, 就象粗茎和细茎相间的藕节一样。宽浅段和窄深段的河道外形有很大的不同, 宽浅段河势散乱, 沙洲林立, 主槽的摆动较大, 窄深段则流线幅合, 沙洲不多, 主槽的摆动也较小, 有如镶嵌在河段中间的节点, 对河势变化有一定的控制作用。如果节点段的间距愈近, 河宽愈小, 而且具有平顺弯道的外形, 则下游放宽段的主槽摆幅也小。综合这些情况, 人们认识到, 游荡性河道犹如一条具有弹性的长钢条, 一处发生振动, 波动就会向下游传播。如果在钢条中间选择几点嵌固起来, 限制其振幅, 则钢条其他部分的振动也会变小。这些节点嵌制愈紧, 间距愈近, 则钢条的最大振幅亦必愈小^[17]。

多沙游荡性河流在挟沙能力上的主要特点, 是床沙质挟沙能力不仅决定于水流条件, 而且还和上游来沙量有关。在点绘床沙质含沙量和流量的关系时, 成为以上游床沙质含沙量

为参数的一簇曲线，见图7。这是因为在多沙河流上，由于来沙条件改变所引起的冲淤，往往达到较大的幅度，使河床边界条件产生较大的变化。例如，大量的淤积使河床物质组成发生细化，使水流阻力减小和增加了对悬移质中细颗粒的补给量。在高含沙水流通过时，断面趋于窄深，这些都会使同流量下的挟沙能力有所提高。

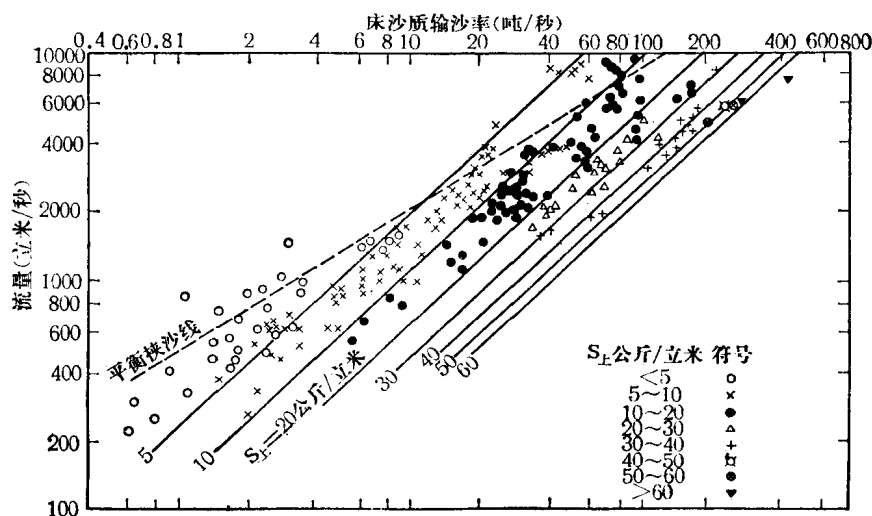


图 7 黄河下游孙口站床沙质的挟沙能力图

3. 分汊-相对稳定性河流

长江中、下游型的分汊性河道比较稳定，汉道的发展消长具有明显的周期性，这是这类河道河床演变的主要特点。

在江心洲型河道的进、出口河段，一般都有濒临江边的控制点，它们对水流的制约作用远较游荡性河道上的节点为强^[72]。随着流量的变化，由于大水趋直，小水坐弯的特性，不同的山体矶头在不同的时候起着挑流作用，使得通过节点、进入汉道段的动力轴线，有时在两汉之间往复摆动，每股汉道都有发生冲刷的机会。汉道进口的分水分沙条件，又使汉道在发展到一定阶段以后，会朝相反的方向转化^[73]。对于长江这样的大江大河，一旦形成分汊河道以后，两股汉道虽不断发展消长，但在短期内很难使其中的一股汉道完全淤死，转化为无汉的单一河道。在解放以来的三十年里，在城陵矶至江阴区间的36处分汊河段中，还没有见到一个支汉淤死的。

长江中、下游型的分汊河道是在特定的边界条件下形成的一种特殊河型，这样的边界条件有其一定的地质构造背景^[72]。由于断裂和差异运动，长江中、下游沿江隆起和凹陷交替出现。在隆起地区，地面多岩石山丘，河身一般较窄；而在凹陷地区，则堆积有较厚的第四纪松散沉积物，容易形成分汊河道。如洪湖凹陷内，发育了新堤分汊河段；沔阳凹陷内，发育了陆溪口和嘉鱼分汊河段；张渡湖凹陷内，发育了天兴洲和团风分汊河段等等。而城陵矶至螺山、赤壁附近、双窑至武汉及黄石至富池四个束窄段，则都分别位于华容隆起、王家门隆起、汉川隆起和大冶褶皱束等隆起构造上。

4. 顺直型河道

顺直型河道通常有两种类型。一种是两岸广泛分布有抗冲性较强的物质，如出露的基岩和粘土层，限制了河流的横向发展；另一种是弯曲性河道在正常发展过程中暂时形成的一段直河道，它的距离一般不会太长。

顺直型河道尽管在外形上河身保持顺直，但主流流路依然是弯曲的，两岸出现犬牙交错的边滩。这样的边滩的位置并不是固定不变的，而是不断向下游移动，使水流顶冲两岸的位置不断改变。从这个角度考虑，当前在治河造地中、把河身一味取直是不尽合理的。因为这将使全线处处都有遭受水流顶冲的可能，大大增加了工程设防的负担。

弯曲性河道和顺直型河道在平面外形上虽然有很大的不同，但就溪线的弯曲程度来说，却又有其十分相似的地方。图 8 是弯曲性河道和顺直型河道在同一岸两个弯顶之间的距离 L_m 和直段河宽 B 的关系，它们都遵循同一规律^[74]：

$$L_m = 12B \quad (5)$$

这表明，就流路弯曲的形成机理来说，变曲性河道与顺直型河道有一定的共同性。

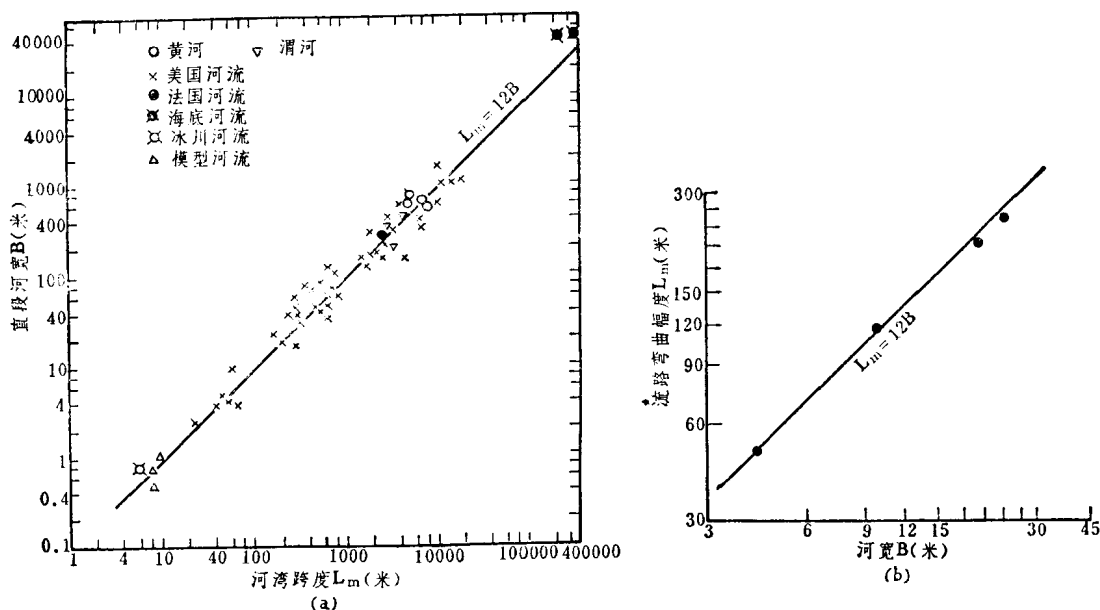


图 8 弯曲性河道及顺直型河道流路弯曲幅度与直段河宽的关系图
(a) 弯曲性河道；(b) 顺直型河道

直河段上出现规则的犬牙交错的边滩，主流则左右绕过边滩作曲折的流动，说明和两岸交替分布的边滩相对应的，存在着交替改变旋转方向的环流，上一个边滩上的环流结构会促使下一个边滩上形成旋转方向相反的环流。爱因斯坦 (H.A. Einstein) 和沈学汶曾对此作了定性的说明^[75]。

(四) 河口段的河床演变

在河口地区，河流和海洋动力同时起着作用，形成特殊的景观，产生不同的河床演变

过程。近年来,由于河口地区勘探石油的需要,在河口三角洲的演变方面进行了大量工作,有不少专著出版^[76~85]。

1.河口地区的盐、淡水掺混现象

河口段的水流除了因河水及潮流的作用而上下往复运动以外,还由于盐淡水的掺混,而使整个流场内存在着一种循环运动。盐淡水的掺混有高度成层型、轻度混合型及高度混合型等三种类型,西蒙斯(H.B.Simmons)曾建议以下列参数作为判别盐淡水掺混类型的指标^[86]:

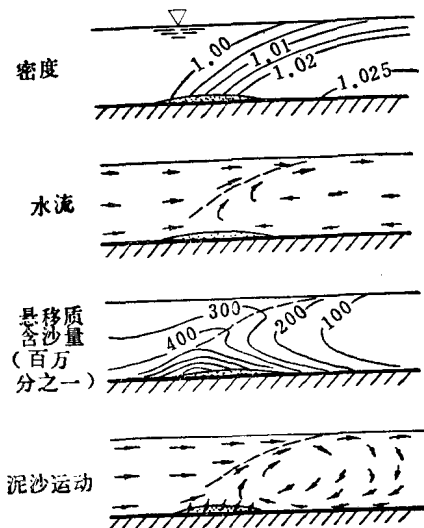


图9 轻度混合型河口盐水界附近的水流及泥沙运动图

$$K = \frac{\text{一个潮周期中的山(河)水径流量}}{\text{涨潮期的进潮量}} \quad (6)$$

$K \geq 0.7$ 高度成层型

$K = 0.2 \sim 0.5$ 轻度混合型

$K \leq 0.1$ 高度混合型

图9为轻度混合型河口盐水界附近的水流及泥沙运动示意图,可以看出由于盐淡水的掺混而带来的循环运动。

2.河口地区的泥沙运动

河口地区的泥沙运动,和正常河流比较起来,在四个方面表现出固有的特色:

(1) 细颗粒泥沙受到盐水或海生物的作用,容易絮凝或聚集成团,加大了沉速。其中海洋生物所造成的细颗粒泥沙的团聚作用要较一般所认为的重要得多^[87]。

(2) 水流为周期性的往复流动,水体内部存在大范围的封闭式循环,使较粗的颗粒一般不易带出河口范围。图10为美国萨伐拿河口段的底流方向与清淤量的沿程分布^[88]。由于盐水异重流的作用,在A点以下,底流方向以向上游运动为主;A点以上,底流方向以向下游运动为主。这两股流动在A点相遇。显然,这里必然是沿着底部运动的粗颗粒泥沙集中淤积的地段,这一点在清淤量的沿程分布上得到充分反映。

(3) 由于涨落潮之间水流要经过一个憩潮阶段,流速在短时间内降低为零。泥沙颗粒的运动不断经过落淤和起动的阶段,在水流和泥沙运动之间经常存在着时差,其中细颗粒泥沙的时差问题较粗颗粒泥沙突出得多,这就促使细颗粒泥沙向海湾湾底集中^[89]。

(4) 河口地区,特别是疏浚后对抛泥处置不当的河口,在河底有一层深浅不一、浓度不等的浮泥,不断随着水流的涨落而来回搬运。英国泰晤士河口为了维持伦敦港的航运交通,每年都需要进行大规模的疏浚。疏浚出来的泥沙,抛在远离疏浚区的下游50公里处的河道里。实践表明,这一部分抛泥,以后又以浮泥的形式,随着底流带向上游,最后依然沉积在航道里^[90]。这说明抛泥区的合理选择,是决定河口疏浚成效的关键之一。

3.三角洲河口的河床演变

注入潮差较小的海洋的大河河口,一般都会形成三角洲。三角洲按其外形,可以分为