

入湖河流尾间河段河型问题研究进展

陈 珺^{1,2}, 李 斌², 邓丽华², 于明田², 晏成明³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

3. 广东水利电力职业技术学院水利工程系, 广东 广州 510635)

摘要: 回顾和总结了国内外入湖河流尾间河段河型问题的研究进展, 阐述了入湖河流尾间河段范围的界定方法, 分析了入湖河流尾间河段的平面形态与演变特征, 对比了入湖河流尾间河段河型与冲积河流河型的异同, 进一步探讨了不同类型尾间河段的河型成因以及河型转化影响因素。针对目前入湖河流尾间河段河型问题研究中存在的不足, 指出今后可从入湖河流尾间河段的河型特征、河型成因机理和河型转化影响因素的定量化等方面加强研究。

关键词: 入湖河流; 尾间河段; 河型特征; 河型成因; 河型转化; 综述

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)02-0079-07

Advances in river pattern problems of tail reach for inflow rivers//CHEN Jun^{1,2}, LI Bin², DENG Lihua², YU Mingtian², YAN Chengming³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The research progresses on river patterns of the tail reach for inflow rivers at home and abroad are reviewed and summarized. Various methods for determining the scope of the tail reach for inflow rivers are stated and the plane shape characteristics and evolution characteristics of the tail reach are analyzed. The similarities and differences of river patterns between inflow and fluvial rivers are then compared and the formation of river patterns and the key factors that control the transformation of river patterns of the tail reach are further discussed. Aiming at the shortcomings of the current research, it is pointed out that future research can be strengthened in the aspects of river pattern characteristics, mechanisms of river pattern formation and quantification of the influencing factors of river pattern transformation.

Key words: inflow river; tail reach; characteristics of river patterns; formation of river patterns; transformation of river patterns; review

入湖河流尾间河段位于河流近河口地区, 下接湖泊。尾间河段的演变不仅关系到河道入湖水流排泄是否通畅, 而且还影响河口处湖泊地形和湿地面积, 因而河湖地区的防洪安全和生态环境保护与其息息相关^[1-2]。河型问题是研究尾间河段演变的基础问题, 对其进行研究具有重要的理论和应用价值。多年来, 国内外学者对入湖河流尾间以上河段的河型关注较多^[3-5], 对尾间河段的河型研究不多。笔者从入湖河流尾间河段范围、河型特征、河型成因及转化等方面对已有研究成果进行分析和总结, 并对需进一步深入研究的内容作出展望。

1 尾间河段范围的界定

关于入湖河流尾间河段的范围, 目前还未有一

个明确、统一的定义。多数学者通常从地理区域划分的角度界定其范围; 彭文启等^[6]指出一般入湖河流下游近河口段为尾间河段; 聂芳容等^[7-9]给出了湘江、资江、沅江尾间河段的范围, 即从株洲、益阳、德山以下至入湖口河段。此外, 也有学者把近河口处主要水文测站以下河段界定为尾间河段; 雷声等^[10]在研究鄱阳湖流域五河尾间时指出, 赣江外洲水文站、抚河李家渡水文站、信江梅港水文站等以下河段为尾间河段。近年来, 王旭等^[11]指出尾间河段的范围是一个动态的概念, 由入湖河流与湖泊之间的水动力学变化关系所决定, 可利用水动力学数学模型分别计算出入湖河流在有湖泊高水位顶托和无湖泊顶托作用下的流速沿程分布, 通过对比确定流速突变点, 从

而动态界定出入湖河流尾间河段距离,并通过该方法界定出了湘江入洞庭湖尾间河段的范围,即湘潭水文站位置至入湖口河段。该方法在前人的研究基础上有所发展,考虑了尾间河段的水动力变化,将入湖河流下游受到湖泊水位顶托的河段视为尾间河段。

2 尾间河段河型特征

2.1 平面形态特征

入湖河流尾间河段位于湖泊三角洲平原上,沉积和地貌学界称之为三角洲分流河道,认为是三角洲平原亚相的重要组成部分^[12-14]。由于尾间河段的演变受到湖泊三角洲的影响,其形态与三角洲的类型具有较大的相关性。目前湖泊三角洲的分类方法很多^[15-17],按照三角洲的平面形态可分为鸟足状(伸长型)、扇形(舌形或朵形)、鸟嘴状(尖头形)和

平直滨岸型 4 类三角洲^[18]。根据以上类型,笔者选取了国内外多个典型湖泊的入湖河流,总结了河流尾间河段平面形态特征和与之对应的湖泊三角洲类型,见图 1~4 和表 1。

由图 1~4 和表 1 可见,不同类型的湖泊三角洲存在对应的尾间河段平面形态特征,例如,哈萨克斯坦境内的乌拉尔河(入里海)在河口发育有鸟足状三角洲^[19],位于其上的河流尾间河道分流不多,呈长条形大沙嘴伸入湖中,且延伸较远,外形呈鸟足状河网;俄罗斯境内的伏尔加河(入里海)在河口发育有扇形三角洲^[20],其尾间河段河道分流较多,呈朵状或半圆状向湖方向展开,各方向的河道长度接近,形态呈扇形河网;瑞士境内的罗纳河(入日内瓦湖)在河口发育有鸟嘴状三角洲,其上的尾间河段表现为单一河流入湖,沙坝堆积于河口两侧,使河口向湖突出,平面形状



图 1 鸟足状三角洲及尾间河段

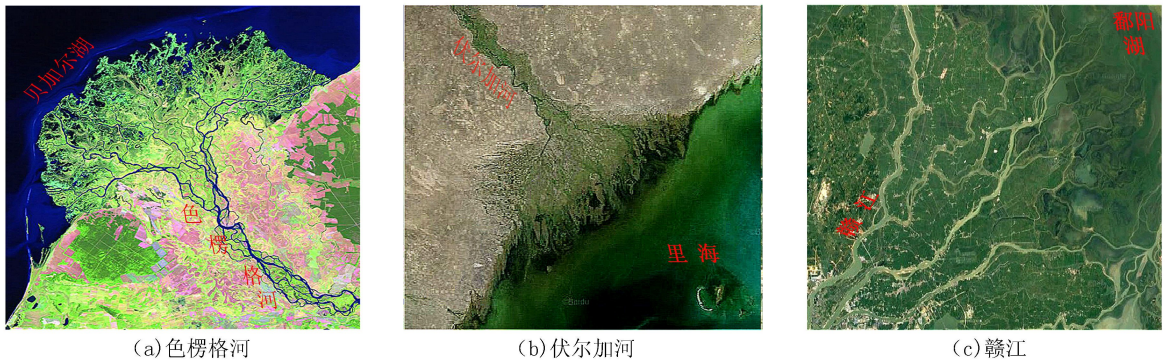


图 2 扇形三角洲及尾间河段

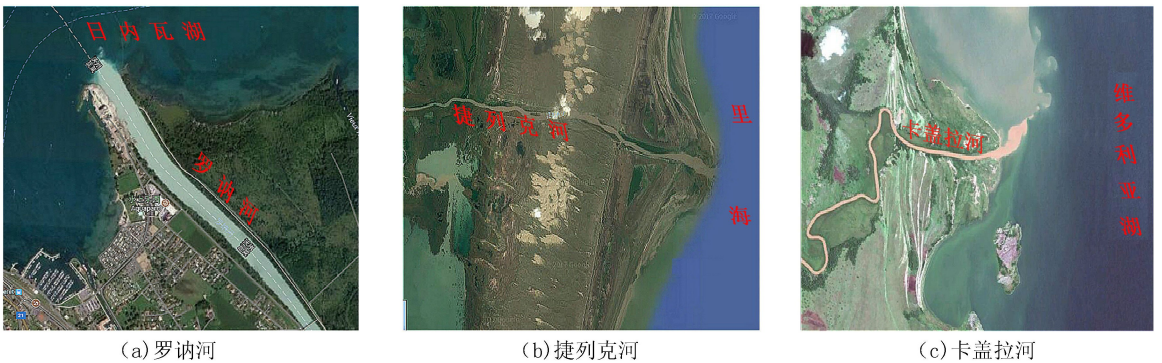


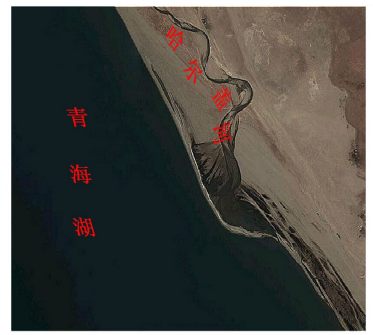
图 3 鸟嘴状三角洲及尾间河段



(a) 沃尔霍夫河



(b) 乌拉尔河



(c) 哈尔盖河

图4 平直滨岸型三角洲及尾间河段

表1 尾间河段平面形态特征与湖泊三角洲类型的对应关系

湖泊三角洲类型	尾间河段平面形态特征	入湖河流举例
鸟足状	鸟足状河网(汉道分流不多,呈长条形大沙嘴伸入湖中,且延伸较远,外形呈鸟足状)	乌拉尔河(入里海)、奴河(入大奴湖)、萨斯喀彻温河(入锡达湖)、弥直河(入洱海)、布哈河(入青海湖)、盘龙江(入滇池)、宝象河(入滇池)、信江(入鄱阳湖)
扇形	扇形河网(汉道分流较多,呈朵状或半圆状向湖方向展开,各方向的汉道长度接近)	色楞格河(入贝加尔湖)、伏尔加河(入里海)、赣江(入鄱阳湖)、沙柳河(入青海湖)、柴河(入滇池)
鸟嘴状	单一河道(单条河流入湖,沙坝堆积于河口两侧,使河口向湖突出,平面形状似鸟嘴)	罗纳河(入日内瓦湖)、捷列克河(入里海)、卡盖拉河(入维多利亚湖)、梁王河(入滇池)、捞鱼河(入滇池)、波罗江(入洱海)
平直滨岸型	单一河道(单条河流入湖,沙坝平行于河口岸线堆积,岸线较为平直)	沃尔霍夫河(入拉多加湖)、卡唐加河(入维多利亚湖)、哈尔盖河(入青海湖)、乌拉尔河(入呼伦湖)、克鲁伦河(入呼伦湖)、马料河(入滇池)、落龙河(入滇池)、湘江(入洞庭湖)、资水(入洞庭湖)、淮河(入洪泽湖)

似鸟嘴;俄罗斯境内的沃尔霍夫河(入拉多加湖)在河口发育有平直滨岸型三角洲,尾间河段呈单一河流入湖,沙坝平行于河口岸线堆积,岸线较为平直。

综上所述,当入湖河流在河口形成鸟足状或扇形三角洲时,其尾间河段常形成鸟足状或扇形河网,若在河口形成鸟嘴状或平直滨岸型三角洲,则其尾间河段常形成单一的河道形态。此外,注入同一湖泊的不同河流,其尾间河段的平面形态也不一定相同,如注入青海湖的布哈河和哈尔盖河分别为鸟足状河网和平直滨岸型单一河道;注入鄱阳湖的赣江和信江,则分别为扇形河网和鸟足状河网。

2.2 河段演变特征

扇形河网尾间河段在向下流持续不断的分流演变过程中,上下两级汉道存在一定的相关关系。Yalin^[21]在假设流量平均分配到下游分支河道的基础上,估算得到连续上下两级河道宽度和深度的函数关系分别为 $B_{k+1} \approx 0.7B_k$, $h_{k+1} \approx 0.8h_k$, 其中: B 为河道宽度; h 为河道深度; k 和 $k+1$ 分别为河道连续上下两级。段冬平等^[22]经实测与计算发现,处于不同位置的两处尾间河段的连续上下两级河道宽度比也近似为 0.7(分别为 0.72 和 0.73)。Olariu^[23]通过收集和国外扇形河网尾间河段,得到出现频率最高的河道宽度为 200~400 m,深度为 1~3 m;河道宽度的出现频率与河道宽度值之间呈非对称关系,大部分样本的数据集中在河道宽度中间值偏左

的区域。Syvitski 等^[24]指出扇形河网尾间河段的河道宽度出现频率与河道宽度值多数呈对数正态分布。此外,在沉积物特征方面,扇形河网尾间河段发育的沉积单元种类以及数目较多,例如,赣江尾间河段发育有边滩、心滩、江心洲、天然堤、河道间湿地、废弃河道、决口河道及决口扇等诸多沉积单元^[25]。

河道型尾间河段通常表现为单一河道形态,其中鸟嘴状尾间河段的平面形态较为顺直,河道内发育的心滩和沙洲较少;而平直滨岸型尾间河段曲度相对更大,部分河段存在心滩、边滩及沙洲等沉积单元,但种类和数目较河网型尾间河段少^[26]。

2.3 尾间河段河型与冲积河流河型的异同

入湖河流尾间河段有河网型(鸟足状或扇形)和河道型(鸟嘴状或平直滨岸型)两种大类型,这是尾间河段平面形态的总体格局,钱宁等^[27]将尾间河段以外的冲积河流分为顺直、弯曲、分叉和游荡型 4 种河型,以下分别就尾间河段河型和冲积河流 4 种河型的异同进行探讨。

尾间河段河型具有的平面形态特征、水力特征及沉积特征在一定程度上与冲积河流河型有相似之处。例如,鸟嘴状尾间河型在平面形态上与冲积河流的顺直河型较为相似;而平直滨岸型尾间河型在平面形态(河道弯曲度)上与冲积河流的弯曲河型较为相似,同时有些河道的局部河段也存在心滩、边滩及沙洲等沉积特征,类似于冲积河流中的分叉河

型,例如乌尔逊河、哈尔盖河的尾间河段等。

对于扇形河网尾间河段,国内外部分学者将其归为入湖三角洲平原网状河型^[28-30]。以我国赣江尾间河段为例,谢庆宾等^[29-31]认为赣江尾间河段具备网状河流所必需的基本要素,是典型的入湖三角洲平原网状河型。在水动力特性方面,赣江尾间河段较低的坡降(0.0116%)、小于40的宽深比、小于1.5的河道弯曲度符合网状河流的基本特性^[30-31];在河岸组成方面,以高黏结性的粉砂质和泥质细颗粒物为主也是网状河流的显著特征^[29];在沉积物特征方面,赣江尾间河段发育了典型的网状河流地貌单元,且河道内多以沙砾石和中细沙为主,其他地貌单元如河漫滩、沼泽则以细粒沉积物为主,这些沉积物特征正是网状河流的主要特点。王随继等^[32]进一步对比了网状河流和分汊河流,指出网状河流呈现多个河道相互连接或彼此分离而构成的不规则河道网,其间是面积相对广阔的河间地,且河间地的宽度远大于河道宽度,河岸主要由一元细颗粒结构组成;而分汊河流的江心洲的宽度与河道宽度一般比较相近,河岸主要由泥质和砂质的二元结构组成;另外,网状河流比分汊河流具有更小的宽深比和河道比降等,综合分析表明两种河型有着明显的区别。

而对于鸟足状河网尾间河段,其整体形态与冲积河流的4类河型无明显相似性,若从单支水道来看,因其河型属于河流作用极强的河控型,故其单支水道的特征介于顺直型与弯曲型河型之间。

3 尾间河段河型成因与转化影响因素

3.1 河型成因

入湖河流尾间河段作为湖泊三角洲的重要组成部分,其河型成因与三角洲密切相关^[23,33]。湖泊三角洲的形成和演变主要受河流和湖泊作用的影响,Fisher等^[34-35]依据河流和湖泊作用强弱将三角洲分为河控(建设型)三角洲及湖控(破坏型)三角洲,如图5所示,河控(建设型)三角洲包括鸟足状、扇形三角洲;湖控三角洲(破坏型)包括鸟嘴状、平直滨岸型三角洲。河流作用越强时,三角洲越向湖泊延伸发

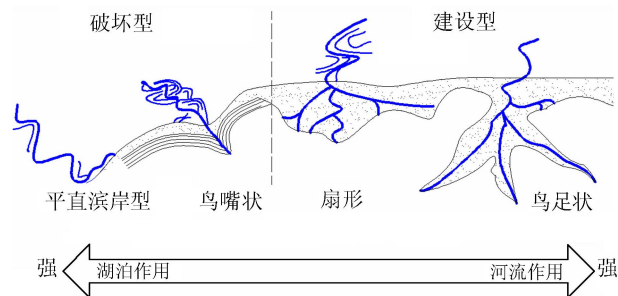


图5 三角洲类型与河流和湖泊的作用关系

展,三角洲规模越大;湖泊作用越强时,三角洲越容易被湖泊动力搬运和改造,仅在入湖口附近形成较小规模的三角洲。由于三角洲受到河流和湖泊的双重作用,所以发育其上的尾间河段(分流河道)形态各异,演变成复杂河网和单一河道等不同的平面形态。

河流作用的强弱主要取决于流量和输沙量。Olariu^[23]认为尾间河段河型的形成受到季节性河流流量的变化、推移质与悬移质之比的影响。Roberts等^[36]通过现场试验得出河网型尾间河段的出现是由于高强度洪水时期水流携带大量泥沙所导致。Geleynse等^[37]用数值模拟得到当含沙量较高且变幅不大时,河网趋向于径向均匀地延伸,呈扇形分布;而高含沙量下形成的鸟足状河网,则是由于初始时岸堤的不稳定性使得旁侧河道出现,随后上游流量及含沙量减小使得水沙主要集中在主支河道,而旁侧河道淤废,便形成典型鸟足状河网^[38]。

湖泊作用主要受风、波浪和沿岸流的影响。朱海虹等^[18]在研究滇池、洱海及其入湖河流时指出,当盛行风向与河流流向一致时,波浪、沿岸流微弱,尾间河段易形成鸟足状、扇形河网,例如滇池的柴河、大河及洱海的弥苴河;而当盛行风向与入湖河流呈高角度相交时,风形成的波浪作用及沿岸流则较强,河流难以展布,三角洲呈鸟嘴状或平直滨岸型,尾间河段为单一河道,例如滇池的梁王河、捞鱼河。宋春晖等^[39]在研究入青海湖河流时也指出,风向与河流流向一致的布哈河,受到的波浪作用及沿岸流作用较弱,故尾间河段形成鸟足状河网;而流向几乎与风向相反的哈尔盖河,滨岸带形成较大的波浪,波浪以一定角度与湖岸相交,进而形成沿岸流,受波浪和沿岸流的强烈作用,三角洲呈平直滨岸型,河流不能直接向湖区伸展,尾间河段对应为单一河道。

3.2 河型转化影响因素

河型转化是河床演变量变的积累达到一定的临界条件下的质变过程。为了塑造某一特定的河型,必须分析该种河型的控制变量与河型要素之间的因果关系^[40]。当控制因素发生改变时,河型也会有与之对应的反馈,从而使其趋向平衡。

流量是影响河型转化的重要因素,Syvitski等^[41]指出长时间的流量变化决定着尾间河段汉道的数量,具体表现为已有河道的淤废及新河道的产生。流量增大时,对于原本受波浪影响的单一河道,近河口处的泥沙迁移使得尾间河段向河流作用为主导的河网转化^[24];而当流量减小时,尾间分支水道易不稳定,河道淤废与流量减小成正相关,进而汉道数量减少^[42]。不同类型的尾间河段对于流量改变的响应也有所不同,单一路径为主要的河段受流量

改变影响较大,而存在多分汊的河段影响较小,最靠下游的出口段河段受到影响最大^[43]。

湖盆水深的变化也是影响河型转化的重要因素。朱筱敏等^[44]指出湖平面变化控制着尾间河段的形态与分布,湖盆水位降低时,水面比降变大,河流作用增强,顺流沉积加速,其上河道形态从朵形河网过渡为扇形,最后形成鸟足状河网^[45]。当湖平面上升时,水面比降减小,湖泊可容纳空间增大,湖泊作用增强,河道汉道数量减少^[46],此现象在伏尔加河 200 年前的尾间河段演变中可以证实:在里海湖平面下降期间,其尾间河段的汉道数量显著增加;而近年来里海湖平面以每年 15 cm 的速度上升,导致尾间河段的汉道数量由 1 000 条下降到 800 条左右^[23]。湖平面的变化速率对河道演变也有影响,湖平面上升速率越快,河道转化演变越不明显;湖平面下降速率越快,河道演变越明显^[47]。

近年来人类对河湖开发活动的影响也受到了较多的关注。相比于其他影响因素,如短、中时间跨度内变化幅度很小的湖盆水深,人类活动如兴建堤坝、滥伐森林等所造成的影响可以在短时间内急剧地改变输沙量及流量,进而导致尾间河段河型的转化^[48]。

4 研究展望

鉴于目前对入湖河流尾间河段河型问题的研究成果略少,理论不够系统,建议进一步加大尾间河段原型资料的观测工作,为河型研究提供可靠资料,同时可从以下几个方面加强理论研究:

a. 尾间河段河型特征。应进一步研究河网型尾间河段的汉道结构的几何分形特征,探讨河网形态遵循的规律;通过原型实测资料或模型试验揭示尾间河段的水沙输移及演变特征等。

b. 河型成因机理。河网型尾间河段的形成与三角洲及河口沙坝的演化密切相关,河口沙坝引起河道不断分汊,形成河网。亦有学者指出,尾间河段的“冲裂作用”是河网汉道形成的直接原因^[32,49],但目前尚缺乏理论解释和试验验证,有必要对有关问题进行深入探讨。

c. 河型影响因素的定量化。当前对于尾间河段河型成因、河型转化的影响因素,多以定性研究为主,缺乏定量分析,有必要将现有河型影响因素及其作用效果定量化,为揭示河型成因与判别河型转化提供依据。

参考文献:

[1] 朱立俊,韩玉芳,余明富,等. 鄱阳湖赣江尾间淤积特

性及对防洪的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(增刊2): 79-83. (ZHU Lijun, HAN Yufang, SHE Mingfu, et al. Deposition features of Ganjiang River delta at Poyang Lake and their impact on flood control [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000, 28(Sup2): 79-83. (in Chinese))

[2] DING X W, LI X F. Monitoring of the water area variations of Lake Dongting in China with ENVISAT ASAR images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(6): 894-901.

[3] 张俊勇,陈立,王家生. 河型研究综述[J]. 泥沙研究, 2005(4): 76-81. (ZHANG Junyong, CHEN Li, WANG Jiasheng. Review on the research of river pattern [J]. Journal of Sediment Research, 2005(4): 76-81. (in Chinese))

[4] 何萍,史培军,刘树坤,等. 河流分类体系研究综述[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 434-442. (HE Ping, SHI Peijun, LIU Shukun, et al. Classification of rivers systems [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 434-442. (in Chinese))

[5] 李志威,刘晶,胡世雄,等. 中国冲积大河的河型分布与成因[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 7-13. (LI Zhiwei, LIU Jing, HU Shixiong, et al. Distribution and formation of river patterns of large alluvial rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 7-13. (in Chinese))

[6] 彭文启,薛海,孙东坡,等. 尾间河段的数值模拟研究[J]. 水利学报, 2002, 33(1): 16-22. (PENG Wenqi, XUE Hai, SUN Dongpo, et al. Study on numerical simulation of river sink [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(1): 16-22. (in Chinese))

[7] 聂芳容. 湘、资、沅、澧四水尾间地区防洪减灾措施的探讨[J]. 人民长江, 1996, 27(6): 31-33. (NIE Fangrong. Discussion on flood control and hazard mitigation measures of the Xiang, Zi, Yuan and Li River [J]. Yangtze River, 1996, 27(6): 31-33. (in Chinese))

[8] 彭建军,谢冬明. 洞庭湖区资水尾间洪灾分析及治理[J]. 湖南水利水电, 2002(4): 30-31. (PENG Jianjun, XIE Dongming. Flood analysis and treatment measures of Zi River in Dongting Lake Area [J]. Hunan Water Resources and Hydropower, 2002(4): 30-31. (in Chinese))

[9] 胡旭跃,黄伦超,沈小雄,等. 入湖河流尾间段的河性及航道整治[J]. 长沙交通学院学报, 2002, 18(1): 49-55. (HU Xuyue, HUANG Lunchao, SHEN Xiaoxiong, et al. The characteristics of the tail reach of river and channel regulation [J]. Journal of Changsha Communications University, 2002, 18(1): 49-55. (in Chinese))

- Chinese))
- [10] 雷声, 章重, 张秀平. 鄱阳湖流域五河尾闾河道演变遥感研究[J]. 人民长江, 2014, 45(4): 27-31. (LEI Sheng, ZHANG Zhong, ZHANG Xiuping. Analysis on tail channel evolution of five main rivers of Poyang Lake based on remote sensing technology[J]. Yangtze River, 2014, 45(4): 27-31. (in Chinese))
- [11] 王旭, 王勇, 肖伟华, 等. 入湖河流尾闾河段界定方法研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 44-47. (WANG Xu, WANG Yong, XIAO Weihua, et al. Study on the method of defining the tail river section into the lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(2): 44-47. (in Chinese))
- [12] OVEREEM I, KROONENBERG S B, VELDKAMP A, et al. Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and holocene sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea[J]. Sedimentary Geology, 2003, 159(3): 133-157.
- [13] 邓庆杰, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 浅水三角洲分流河道砂体沉积特征: 以松辽盆地三肇凹陷扶 II - I 组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 118-127. (DENG Qingjie, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary characteristics of distributary channel sand bodies in shallow water delta: a case study of Fu II-I group in Sanzhao depression, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1):118-127. (in Chinese))
- [14] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825. (ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, ZHANG Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813-825. (in Chinese))
- [15] 裘亦楠, 肖敬修, 薛培华. 湖盆三角洲分类的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1982(1): 4-14. (QIU Yanan, XIAO Jingxiu, XUE Peihua. Discussion on category of lake deltas[J]. Petroleum Exploration and Development, 1982(1): 4-14. (in Chinese))
- [16] 何治亮. 湖盆三角洲分类的初步探讨[J]. 石油与天然气地质, 1986, 7(4): 385-420. (HE Zhiliang. Preliminary approach of the classification of lake basin deltas[J]. Oil & Gas Geology, 1986, 7(4):385-420. (in Chinese))
- [17] 梅志超, 林晋炎. 湖泊三角洲地地层模式和骨架砂体的特征[J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 1-11. (MEI Zhichao, LIN Jinyan. Stratigraphic pattern and character of skeletal sand bodies in lacustrine deltas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(4): 1-11. (in Chinese))
- [18] 朱海虹, 姚秉衡. 云南断陷湖泊三角洲沉积及其在石油勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质, 1989, 10(2): 95-106. (ZHU Haihong, YAO Bingheng. Study on the delta deposition in fault lakes, Yunnan Province, and its significance for petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 1989, 10(2):95-106. (in Chinese))
- [19] LAGUGOV V. The Ural River Basin: hydrology, characteristics and water use [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2008:129-161.
- [20] KROONENBERG S B, RUSAKOV G V, SVITTOCH A A. The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian sea-level change [J]. Sedimentary Geology, 1997, 107(3-4):189-209.
- [21] YALIN M S. River mechanics [M]. Oxford: Pergamon Press, 1992: 220.
- [22] 段冬平, 侯加根, 刘钰铭, 等. 河控三角洲前缘沉积体系定量研究: 以鄱阳湖三角洲为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(2):270-277. (DUAN Dongping, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. Quantitative research of fluvial-dominated delta front sedimentary system: a case study of Poyang Lake delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2):270-277. (in Chinese))
- [23] OLARIU C. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(2):212-233.
- [24] SYVITSKI J P M, SAITO Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans [J]. Global & Planetary Change, 2007, 57(3/4):261-282.
- [25] 谢庆宾, 管守锐, 朱筱敏, 等. 江西赣江下游中支现代网状河流沉积[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 13-17. (XIE Qingbin, GUAN Shourui, ZHU Xiaomin, et al. Modern anastomosed fluvial deposits of the middle tributary of the lower Ganjiang river in Jiangxi Province [J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Sciences), 2000, 24(1):13-17. (in Chinese))
- [26] 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 933-944. (ZHANG Changmin, YIN Taiju, ZHU Yongjin, et al. Shallow water deltas and models [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933-944. (in Chinese))
- [27] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [28] 张周良, 刘少宾. 中国的网状河流体系[J]. 应用基础与工程科学学报, 1994, 2(2/3): 204-212. (ZHANG Zhouliang, LIU Shaobin. Anastomosing fluvial systems in China [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1994, 2(2/3): 204-212. (in Chinese))
- [29] 谢庆宾, 朱筱敏, 管守锐, 等. 中国现代网状河流沉积特征和沉积模式[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 219-227. (XIE Qingbin, ZHU Xiaomin, GUAN Shourui,

- et al. Depositional characteristics and models of the modern anastomosing river in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 219-227. (in Chinese))
- [30] 王随继. 赣江入湖三角洲上的网状河流体系研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(2): 202-207. (WANG Suiji. Study of the anastomosing fluvial system on the delta plain of the Ganjiang River [J]. *Scientiagraphica Sinica*, 2002, 22(2): 202-207. (in Chinese))
- [31] 熊平, 程琛, 陈顺顺. 网状河流沉积特征研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2012, 38(10):100-102. (XIONG Ping, CHENG Chen, CHEN Shunshun. Research on depositional characteristics of anastomosing river [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2012, 38(10): 100-102. (in Chinese))
- [32] 王随继, 尹寿鹏. 网状河流和分汊河流的河型归属讨论[J]. *地学前缘*, 2000(增刊2): 79-86. (WANG Suiji, YIN Shoupeng. Discussion on channel patterns of anastomosing and anabranching rivers [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000(Sup2): 79-86. (in Chinese))
- [33] 何幼斌, 王文广. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [34] FISHER W L, BROWN L F, SCOTT A J, et al. Delta systems in the exploration for oil and gas[M]. Austin: University of Texas, 1969.
- [35] GALLOWAY W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system [M]//BROUSSARD M L. *Deltas: modes of exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975:87-98.
- [36] ROBERTS H H, ADAMS R D, CUNNINGHAM R W. Evolution of sand-dominant subaerial phase, Atchafalaya delta, Louisiana[J]. *Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 1980, 64(2): 264-279.
- [37] GELEYNSE N, STORMS J E A, STIVE M J F, et al. Modeling of a mixed-load fluvio-deltaic system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): 5402.
- [38] SEYBOLD H, ANDRADE J S, HERRMANN H J. Modeling river delta formation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(43):16804-16809.
- [39] 宋春晖, 方小敏, 师永民, 等. 青海湖现代三角洲沉积特征及形成控制因素[J]. *兰州大学学报(自科版)*, 2001, 37(3): 112-120. (SONG Chunhui, FANG Xiaomin, SHI Yongmin, et al. Sedimentary characteristics of modern lacustrine deltas in Qinghai Lake and their controlling factors [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2001, 37(3):112-120. (in Chinese))
- [40] 金德生, 刘书楼, 郭庆伍. 应用河流地貌实验与模拟研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [41] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, CORREGGIAR A, et al. Distributary channels and their impact on sediment dispersal[J]. *Marine Geology*, 2005, 222/223: 75-94.
- [42] EDMONDS D, SLINGERLAND R, BEST J, et al. Response of river-dominated delta channel networks to permanent changes in river discharge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(12):107-111.
- [43] TEJEDOR A, LONGJAS A, ZALIAPIN I, et al. Delta channel networks: a graph-theoretic approach for studying connectivity and steady state transport on deltaic surfaces [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 3998-4018.
- [44] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型拗陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 89-99. (ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake, example from Cretaceous Quantou formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89-99. (in Chinese))
- [45] 赖志云, 周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验[J]. *沉积学报*, 1994, 12(2): 37-44. (LAI Zhiyun, ZHOU Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 37-44. (in Chinese))
- [46] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 砂质扇三角洲沉积过程实验研究[J]. *江汉石油学院学报*, 2003, 25(2): 1-4. (ZHANG Chunsheng, LIU Zhongbao, SHI Dong, et al. Experimental study of sandy-fan-delta sedimentary process [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2003, 25(2): 1-4. (in Chinese))
- [47] 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(5): 1005-1013. (HUANG Xiu, LIU Keyu, ZOU Caineng, et al. Forward stratigraphic modelling of the depositional process and evolution of shallow water deltas in the Poyang Lake, southern China [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2013, 38(5): 1005-1013. (in Chinese))
- [48] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 2(10): 681-686.
- [49] SMITH N D, CROST A, DUFFICY J P, et al. Anatomy of an avulsion [J]. *Sedimentology*, 1989, 36(1):1-23.

(收稿日期:2018-04-15 编辑:雷燕)