# 长江上游干支流汇合口河道特征研究

王梅力[1]，陈秀万[2]，林孝松[1]，王平义[1]
（1. 重庆交通大学 河海学院，重庆 400074；2. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所，北京 100871）

**摘要**：采用遥感卫星影像资料、实测河道地形图、地理信息系统和AutoCAD软件等相结合的方法，从河道平面形态和河床地貌形态对长江上游宜宾至重庆主城区河段9个主要干支流交汇河口的河道特征进行了分析。主要研究了交汇河段干支流河型特征、干支流交汇角和交汇位置、干流弯曲度、干支流河宽比及面积比、河道断面形态和滩地形态等。结果表明：在交汇河段长江干流主要呈弯曲型河道的特征，而支流入汇段基本为顺直河道；干支流交汇角一般在30°~90°范围内，且大多数支流在长江干流凹岸弯顶上游侧入汇；大部分干流河弯的弯曲度大于1.2，属于典型的弯曲型河道；长江干流河宽和面积远大于支流河宽和面积，干流河宽沿程变化相对平缓，河弯比较规顺；汇合口河段的河床地貌形态复杂，河谷断面形态往往发育为“偏V”字形或不完整的“U”形，存在碍航的江心滩或浅滩。研究成果对港口及航道工程、水利工程、市政工程和生态环境工程等的规划和建设具有重要的指导价值。

**关 键 词**：长江上游；干支流汇合口；河道平面形态；河床形态；弯曲型河道；弯曲度
**中图分类号**：TV147 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-640X(2014)04-0058-07

长江上游流经我国西南地区，属典型的山区河流。从宜宾到宜昌1 030 km长的河段，通常称为川江，沿途有岷江、沱江、赤水河、嘉陵江、乌江等众多支流汇入，形成干支流汇合口。自古以来，在长江上游干流与支流交汇之地建有重要的城镇，如位于岷江河口的宜宾、沱江河口的泸州、嘉陵江河口的重庆、乌江河口的涪陵等。山区河流交汇河口有其独特性质，干流与支流水位相互顶托，流速减小，水流挟沙能力下降，促使大量泥沙淤积，形成支流河口浅滩，直接影响干支流航运；同时，对水利工程、市政工程、生态环境工程等也带来重要影响。

目前，国内外对天然河流干支流交汇形式、交汇口水沙特性与演变规律的研究较多，对长江上游干支流汇合口的水沙特性与整治技术的研究也取得了一些成果。J. L. Best等[1]研究了明渠交汇口分离区问题；J. M. Gaudet等[2]分析了汇合口河床形态对水流混合长度的影响；C. C. Hsu和J. Huang等[3-4]对明渠交汇口水流特性进行了试验和计算分析；惠遇甲等[5]研究了交汇河段泥沙冲淤特性；徐孝平等[6]分析了直角交汇河段的流场特性；茅泽育和郭维东等[7-8]对交汇口三维水力特性进行了试验研究；刘同宦等[9]对汇合口水流结构进行了分析；周华君等[10]对长江嘉陵江交汇口水力特征进行了试验研究；刘建新和兰波等[11-12]分别对部分山区河流干支流汇流特性和水面形态特征进行了试验和分析；陆永军和陈景秋等[13-14]对长江嘉陵江交汇口水沙运动特性进行了数值模拟计算；林燕宁等[15]对长江沱江汇合口水沙特性进行了平面二维数值模拟研究；张强等[16]根据干流河型对汇合口交汇形式作了重新划分；王平义等[17]采用模型试验和数值计算等方法对长江上游干支流汇合口水沙特性及整治技术进行了研究。但上述研究多限于简单概化的交汇口形式或某一具体的汇合口水沙特性的研究，缺少较系统的干支流汇合口几何形态及河道特征的全面分析。

本文旨在通过选取长江上游宜宾至重庆主城区河段9个主要干支流交汇河口，根据2000年Landsat-7 ETM+遥感卫星影像资料提取河道空间信息，对数据源进行波段组合生成空间分辨率为14.25 m的图像，利

**收稿日期**：2014-02-10
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(51079165)；交通运输部西部交通建设科技项目(200832881438)
**作者简介**：王梅力(1991-)，女，重庆人，硕士研究生，主要从事地理信息系统研究。E-mail：1214859339@qq.com

用 1999 年 12 月长江泸州航道局实测的 1∶15 000 长江上游河道地形图和 2007 年 3 月实测的 1∶5 000 典型汇合口河段地形图对图像进行几何精准纠正，采用 ArcGIS9.3，ERDAS9.2 和 AutoCAD 等数据处理平台软件系统读取所需要的数据，对干支流汇合口的平面几何形态参数和河床特征进行统计分析，深入探讨汇合口形态的内在规律，有助于进一步认识干支流汇合口水沙运动特性和河床演变过程的形态特征，有利于干支流汇合口港航工程、防洪工程和市政工程的规划建设及城镇景观开发和生态环境保护。

## 1　干流及支流概况

长江上游宜宾至重庆主城区河段长 384 km（航道里程），简称叙渝段，流经山区丘陵地带，河床多为砂卵石所覆盖，间有部分基岩，河床稳定，江心洲、边滩发育，在一个水文年内有较明显的冲淤变化。洪水期河宽约 500～1 000 m，枯水期河宽约 400 m。坡谷比降大，平均纵比降 0.27‰。枯水期流速约 1.5～2.0 m/s，个别滩险河段可达 4.2 m/s。多年平均流量为 8 340 $m^3/s$，最大流量 63 800 $m^3/s$，最小流量 1 900 $m^3/s$（朱沱水文站），年水位平均变幅为 19.93 m。

长江干流叙渝段自上而下沿程有岷江、南广河、黄沙河、长宁河、永宁河、沱江、赤水河、綦江和嘉陵江等 9 条主要支流汇入，其中位于长江左岸有 4 条，右岸有 5 条。主要支流沿程分布不均匀，最大间距 127.3 km，最小间距只有 5 km，支流平均间距 42.67 km，分布密度较小，支流河口也相应较少。表 1 为长江宜宾–重庆河段主要支流分布情况。

**表 1　长江宜宾–重庆河段主要支流分布情况**

Tab.1　Distribution of tributary streams from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River　　km

| 支流名称 | 入汇长江方位 | 距宜昌航道里程 | 间　距 | 城　镇 |
|---|---|---|---|---|
| 岷　江 | 左岸 | 1 044.0 | | 宜宾市 |
| 南广河 | 右岸 | 1 039.0 | 5.0 | 南广镇 |
| 黄沙河 | 左岸 | 1 021.0 | 18.0 | 李庄镇 |
| 长宁河 | 右岸 | 976.5 | 44.5 | 江安县 |
| 永宁河 | 右岸 | 934.4 | 42.1 | 纳溪区 |
| 沱　江 | 左岸 | 913.0 | 21.4 | 泸州市 |
| 赤水河 | 右岸 | 841.3 | 71.7 | 合江县 |
| 綦　江 | 右岸 | 714.0 | 127.3 | 綦江区 |
| 嘉陵江 | 左岸 | 660.0 | 54.0 | 重庆市 |

## 2　汇合口平面形态特征分析

### 2.1　交汇河段干支流河型特征

国内外研究者大多从平面交汇形式上将干支流汇流口简单概括为非对称型汇流口和对称型汇流口两种。非对称型汇流口，即支流斜接干流，汇合口上下干流段斜接平顺、支流的汇入没有改变干流的流势；对称型汇流口，即所谓的“Y”型交汇口，交汇口上游干支流相对于下游干流呈对称分布。按照这种划分方法，则长江上游的岷江河口、黄沙河河口、长宁河河口、永宁河河口、沱江河口、嘉陵江河口应属非对称型汇流口；南广河河口、赤水河河口、綦江河口可归为“Y”型交汇口。这种分类方法的主要目的是便于开展水槽概化模型试验和理论简化分析。对于交汇河口河道几何形态较为规则、河流地貌比较简单、水沙运动不太复杂的情况，研究结果尚能满足工程技术上的需要。

但是，对于长江上游干支流汇合口复杂的交汇形态、水沙运动和滩险演变，需要从河流地貌和河床演变学中有关河型分类的方法进行更贴近实际的分类研究。为此，统计长江上游主要汇合口交汇河段干支流的河型列于表 2。由表可见，在交汇河段长江干流主要呈弯曲河道特征，而支流入汇段大多为顺直河道（图 1 所示）。

**表 2 长江宜宾至重庆河段汇合口干支流河型特征**

Tab. 2 River patterns of junction reach from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River

| | 岷江河口 | 南广河河口 | 黄沙河河口 | 长宁河河口 | 永宁河河口 | 沱江河口 | 赤水河河口 | 綦江河口 | 嘉陵江河口 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 干流 | 弯曲 | 微弯 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 | 弯曲 |
| 支流 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 顺直 | 弯曲 |

(a) 沱江河口 (b) 赤水河河口

图 1 代表性汇合口平面形态

Fig. 1 Plane configuration of typical junctions

因此,对于长江上游大多数干支流交汇口,不能简单地概化为非对称型汇流口或对称型汇流口的几何形态,而应将干流概化为弯曲型、支流概化为顺直型的形态特征(图 2),进行更为符合实际情况的试验或理论研究。

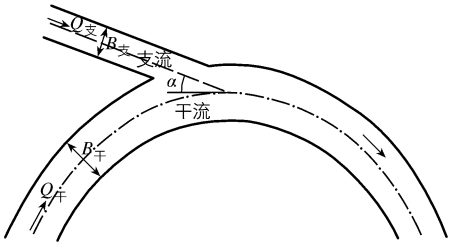



图 2 顺直支流入汇弯曲干流型交汇河口

Fig. 2 A junction of meandering main stream and straight tributary

## 2.2 交汇角和入汇位置统计分析

干支流交汇角和交汇位置对河口水沙运动、浅滩的形成等影响较大,对航行安全、河道治理、城市规划建设等至关重要。交汇角很小,交汇后过水面积突然增大,流速减小、环流减弱,浅滩将形成于交汇口下游;如交汇角较大,泥沙在交汇口的上游易淤积而形成浅滩。如支流从干流凸岸汇入时,受弯道环流的作用,泥沙在凸岸淤积,支流河口淤堵。支流在凹岸汇入,干支流的交汇角是关键因素,由于干支流水量的大小不一定同期,更不会同步,汇流角大,必然迫使主流线游荡,航道水深很难维持;在凸岸汇入,对稳定航道水深有利;在直段汇入,一般可以借助它去改善航道条件。

定义顺直支流河道中心线与弯曲干流中心线交点处切线方向的夹角(α)为干支流交汇角(图 2),测量统计长江上游宜宾至重庆主城区河段主要干支流交汇角和交汇位置(表 3),结果表明交汇角在 30°~90°范围内,最大为岷江河口,最小是长宁河口,平均入汇角为 58.2°。支流入汇位置除长宁河、嘉陵江在长江干流凸岸入汇外,其余皆在长江干流凹岸入汇且在干流凹岸弯顶上游侧入汇者居多。

**表 3 长江宜宾至重庆河段干支流交汇角和入汇位置**

Tab. 3 Angle and position of junctions from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River

| | 岷江河口 | 南广河河口 | 黄沙河河口 | 长宁河河口 | 永宁河河口 | 沱江河口 | 赤水河河口 | 綦江河口 | 嘉陵江河口 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 交汇角(°) | 82 | 60 | 69 | 35 | 76 | 58 | 52 | 48 | 44 |
| 入汇位置 | 凹岸弯顶上游 | 凹岸弯顶下游 | 凹岸弯顶上游 | 凸岸弯顶上游 | 凹岸弯顶上游 | 凹岸弯顶上游 | 凹岸弯顶上游 | 凹岸弯顶下游 | 凸岸弯顶下游 |

## 2.3 干流弯曲度统计分析

自然界中的河流几乎都是弯曲的,对弯曲河道形态的统计分析有助于对河弯水沙运动及河流演变特征的了解。近年来,随着尊重自然、顺应自然和生态环境保护意识的增强,人们开始注重保护自然的河流平面形态特征,在航道整治、城市规划等河道综合治理中,尽可能地保持或恢复天然的弯曲形态特点,避免单调的

直线或折线型规划设计。河流的弯曲度(用曲折系数表示)是标志弯道形态特征的重要指标,从宏观上反映河道弯曲的程度和河湾横向变形的大小,从微观上间接反映水流三维结构、泥沙输移和河床演变的复杂程度。因此,本文选择弯曲度(曲折系数)进行汇合口干流河道平面特征的研究。曲折系数 $R=S/L$,其中,$S$ 为河段两端点间沿河道中心线轴线长度,$L$ 指河段两端点直线距离[18]。

根据长江上游河道实测资料和遥感影像,提取主流线信息及河流地貌信息,分别计算长江上游宜宾至重庆主城区河段主要干支流汇合口干流段的曲折系数(表 4)。根据河床演变学中对河型的一般分类方法[19],这里取曲折系数 $R<1.2$ 时为微弯型河道,$1.2\leqslant R\leqslant 1.4$ 为中等弯曲型河道,$R>1.4$ 为急弯型河道。一般河流的弯曲度沿程变化幅度很大,当河湾接近裁弯取值时,弯曲度将趋近于无穷大,而当河道为顺直时,弯曲度接近于 1;统计河段并不存在正在裁弯取值或非常接近于裁弯取直的河弯。从整体来看,计算的 9 个河段的平均弯曲度为 1.32,大部分(77.8%)河弯的弯曲度大于 1.2,属于典型的弯曲型河道。

**表 4　长江宜宾至重庆河段汇合口干流曲折系数**

Tab. 4　Coefficients of curvature of main reaches at junctions from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River

| | 岷江河口 | 南广河河口 | 黄沙河河口 | 长宁河河口 | 永宁河河口 | 沱江河口 | 赤水河河口 | 綦江河口 | 嘉陵江河口 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 曲折系数 $R$ | 1.18 | 1.10 | 1.38 | 1.28 | 1.35 | 1.54 | 1.43 | 1.41 | 1.22 |
| 弯型 | 微弯 | 微弯 | 中等弯 | 中等弯 | 中等弯 | 急弯 | 急弯 | 急弯 | 中等弯 |

### 2.4　河宽比及面积比统计分析

干支流河宽的大小和相互之间的关系表征汇合口河道规则与否及相互影响的程度,也是研究干支流汇合口水沙运动及滩险成因的重要指标。分别读取洪水期干、支流交汇河段若干不同横断面(间距 30 ~ 40 m)的河宽,取其平均值,可计算出干流平均河宽($B_{干}$)与支流平均河宽($B_{支}$)的比值,相应得到干流平均断面面积($A_{干}$)与支流平均断面面积($A_{支}$)的比值;同时,读取干流河弯弯顶处横断面的河宽,可计算出干流弯顶河宽($B_{干顶}$)与干流平均河宽的比值(表 5)。从表 5 可见,9 个汇合口干流平均河宽与支流平均河宽的比值平均大小为 5.18、面积比值的平均值为 10.12,说明整体上长江干流的河宽和面积远大于支流河宽和面积。但是,岷江、嘉陵江的河宽和面积与长江干流河宽和面积基本上相当,反映出这两条支流对汇合口的影响起着重要作用;其次是沱江和赤水河;而长宁河、永宁河等其他 5 条支流的影响相对较小。特别是长宁河从干流凸岸汇入,受弯道环流的作用泥沙在凸岸严重淤积,支流被淤堵,河道面积远小于干流。9 个汇合口干流弯顶河宽与干流平均河宽的比值的平均大小是 1.16,表明干流河宽沿程变化相对平缓,河弯比较规顺。尤其是位于南广河河口和嘉陵江河口处的干流弯曲段河宽上下比较均衡。但是,黄沙河河口、沱江河口、赤水河河口和綦江河口处的干流弯顶河宽与干流平均河宽的比值皆大于 1.2,干流在弯顶附近突然变宽,对河道水沙运动、通航安全、生态环境等都会带来一定的影响。

**表 5　长江宜宾至重庆河段汇合口河宽及面积的关系**

Tab. 5　Relationships of river width and area at junctions from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River

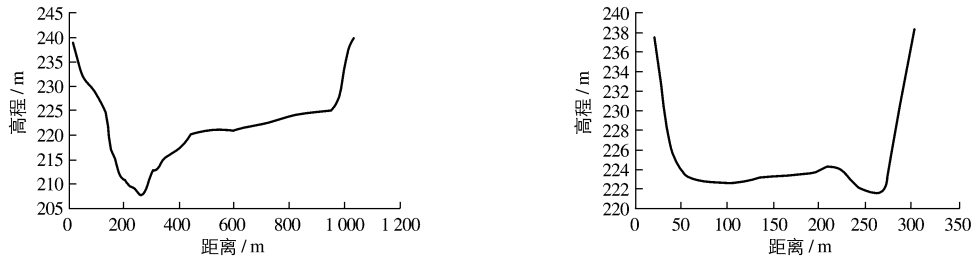
| | 岷江河口 | 南广河河口 | 黄沙河河口 | 长宁河河口 | 永宁河河口 | 沱江河口 | 赤水河河口 | 綦江河口 | 嘉陵江河口 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $B_{干}$(m) | 450 | 525 | 690 | 915 | 615 | 750 | 555 | 1 065 | 645 |
| $B_{干顶}$(m) | 480 | 540 | 825 | 1 080 | 705 | 960 | 675 | 1 380 | 675 |
| $B_{支}$(m) | 375 | 67.5 | 90 | 82.5 | 75 | 315 | 195 | 150 | 525 |
| $B_{干顶}/B_{干}$ | 1.07 | 1.03 | 1.20 | 1.18 | 1.15 | 1.28 | 1.22 | 1.30 | 1.05 |
| $B_{干}/B_{支}$ | 1.20 | 7.78 | 7.67 | 11.09 | 8.2 | 2.38 | 2.85 | 7.1 | 1.23 |
| $A_{干}/A_{支}$ | 1.36 | 16.45 | 15.34 | 19.41 | 14.35 | 4.76 | 5.18 | 12.91 | 1.34 |

## 3　河床地貌基本特征分析

### 3.1　河道断面形态

同我国西南地区山区河流地貌的普遍特征相类似[20],长江上游干支流汇合口河段的河谷断面形态往往发育为从较陡的一岸再倾斜平缓过渡到另一岸的“偏 V”字形(如岷江河口干支流段、沱江河口干流段、嘉陵

江河口干支流段等)或不完整的“U”形(如沱江河口、赤水河河口、綦江河口的支流段等),两岸谷坡比较陡峻,坡面常呈直线形或曲线形,图 3 为长江与沱江汇合口典型河道横断面;河谷内会出现一级或多级河流阶地,一般较为狭窄,级数比较少;谷底与谷坡(槽与滩)之间常无明显界限,不同水位下的河床之间也常无明显分界线;两岸常有岩石突嘴,犬牙交错,江心常有礁石或岩盘,岸线极不规则(城市滨江路的修建已使部分岸线比较规则);分布于两岸的冲积河漫滩主要由砂、卵石和砾石构成,砾石质坚,一般粒径 0.5 ~ 2.0 cm,砂质成分以长石、石英为主;一级阶地具有二元结构,沿岸以粉质黏土为主,下伏砂、砾和卵石。河流纵剖面较陡峻,坡降一般为 0.1‰ ~ 1.0‰,形式很不规则,急滩深潭上下交错,常呈阶梯状曲线。




(a) 长江断面 (b) 沱江断面

图 3 长江与沱江交汇口河段典型断面

Fig. 3 Typical cross-section at junction of Yangtze River and Tuo River

### 3.2 滩地形态特征

在长江上游的干支流汇口处几乎都存在江心滩(洲)或边滩等河流地貌(表 6)。其主要原因是交汇河口的入汇角较大,干支流相互顶托作用增强,干支水流在交汇口处发生强烈的紊动掺混,水流能量损失很大,流速急剧降低,引起泥沙落淤,长期发展就会形成江心滩(洲)。而由于江心滩的阻水作用和分流作用,使得流速减小,泥沙淤积,又会成为河口浅滩或浅滩群。河口浅滩或江心滩的形成与两江水沙组合、交汇角、支流的入汇位置、河宽比、弯曲度等因子有关。如长宁河于凸岸汇入长江,长江的流量远大于长宁河流量,汇口处长江的水沙运动占有绝对优势,由弯道水沙运动规律可知泥沙会在入汇口凸岸大量淤积从而形成江心洲。

**表 6 长江宜宾至重庆河段汇合口河床地貌特征**

Tab. 6 Characteristics of river morphology at junctions from Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River

| 河口名称 | 河道断面形态 | 河道边界条件 | 滩地形态特征 |
|---|---|---|---|
| 岷江河口 | 干支流偏 V 形 | 岸线不规则、河岸具有抗冲性 | 左岸有月亮碛伸入江中,右岸有铁匠滩边滩 |
| 南广河河口 | 干支流偏 V 形 | 岸线不规则、河岸具有抗冲性 | 左岸有冷饭碛,江心有台子石,右岸有石梁 |
| 黄沙河河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线规则、河岸具有一定抗冲性 | 左岸有狗屎碛、鸡公滩,右岸有黄家坝边滩 |
| 长宁河河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线不规则、河岸具有抗冲性 | 左岸有金鸡尾突嘴,右岸有牛角坝边滩 |
| 永宁河河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线不规则、河岸具有一定抗冲性 | 左岸有伏浩子碛坝,右岸有磨盘石边滩 |
| 沱江河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线较规则、河岸具有一定抗冲性 | 江心有金钟碛(暗碛),右岸有茜草坝边滩 |
| 赤水河河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线规则、河岸具有一定抗冲性 | 左岸有白塔碛边滩,右岸有石盘突出江心 |
| 綦江河口 | 干流偏 V 形、支流 U 形 | 岸线极不规则、河岸具有抗冲性 | 江中有大、小中坝,右岸有中三坝边滩 |
| 嘉陵江河口 | 干支流偏 V 形 | 岸线较规则、河岸具有抗冲性 | 嘉陵江左岸金沙碛、长江左岸月亮碛边滩 |

由于长江上游汇合口干流段主要呈现弯曲河道的特征,因此受弯道环流的作用,汇合口干流仍保持了单纯弯道的凹岸冲刷、凸岸淤积的泥沙输移特点,在干流河段普遍存在凸岸边滩、凹岸深槽的河床形态。如位于长江与沱江交汇处的金钟碛浅滩和茜草坝边滩、长江与赤水河交汇处的白塔碛边滩、长江与嘉陵江交汇处的金沙碛边滩和月亮碛边滩等都属于典型的弯道河床地貌形态特征。干支流汇合口复杂的床面形态及碍航滩险对航行影响较大,是航道整治的重点和难点。

## 4 结 语

(1)对于长江上游干支流交汇口,在交汇河段长江干流主要呈弯曲河道的特征,而支流入汇段大多为顺

直河道。因此，不能简单地概化为非对称型汇流口或对称型汇流口的几何形态，而应将干流概化为弯曲型、支流概化为顺直型的形态特征。

(2)长江上游干支流交汇角在 30° ~ 90°范围内，最大为岷江河口，最小是长宁河口，平均入汇角为 58.2°。支流入汇位置除长宁河、嘉陵江在长江干流凸岸入汇外，其余皆在长江干流凹岸入汇且在干流凹岸弯顶上游侧入汇者居多。

(3)从整体来看，长江上游干支流交汇口干流河段的平均弯曲度为 1.32，大部分(77.8% )河弯的弯曲度大于 1.2，属于典型的弯曲型河道。

(4)长江上游干支流汇合口干流平均河宽与支流平均河宽的平均比值为 5.18、平均面积比值为 10.12，说明整体上长江干流的河宽和面积远大于支流河宽和面积。而且干流河宽沿程变化相对平缓，河弯比较规顺。

(5)长江上游干支流汇合口河段的河谷断面形态往往发育为“偏 V”字形或不完整的“U”形，河流纵剖面较陡峻(0.1‰ ~ 1.0‰)，形式很不规则。在汇合口处几乎都存在碍航的江心滩或浅滩。

## 参 考 文 献：


[1] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1984, 10(11): 1588-1594.

[2] GAUDET J M, ROY A G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluence[J]. Nature, 1995, 373(2): 138-139.

[3] HSU C C, WU F S, LEE W J. Flow at 90° equal-width open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1998, 124(2): 186-191.

[4] HUANG J, WEBER L J, LAI Y G. Three-dimensional numerical simulation of flow in an open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(3): 25-33.

[5] 惠遇甲，张国生. 交汇河段水沙运动和冲淤特性的试验研究[J]. 水力发电学报，1990(3)：33-42.（HUI Yu-jia, ZHANG Guo-sheng. Experimental studies on the behavior of flow and sediment movement at river confluence[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1990(3): 33-42. (in Chinese))

[6] 徐孝平，彭文启，李炜. 直角交汇河段流场特性分析[J]. 水利学报，1993(2)：22-31.（XU Xiao-ping, PENG Wen-qi, LI Wei. Experimental study and numerical simulation for hydraulic characteristics of open channel junction at right angle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(2): 22-31. (in Chinese))

[7] 茅泽育，赵升伟，张磊，等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报，2004(2)：1-7.（MAO Ze-yu, ZHAO Sheng-wei, ZHANG Lei, et al. Experimental study on 3D flow characteristics at the confluence of open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(2): 1-7. (in Chiense))

[8] 郭维东，王晓刚，曹继文，等.“Y”型汇流口水流水力特性试验研究[J]. 水电能源科学，2005，23(3)：53-56.（GUO Wei-dong, WANG Xiao-gang, CAO Ji-wen, et al. Research of hydraulic characteristics of “Y” shaped junction[J]. Water Resources and Power, 2005, 23(3): 53-56. (in Chinese))

[9] 刘同宦，郭炜，王协康，等. 入汇角为30°时交汇区水流结构试验研究[J]. 长江科学院院报，2007，24(4)：75-78.（LIU Tong-huan, GUO Wei, WANG Xie-kang, et al. Experimental study on flow characteristics of open channel confluence at junction angle 30°[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(4): 75-78. (in Chinese))

[10] 周华君，王绍成. 长江嘉陵江交汇口水力特征研究[J]. 水运工程，1994(12)：24-29.（ZHOU Hua-jun, WANG Shao-cheng. A study of flow characteristics of junction at Yangtze River and Jialing River[J]. Port & Waterway Engineering, 1994(12): 24-29. (in Chinese))

[11] 刘建新，程昌华. 山区河流干支流汇流特性研究[J]. 重庆交通学院学报，1996，15(4)：23-26.（LIU Jian-xin, CHENG Chang-hua. A study of the convergence characteristics in mountain stream[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1996, 15(4): 23-26. (in Chinese))

[12] 兰波，汪勇. 干支流交汇水面形态特征分析[J]. 重庆交通学院学报，1997，16(4)：109-114.（LAN Bo, WANG Yong. Experimental study on water surface characteristics at the junction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1997, 16(4): 109-114. (in Chinese))

[13] 陆永军. 支流河口水沙运动的二维数学模型研究-以长江上游的嘉陵江河口为例[J]. 水利学报, 1998(10): 60-67. (LU Yong-jun. A study of 2-D mathematical model of water and sediment movement at the branch river estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(10): 60-67. (in Chinese))
[14] 陈景秋, 刘雪兰, 赵万星, 等. 重庆主城区两江汇流场数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(8): 135-137. (CHEN Jing-qiu, LIU Xue-lan, ZHAO Wan-xing, et al. Numerical simulation on confluence of the two rivers in Chongqing city[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(8): 135-137. (in Chinese))
[15] 林燕宁, 喻涛. 干支流汇合口平面二维水沙数学模型研究[J]. 吉林水利, 2011(9): 14-19. (LIN Yan-ning, YU Tao. The study of the two-dimensional mathematical model of water and sediment in the tributaries confluence[J]. Journal of Jilin Hydraulic, 2011(9): 14-19. (in Chinese))
[16] 张强, 王平义, 刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分[J]. 重庆交通大学学报, 2010, 29(3): 458-460. (ZHANG Qiang, WANG Ping-yi, LIU Qian-ying. Redivision of confluence patterns of main stream and tributaries of rivers at mountainous area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010, 29(3): 458-460. (in Chinese))
[17] 王平义, 刘怀汉, 张华庆, 等. 长江上游干支流汇合口水沙特性及整治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 107-125. (WANG Ping-yi, LIU Huai-han, ZHANG Hua-qing, et al. Characteristics of flow & sediment and regulation technology on junctions of upper Yangtze River[M]. Beijing: China Communications Press, 2012: 107-125. (in Chinese))
[18] 王平义. 弯曲河道动力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995: 58-60. (WANG Ping-yi. Curved channel dynamics [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1995: 58-60. (in Chinese))
[19] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 7-8. (QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHOU Zhi-de. Riverbed evolution[M]. Beijing: Science Press, 1987: 7-8. (in Chinese))
[20] 倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 146-151. (NI Jin-ren, MA Ai-nai. River dynamic geomorphology[M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 146-151. (in Chinese))

# Channel characteristics of junctions in upper Yangtze River

WANG Mei-li[1], CHEN Xiu-wan[2], LIN Xiao-song[1], WANG Ping-yi[1]

(1. *School of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *RS and GIS Institute of Peking University, Beijing* 100871, *China*)

**Abstract**: Based on Landsat-7 ETM + RS Land images data, the measured river topographic map, GIS and AutoCAD software, this research has investigated the channel characteristics of nine junctions in the Yibin-Chongqing reach of the upper Yangtze River from the channel plane configuration and riverbed morphology. These junctions are Min River junction, Manguang River junction, Huangsha River junction, Changning River junction, Yongning River junction, Tuo River junction, Chishui River junction, Qi River junction and Jialing River junction. The following main problems have been systematically studied: river pattern characteristics of the confluence reaches, the intersection angle, location of the main stream and tributaries, curvature of the main stream, river width ratio of the main stream and tributaries, section area ratio of the main stream and tributaries, river channel section morphology and beach morphology, etc. The research results show that the main stream reaches are curved and the tributary stream reaches are straight at the junctions; intersection angles between main stream and the tributaries are 30° ~ 90°; the curvature of the most main stream is over 1.20; the river width and section area of the main stream are greater than those of the tributary streams; and the trend of variation in river width is gentle. The river morphology at the junction reach is very complicated, the valley cross-sections would develop to be almost "V" -shaped or incompletely "U"-shaped, and there are central bars and shoals having impacts upon navigation. The above analysis results are of important guidance for the planning and construction of similar port and waterway engineering, hydraulic engineering, municipal engineering and ecological engineering, etc.

**Key words**: upper Yangtze River; junction; channel plane configuration; riverbed morphology; meander river; curvature