

长江中下游阻隔性河段作用机理

由星莹^{1,2}, 唐金武³, 张小峰¹, 杨云平⁴, 翁朝晖², 孙昭华¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064; 3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430012; 4. 工程泥沙交通运输行业重点实验室交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 阻隔性河段能够阻隔上游河势调整向下游的传递, 对稳定河势起到关键性作用。本文以长江中下游34个单一河段为研究对象, 在系统总结长江中下游河道演变规律的基础上, 归纳出阻隔性河段控制要素包括: 单一微弯的河道平面形态、河段中上部无挑流节点; 河相系数小于4; 河道纵比降大于 1.2‰ ; 凹岸黏粒含量高于9.5%; 床沙中值粒径大于0.158 mm等。从Navier-Stokes方程出发, 推导出河湾水流动力轴线弯曲半径的表达式, 进而分析了各控制要素对水流动力轴线摆动及阻隔性河段形成的作用。阻隔性河段的判别条件为: 不同流量级下水流动力轴线摆动与河道边界条件约束力的比值始终小于1; 阻隔性河段作用机理在于: 即便上游河势发生调整, 本河段的河道边界始终能约束主流摆动幅度, 归顺上游不同河势条件下的主流平面位置, 为下游河道提供了相对稳定的入流条件, 从而阻隔上游河势调整向下游传递。

关键词: 阻隔性河段; 水流动力轴线; 河道边界; 长江中下游

DOI: 10.11821/dlxb201705005

1 引言

长江中下游干流河道素有“黄金水道”之美誉, 是“长江经济带”主轴, 其河势稳定不仅关系长江中下游防洪安全、航运畅通、水土资源利用等诸多方面, 更事关沿江两岸经济社会发展, 稳定中下游河势的意义十分重大。长江中下游沙市一大通河段全长约991 km, 单一河道与分汊河道相间分布, 长度分别为504.8 km和486.2 km, 占河段总长的50.9%和49.1%。分汊河道河岸抗冲性较差, 河道宽浅, 河势变化相对剧烈, 其中, 鹅头型汊道一般遵循“边滩切割、心滩形成→心滩发展壮大、逐渐平移→归并消亡”的演变规律, 如陆溪口、罗湖洲汊道^[1]等, 顺直和微弯型汊道演变规律主要表现为支汊交替, 如新堤夹、天兴洲、戴家洲汊道^[2]等; 单一顺直段一般遵循“交错边滩此消彼长、过渡段上提下移”的演变规律^[3], 但主流摆动幅度不如分汊河道大; 单一微弯段凹岸大多已被守护, “凹冲凸淤”演变规律已不甚明显。正因为分汊河道的河势变化剧烈, 对防洪、航运等影响较大, 水利、交通等部门对分汊河道进行了大量研究^[1-6]。由于分汊河道与单一河道交错分布的特点, 大量实测资料分析表明, 有些汊道段, 河势调整通过单一河段

收稿日期: 2016-08-15; 修订日期: 2016-12-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51379155); 国家科技支撑计划项目(2013BAB12B02-02); 国家重点研发计划(2016YFC0402306, 2016YFC0402106); 中央级公益性科研院所基本科研业务(TKS160103) [Foundation: The Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.51379155; The National Key Technology R&D Program, No.2013BAB12B02-02; National Program on Key Research Project of China, No.2016YFC0402306, No.2016YFC0402106; Fundamental Research Funds for Central Welfare Research Institutes, No. TKS160103]

作者简介: 由星莹(1986-), 女, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 主要从事水力学、河流动力学研究。E-mail: you_tang@foxmail.com

后会继续向下游传递,如马鞍山河段^[5]、天兴洲河段^[6],这使得单一河段以下河道演变也受到上游河势调整的影响,无疑增加了下游河道演变趋势预测及整治工程布置的难度;而有些汉道段,河势调整通过单一河段后不再向下游传递,如龙口河段^[2],河道演变影响因素相对单一,整治工程布置相对简单。因此,对单一河道,尤其是能阻隔上游河势调整向下游传递的单一河道进行研究,是十分必要的。

文献[7]在系统总结分析长江中下游长河段长时段河道演变规律基础上,提出能够阻止河势调整向下游传递的阻隔性河段,并分析了阻隔性河段的基本特征,但文献[7]在阻隔性河段的控制要素方面研究不足,使阻隔性河段判别经验性较强;同时对阻隔河势传递的内在机理研究不够深入,限制了其在长江中下游阻隔性河段的塑造及维护等方面的应用。本文在文献[7]的基础上,进一步分析阻隔性河段形成的控制要素,通过推导河湾水流动力轴线弯曲半径理论公式,明确各控制要素对形成阻隔性河段的作用,剖析阻隔性河段作用机理,为长江中下游河道治理提供重要参考。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

本文研究对象为长江中下游沙市一大通河段,河床组成主要为沙质,两岸大多为二元结构,部分岸段存在抗冲性较强的节点。沙市—城陵矶河段右岸有松滋、太平、藕池三口分荆江水沙入洞庭湖,三口和湘、资、沅、澧四水的水沙经洞庭湖调蓄后于城陵矶汇入长江,分布有沙市、监利水文站。城陵矶—武汉河段左岸有汉江入汇,分布有螺山、汉口水文站;武汉一大通河段右岸有鄱阳湖入汇,分布有湖口、大通水文站。

本文研究方法有两种:一是利用实测水文地形地质及遥感资料统计分析法,获取控制要素值,具体为:利用最新航空遥感测图,直接量取各河段的河湾曲率半径、节点位置及突出岸线长度等要素;采用2011年、2013年等年份实测河道地形断面数据计算各河段的典型断面河相系数、平均纵比降等要素;根据2003-2009年床沙资料统计各河段床沙中值粒径作为河底抗冲性要素,总结各河段平滩水位至深泓范围内凹岸岸坡地质结构组成,并根据物理力学性质试验成果统计各土层的黏粒含量,再按各土层厚度进行加权平均计算,得到河岸抗冲性要素。通过上述方法,从平面、横断面、纵剖面以及河岸河床抗冲性等方面对比分析阻隔性河段和非阻隔性河段的异同,剖析阻隔性控制要素。

二是利用数学方法,从Navier-Stokes方程出发,推导河湾水流动力轴线弯曲半径的半经验半理论公式,延伸出主流摆动力与边界约束力对比关系,验证上述各控制要素对阻隔性河段的作用,结合实测水文地形地质资料,剖析阻隔性河段形成机理。

2.2 数据来源

航空遥感测图来源于USGS提供的Landsat卫星数字产品中2016年最新测图(<https://www.usgs.gov/>中文镜像网站为<http://www.gscloud.cn/>);实测河道断面地形数据由武汉大学提供;岸坡地质结构及黏粒含量来源于湖北省水利水电规划勘测设计院在1998-2002年编制的长江中游各堤段的地质勘察报告;床沙资料由交通运输部天津水运工程科学研究所提供。选取的34个单一河段在沙市—城陵矶、城陵矶—武汉、武汉—湖口、湖口—大通河段均有分布,既有单一顺直河段,又有单一微弯河段,具有较强的代表性,其基本情况及阻隔性控制要素值如表1所示。

表1 研究河段基本情况及阻隔性控制要素

Tab. 1 The basic conditions and the control factors of the barrier properties of the study river reaches

	序号	河段名称	河段长度 (km)	距宜昌里程 (km)	河道形态	是否有节点	河相 系数	是否有阻 隔性
沙市— 城陵矶	1	斗湖堤	9.9	175	单一微弯	无	2.55	是
	2	石首	8	234	单一微弯	中间有	2.86	否
	3	碾子湾	15	242	单一微弯	无	4.76	否
	4	河口	7	257	单一微弯	无	3.19	否
	5	调关	13	264	单一微弯	无	2.61	是
	6	莱家铺	12	277	单一微弯	无	3.32	否
	7	塔市驿	14	289	单一微弯	无	2.98	是
	8	大马洲	10.5	330	单一微弯	进口有	6.68	否
	9	砖桥	9	338	单一微弯	无	3.66	是
	10	铁铺	12	347	单一顺直	无	4.31	否
	11	反咀	6.5	356	单一微弯	无	3.11	是
	12	七公岭	7.8	380	单一微弯	中下有	3.29	否
城陵矶 —武汉	13	螺山	11	419	单一顺直	进口有	6.25	否
	14	石头关	9	456	单一微弯	出口有	5.08	否
	15	龙口	9.6	483	单一微弯	出口有	3.42	是
	16	汉金关	10.9	519	单一微弯	无	3.25	是
	17	簪洲湾	15	542	单一微弯	无	2.14	否
	18	沌口	12	610	单一顺直	中间有	5.59	否
	19	武桥	13	628	单一顺直	进口有	4.47	否
武汉— 湖口	20	阳逻	15	658	单一微弯	进口有	3.46	否
	21	湖广	10	679	单一微弯	进口有	3.93	否
	22	巴河	9.4	723	单一顺直	进口有	4.52	否
	23	黄石	15.5	753	单一微弯	出口有	2.70	是
	24	牯牛沙	17	773	单一微弯	进口有	4.07	否
	25	搁排矶	15	802	单一微弯	两岸沿程有	0.79	是
	26	武穴	13	830	单一微弯	中上有	4.87	否
	27	九江	16	853	单一微弯	无	3.17	否
湖口— 大通	28	上下三号—马垱过渡段	6	938	单一微弯	出口有	2.05	是
	29	马垱—东流过渡段	8	972	单一微弯	无	2.96	是
	30	东流—官洲过渡段	9	995	单一微弯	中间有	3.47	否
	31	官洲—安庆过渡段	16	1023	单一微弯	中间有	2.71	否
	32	安庆—太子矶过渡段	8.4	1054	单一微弯	出口有	1.71	是
	33	太子矶—贵池过渡段	10.5	1078	单一微弯	无	4.16	否
	34	大通顺直段	16	1101	单一顺直	进口有	4.29	否

3 阻隔性控制要素分析

3.1 平面控制要素

铁铺、螺山、沌口、武桥、巴河、大通等6个河段为单一顺直河道，由于河道较宽，难以约束上游河势调整导致的入流方向变化，伴随着交错边滩的复归性演变，本河段动力轴线大幅度上提下移^[3]；而调关、塔市驿、反咀等河段的河湾弯曲度较大，河湾出流方向因入流方向不同或流量不同而改变的幅度可以限制在较小范围内^[8]，从而使弯道具有良好的导流作用。表1中的34个单一河段，只有单一微弯河段才可能具有阻隔性，而

单一顺直河段均不具有阻隔性,可见单一弯曲的平面形态是形成阻隔性河段、阻隔河势调整向下游传递的控制要素之一。

长江中下游节点包括突出于岸线的山岩、胶泥咀、沉积年份较久的黏土层等。当单侧节点分布于河段中上部时,破坏了本河段平、断面形态的连续性,引起水流动力轴线弯曲半径大小的突变;上游河势调整后,入流动力轴线的角度、与节点贴靠程度发生变化^[1],节点挑流强度随之变化,导致出流方向大幅度改变。东岳山、阳逻矶、白浒山、西塞山、狗头矶、吉阳矶、小闸口等节点分别位于石首、阳逻、湖广、牯牛沙、武穴、东流—官洲、官洲—安庆等河段的中上部,上游河势调整后,节点挑流强度变化,致使出流动力轴线方向的改变程度明显不同,进而导致本河段河势调整向下游传递。可见,阻隔性河段中上部不应具有起挑流作用的单侧节点。

长江中下游也存在大量对峙节点,作为抗冲性较强的河道边界,对峙节点有利于限制河宽、控制河道总体走向^[4,8]。但由于对峙节点挑流强度不同,一旦上游河势变化,节点交替挑流且有强弱之分,加之节点下游河岸地质组成也存在差异,将引起主流摆动及河势调整。例如杨林矶、龙头山对峙分布于螺山河段进口,由于两节点挑流强度不同^[9],龙头山以下主流摆动频繁,加之下游界牌河段河岸抗冲性差、河道放宽,主流摆动幅度进一步加大^[3],不具有阻隔性;再例如龟、蛇山节点对峙分布于武桥河段进口,也有类似特征。也有些对峙节点河段的河势相对稳定,如白螺矶、道人矶对峙分布于南阳洲河段,沙帽山、铁板矶对峙分布于铁板洲河段,其稳定成因在于上游的观音洲弯道、煤炭洲弯道的河势长期保持稳定,从而为下游提供了稳定的入流平面位置,使对峙节点挑流强度始终变化不大,因此其稳定性依赖于上游河势,一旦人为或自然因素改变上游河势,本河段河势也将随之调整。可见,具有对峙节点的河段,由于两节点挑流强度不同^[9]以及节点两岸下游地质地貌条件的差异^[10],难以在上游河势变化后,仍维持窄深型断面来约束主流摆动,因而不具有阻隔性。

3.2 横断面控制要素

河宽过大的河道难以有效约束水流动力轴线摆动,且往往有宽广河漫滩发育^[11-12],当水流漫上河漫滩后,河宽骤然增加,河相系数显著增大^[13],为动力轴线提供了充足的摆动空间;此时,若上游河势调整,势必引起本河段的动力轴线摆动,进而向下游传递。

图1为各河段典型横断面图,为明显起见,将窄深型河段的深泓绘制于图中分界线左侧,将其他河段的深泓绘制于分界线右侧。可见,位于分界线左侧的斗湖堤、调关、塔市驿、砖桥、反咀、龙口、汉金关、黄石、搁排矶、上下三号—马垱、马垱—东流、安庆—太子矶等12个阻隔性河段为窄深型断面,不同流量级下的平均河相系数 ζ 小于4,随着流量增加,河道宽度增加较少而水深增加较多,可维持动力轴线的平面位置基本不变,从而阻隔上游河势调整向下游传递。除顺直、有节点的河段外,图1中碾子湾、大马洲、石头关、太子矶—贵池等河段的不同流量级下平均河相系数 ζ 大于4而不具有阻隔性,可见, $\zeta < 4$ 也是形成阻隔性河段、阻隔河势调整向下游传递的控制要素之一。

3.3 纵剖面控制要素

对于进口深泓高程高于出口的顺坡河段,纵剖面越陡、纵比降越大^[14],河段出口具有较强的吸流作用,有利于集中上游不同方向的来流而约束水流动力轴线摆动,主要有两种表现形式:一是河段出口由节点挑流形成的冲刷坑,如龙口、黄石、搁排矶河段;二是弯顶凹岸下游由弯道环流形成的冲刷坑,如调关、反咀、汉金关河段。对于逆坡或出口有支流汇入壅水顶托的河段,往往不具有阻隔性。统计表明,除顺直、有节点、 $\zeta > 4$ 的河段外,剩余的17个河段中只有七弓岭、簪洲湾、九江河段的河道纵比降小于

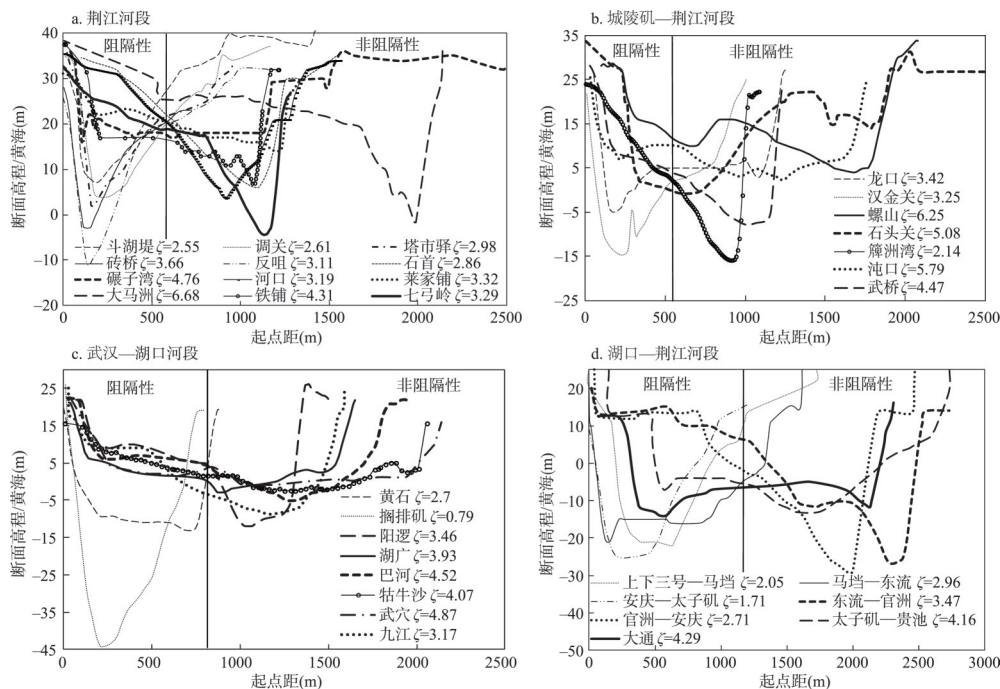


图1 长江中下游单一河段的典型横断面

Fig. 1 The typical transverse configurations of the typical cross-sections of the single-thread reaches in the middle and lower reaches of the Yangtze River

1.2‰，其余14个河段均大于1.2‰，说明河道纵比降大于1.2‰也是形成阻隔性河段、阻隔河势调整向下游传递的控制要素之一。

3.4 河岸及河床控制要素

Julian等^[15]研究表明，河岸抗冲性正比于其黏粒含量。图3为长江中游单一河段的凹岸黏粒含量及床沙中值粒径，上述剩余的14个河段中，仅有河口、莱家铺河段的凹岸黏粒含量低于9.5%而不具有阻隔性，其余12个河段均高于9.5%；仅有河口河段的床沙中值粒径小于0.158 mm而不具有阻隔性，其余12个河段均大于0.158 mm。可见，只有河

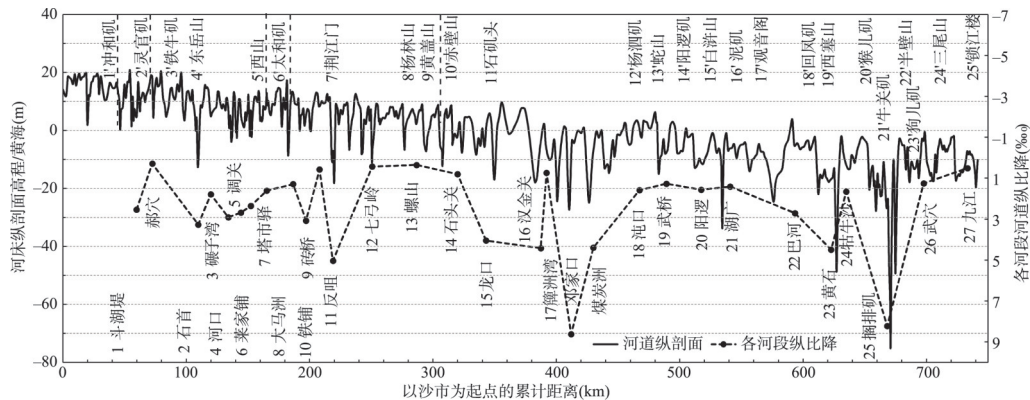


图2 长江中游单一河段河床纵剖面及河道纵比降

Fig. 2 The longitudinal gradients of the single-thread reaches and the longitudinal profile of the middle reaches of the Yangtze River

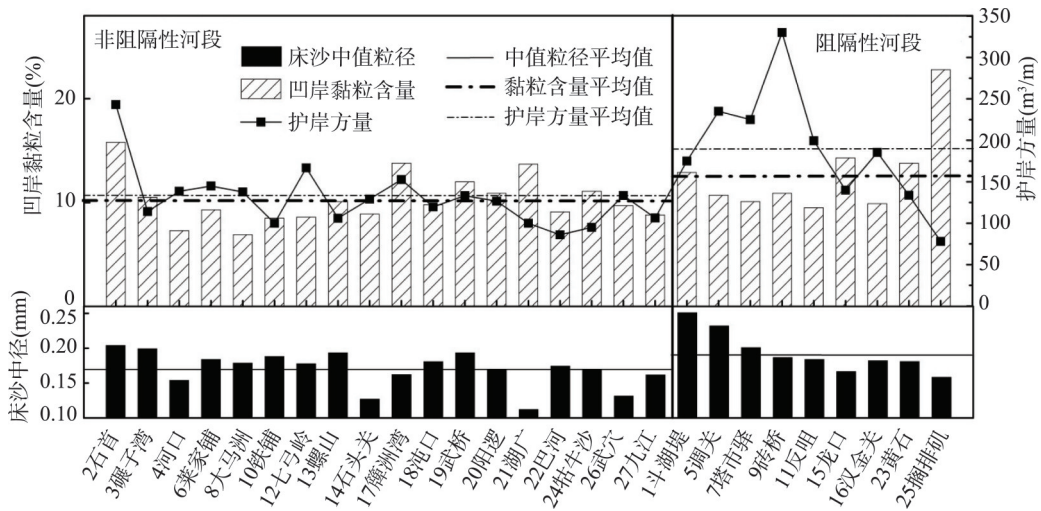


图3 长江中游单一河段凹岸黏粒含量、床沙中值粒径

Fig. 3 The riverbank clay content and the median diameter of the bed sediment of the single-thread reaches in the middle reaches of the Yangtze River

岸抗冲性较强,才能防止崩岸的发生及河道的展宽^[16-17],本河段方可保持自身河势稳定,从而维持微弯窄深的断面形态,约束水流动力轴线摆动;只有床沙较粗、抗冲性较强、动床阻力较大,本河段的河床形态才难以改变^[18],水流动力轴线难以大幅度摆动。因此,凹岸黏粒含量高于9.5%、床沙中径大于0.158 mm,也是形成阻隔性河段的控制要素之一。值得指出的是,阻隔性河段的护岸方量平均值为189.1 m³/m,非阻隔性河段仅有126.9 m³/m,阻隔性河段中河岸天然地质条件相对薄弱的调关、塔市驿、砖桥、反咀等河段,护岸方量均较大,从而保证了阻隔性河段的河岸具有较强抗冲性。

4 阻隔性河段作用机理分析

研究表明^[7],河势调整向下游传递的实质是主流平面位置的变化向下游传递。上述分析表明,只有单一微弯河段才可能具有阻隔性,而水流动力轴线弯曲半径能较好反应天然河湾的主流平面位置,主流摆动可通过弯曲半径变化反映出来,因此,本节从推导水流动力轴线弯曲半径入手,分析上述各控制要素对阻隔性的作用,剖析阻隔性河段作用机理。

4.1 河湾水流动力轴线弯曲半径公式推导

(1) 公式推导

三维水流运动方程Navier-Stokes方程可表示为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) \quad (1)$$

忽略紊动扩散项及非恒定项,底部床面阻力项采用 $\frac{gn^2}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$ 表示,沿水深积分后平均,可得用极坐标表示河湾二维恒定流动量方程:

$$\frac{u}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} + v \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{uv}{R} = -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial p}{\partial \phi} + gJ_\phi - \frac{gn^2}{h^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

式中: φ 、 R 分别为河湾的弯曲度 (以弧度表示) 和垂线所在位置的弯曲半径; u 、 v 分别为 (φ, R) 处的垂线平均流速; J_φ 为河道纵向比降; h 为垂线水深; p 为动水压强; g 为重力加速度; ρ 为水体的密度。将曼宁公式和谢才系数 C 带入底部床面阻力项之中得到:

$$\frac{gn^2}{h^{4/3}}u\sqrt{u^2+v^2} = \frac{gu^2}{hC^2} \quad (3)$$

考虑到横向流速远小于纵向流速, 忽略带有 v 的项, 同时动水压强是由岸壁切应力产生, 因此 p 可表示为岸壁切应力 τ (单位为 N/m^3) 沿水深方向的积分形式, $p = -\int_{z=0}^{z=\zeta} \tau dz = -\tau h$, 式 (3) 可转化为:

$$\frac{1}{2Rg} \frac{\partial u^2}{\partial \varphi} = \frac{1}{\rho g R} \frac{\partial(\tau h)}{\partial \varphi} + J_\varphi - \frac{u^2}{hC^2} \quad (4)$$

Yin 等^[19]研究得出河床糙率与粗化层的下限粒径 d 关系为: $n = d^{1/6}/21 = 0.048d^{1/6}$, 结合谢才系数 $C = \frac{1}{n}h^{1/6}$, 可得 $C = 21\left(\frac{h}{d}\right)^{1/6}$ 。Xu^[20]曾根据 I.S.Dunn 的 16 组试验资料建立了河床临界冲刷切应力 τ_c 与床面泥沙中的黏粒含量 M_0 的关系式, $\tau_c = 0.254M_0^{0.99}$, 两者基本呈正比。Lane^[21]研究发现近岸水流切应力接近于河床切应力的 0.76 倍, 因此岸壁水流切应力为 $\tau = 0.193M^{0.99}$, M 为河岸黏粒含量。将上述成果带入式 (4), 可得:

$$\frac{1}{2Rg} \frac{\partial u^2}{\partial \varphi} = \frac{1}{\rho g R} \frac{\partial(0.193M^{0.99}h)}{\partial \varphi} + J_\varphi - \frac{u^2 d^{1/3}}{441h^{4/3}} \quad (5)$$

对式 (5) 按一阶常微分方程求解得到 u^2 , 同时假设弯道中一定流程内各水力要素沿程变化不大, 弯道进口段垂线平均流速近似为 $U = \frac{Q}{\left(Rh \ln \frac{R_2}{R_1}\right)^{[22]}}$, 多数情况下河宽 B 小

于 R_* , 因此 $\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{B}{R_*}$, $u = \frac{R_* Q}{RBh} \Big|_{\varphi=0}$, R_* 为河湾曲率半径, u 可被表示为:

$$u = \sqrt{NS + \left(\left(\frac{R_* Q}{RBh}\right)^2 - NS\right)e^{-\frac{2Rg d^{1/3} \varphi}{441h^{4/3}}}}, \quad N = J + \frac{0.193M^{0.99}h}{gR\rho}, \quad S = \frac{441h^{4/3}}{d^{1/3}} \quad (6)$$

式中: 考虑在同一断面中, 水流动力轴线所在处的流速、河道纵比降、水深最大, $\frac{\partial u}{\partial R} = 0$, $\frac{\partial J}{\partial R} \Big|_{R=R_0} = 0$, $\frac{\partial h}{\partial R} \Big|_{R=R_0} = 0$, 并引入河相系数 $\zeta = \sqrt{B}/h$, 则 $Bh = \zeta^2 h^3$, 将式 (6)

对 R 求导, 从而得到直接描述水流动力轴线弯曲半径变化规律的数学表达式:

$$\left(\frac{R_* Q}{\zeta^2 h_0^3}\right)^2 \frac{1}{R_0^3} + \left(\frac{R_* Q}{\zeta^2 h_0^3}\right)^2 \frac{1}{R_0^2} \frac{g\varphi d^{1/3}}{441h_0^{4/3}} - \frac{M' g\varphi d^{1/3}}{\rho h_0^{1/3}} - gJ_0 \varphi = 0, \quad M' = 0.0009M^{0.99} \quad (7)$$

根据式 (7) 可求解出水流动力轴线弯曲半径 R_0 表达式:

$$R_0 = \left[\frac{R_*^2 Q^2 \rho}{\varphi g \zeta^4 h_0^5 (\rho J h_0^{2/3} + M' d^{1/3})} \right]^{1/3} \quad (8)$$

长江中下游为大型冲积河道, 沿程有洞庭四水、鄱阳五河、汉江等支流入汇, 年内年际间流量变幅较大^[23], 因此在式 (8) 的基础上增设 $\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max}}$ 来表示流量变化幅度对

动力轴线弯曲半径的影响。另外,挑流节点突出于岸线的相对长度越长、对河宽束窄程度越大,节点挑流能力越强,越能促进动力轴线摆动^[10],因此可用 $\lambda = \frac{B_{\text{平滩}} - L_{\text{节点}}}{B_{\text{平滩}}}$ 来表示节点挑流作用强弱。对同一个节点而言,挑流作用的强弱随流量大小变化,不同流量下,节点挑流强度也不同^[1-2], λ 越小,节点对来流变化越为敏感,因此取 $1/\lambda$ 作为流量变幅的系数。结合长江中下游实际情况,考虑流量变幅及节点挑流作用后水流动力轴线弯曲半径公式可表达为:

$$R_0 = \left[\frac{R_*^2 \left(Q \times \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\lambda Q_{\max}} \right)^2 \rho}{\phi g \zeta^{-4\lambda} h_0^5 (\rho J h_0^{2/3} + M' d^{1/3})} \right]^{1/3} \quad (9)$$

式中: Q_{\max} 、 Q_{\min} 分别为河段历年最大、最小流量; $B_{\text{平滩}}$ 为河段典型断面平滩河宽; $L_{\text{节点}}$ 为节点突出于平顺岸线的长度。需要说明的是,式(9)尽管从NS方程出发进行推导,但在推导过程中引用了经验公式,因此式(9)为半经验半理论公式。

(2) 公式合理性分析

已有众多学者^[8, 24-25]对河湾水流动力轴线弯曲半径公式进行了大量研究,并提出了诸多半经验半理论或者经验性公式,这些公式均认为水流动力轴线弯曲半径与流量大小呈正相关,这与河湾“大水趋直、小水坐弯”的一般规律性认识是一致的。从式(9)可以看出,本次推导的水流动力轴线弯曲半径公式也与流量大小呈正相关,与已有研究成果及认识一致。

同时,已有研究^[1-2, 4, 7, 9-10]也逐渐认识到进口节点挑流在河床演变中的重要作用,基于此,式(9)考虑了节点挑流作用,这是与已有研究成果主要的不同之处。为验证式(9)的合理性,采用式(9)及已有公式,计算牯牛沙河段不同流量不同断面的水动力轴线弯曲半径,并与实测值进行比较(图4,表2)。可以看出,式(9)与实测值更符合,表明式(9)更适用于牯牛沙这类进口存在挑流节点的河段的水流动力轴线弯曲半径计算。

4.2 阻隔性河段作用机理分析

(1) 各控制要素对阻隔性河段作用机理

式(9)可以写成:

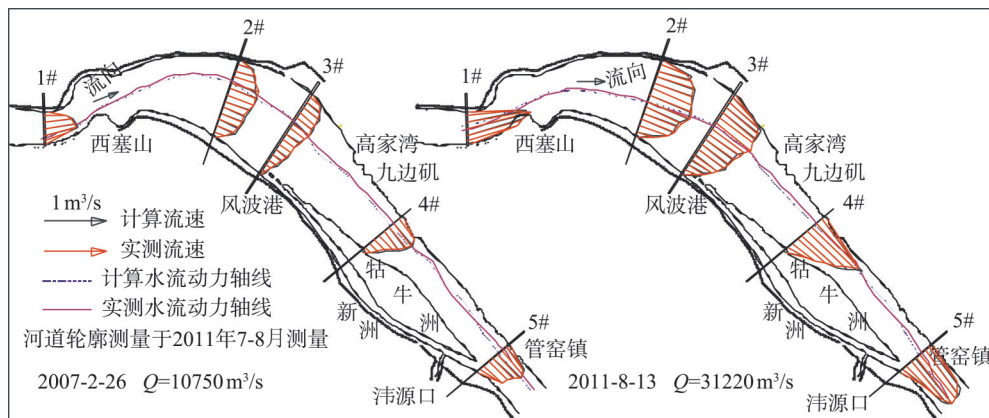


图4 式(9)计算的牯牛沙河段水流动力轴线验证

Fig. 4 The verification of the flow dynamic axis calculated by Eq.9 in the Guniusha Reach

表2 牯牛沙河段公式计算结果与实测值对比表

Tab. 2 The comparison of the formula results with the measured values in the Guniusha Reach

弯曲半径计算公式(m)		流量(m³/s)					
		1#	1#	2#	2#	2'#	2'#
		Q=10750	Q=31220	Q=10750	Q=31220	Q=10750	Q=31220
实测值		2530	2900	2820	3940	3090	3750
欧阳履泰 ^[7]	$R_0 = 48.1(QJ^{1/2})^{0.83}$	2390	3771	2390	3771	2390	3771
张敬笃 ^[23]	$R_0 = 0.26R_*^{0.73}(\sqrt{B}/h)^{0.73}(Qh^{2/3}J^{1/2})^{0.23}$	851	890	1549	1919	1814	2246
张植堂 ^[24]	$R_0 = \left[(R_*Q/A)^2 / (\varphi Jg) \right]^{1/3}$	2204	3597	2056	3531	2163	3446
本研究	式(9)	2498	2976	2782	3997	3133	3771

$$\frac{R_0}{R_*} = \frac{\left[\left(\frac{Q}{\sqrt{R_*}} \times \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\lambda Q_{\max}} \right)^2 \frac{\zeta^{(5-4\lambda)}}{\varphi} \right]^{1/3}}{\left[gB^{5/2} \left(Jh_0^{2/3} + \frac{M'd^{1/3}}{\rho} \right) \right]^{1/3}} \approx \frac{F_{\text{摆动力}}}{F_{\text{约束力}}} \quad (10)$$

式中： R_0/R_* 项体现了河湾曲率半径对水流动力轴线弯曲半径的约束作用，显然，该值越小，表明河湾曲率半径对水流动力轴线弯曲半径约束作用越大，主流相对摆幅越小，河段就越可能具有阻隔性。

若流量过程恒定，水流动力轴线平面位置将不会发生时空变化，也就不会出现河势调整，流量过程变化是促进动力轴线摆动的动力因子。3.1节分析表明，河段中上部存在挑流节点将加剧不同流量下动力轴线的摆动幅度；河湾弯曲度过小的顺直河段，河湾曲率半径与动力轴线弯曲半径差别较大而削弱了河湾对动力轴线的归顺作用^[8]；河相系数过大的宽浅断面，为动力轴线提供了较大摆动空间，滩槽高差较小也利于主流切滩。因此，流量过程、节点挑流、河湾弯曲度、河相系数均是促进动力轴线摆动的因素，式(10)中右边分子项能够表征水流动力轴线摆动力的作用。

3.1节分析表明，河道纵比降大，深槽处水流功率大，有利于刷深深槽^[26]；河岸物质组成中黏粒含量较多时，抗冲性较强而有利于塑造窄深断面，减小动力轴线的横向摆动空间；床沙较粗时，河床对水流侵蚀的抵抗力较强，也一定程度上减小动力轴线的摆幅。因此，河道纵比降、河岸及河床抗冲性等均是约束动力轴线摆动的因素，在式(10)右边分母项能够表征河道边界约束力的作用。

综上分析，式(10)右边项近似反映了水流动力轴线摆动力与河道边界条件约束力之间的对比关系，宏观上则表现为水流动力轴线弯曲半径与河湾曲率半径的对比，可见上述公式结构是基本合理的，第三节分析的各控制要素对水流动力轴线摆动的促进或者约束作用也是合理的。

为进一步分析不同控制要素对水流动力轴线摆动的影响程度，整理各控制要素变化范围如下：流量在4000~80000 m³/s之间，河湾曲率半径约在2000~16000 m之间，河相系数在0.8~6.7之间，节点突出岸线的相对长度在0.67~1.0之间，河段纵比降在0.4‰~8.2‰之间，床沙中值粒径在0.11~0.25 mm之间，凹岸岸坡黏粒含量在6.9%~22.8%之间。令任一控制要素在上述范围内相对变化，其他控制要素保持该范围的平均值不变，其余参数取各河段平均值，分析 $F_{\text{摆动力}}/F_{\text{约束力}}$ 对各控制要素变化的敏感度。

$F_{\text{摆动力}}/F_{\text{约束力}}$ 与 Q 、 R^* 的相对值成正比, 与 ζ 、 λ 、 M 、 J 、 d 的相对值成反比, 且相关关系曲线斜率的绝对值呈 “ $Q > \zeta > R^* > \lambda > M > J > d$ ” 的变化规律 (图5)。首先, 流量变化是导致主流摆动的根本动因; 只有窄深型断面才具有较大的约束力来限制主流摆动, 这是阻隔性河段形成的根本要素。其次, 平面形态单一微弯且中上部无挑流节点, 才能形成与水流相互适应的河道断面, 归顺主流摆动; 也只有河岸抗冲性较强的河段, 才能长期维持窄深型断面; 再次, 河床纵比降和床沙中值粒径较大, 有利于集中水流于深槽下泄, 减弱主流线横向侧移。因此, 上述6个控制要素归根结底是形成窄深型断面以约束主流摆动, 虽然重要性有区别, 但均必不可少。

(2) 主流摆动力与边界约束力的比值决定河段阻隔性

根据式 (10), 计算表1中34个河段 $F_{\text{摆动力}}/F_{\text{约束力}}$ 随流量变化之间的关系 (图6)。从图6中可以看出, 各河段水流动力轴线摆动力与河道边界约束力的比值均随着流量的增加而增大。结合表1可以看出, 具有阻隔性的斗湖堤、调关、塔市驿、砖桥、反咀、龙口、汉金关、黄石、搁排矶、上下三号一马垱、马垱一东流、安庆一太子矶等12个河段的摆动力与约束力的比值始终小于1, 说明在不同流量下, 其河道约束力均大于主流摆动力, 从而能够有效约束动力轴线摆动, 因此具有阻隔性; 非阻隔性河段, 流量超过一定数值后, 河道约束力开始小于主流摆动力, 无法有效约束主流, 主流能够发生较大幅度的摆动, 因此不具有阻隔性。

综上, 阻隔性河段作用机理在于: 在不同流量级下, 河道约束力始终大于主流摆动力, 即便上游河势发生明显调整, 入流方向发生大幅度变化, 但本河段的河道边界始终能够约束动力轴线的平面位置, 从而削弱上游河势变化后主流摆动幅度, 归顺上游不同河势条件下的主流平面位置, 为下游河道提供了相对稳定的入流条件。第3节分析的阻隔性河段在平面、横断面、纵剖面、河岸及河床抗冲性方面的要素, 正是河道约束力大于主流摆动力的必要条件。不满足上述一个或多个条件的河道, 随着入流方向或流量变化, 河道约束力未能始终大于主流摆动力, 主流平面位置将发生较大变化, 河势随之调整, 也就不具有阻隔性。

5 结论

以长江中下游34个单一河段为研究对象, 在判别各河段是否具有阻隔性的基础上, 对比分析了阻隔性控制要素, 推导了水流动力轴线弯曲半径计算式, 分析了各控制要素对阻隔性河段的作用机理, 主要结论如下:

(1) 阻隔性河段形成的控制要素包括: 河道具有单一微弯的平面形态、中上部无挑流节点; 河相系数小于4; 河道纵比降大于1.2‰; 凹岸黏粒含量高于9.5%、床沙中值粒

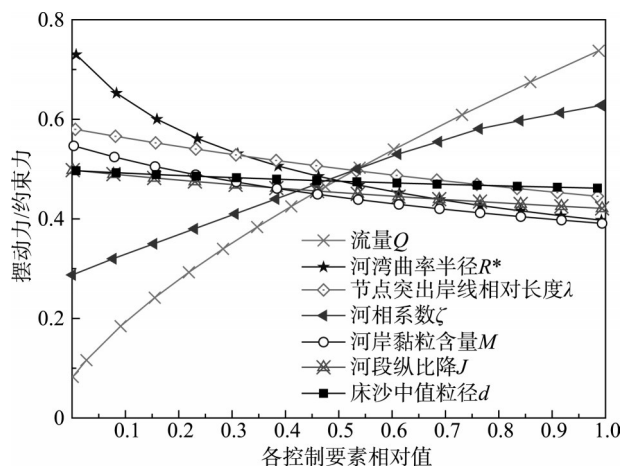


图5 各控制要素对河段阻隔性影响的敏感度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of the influences of various control factors on the barrier river reaches

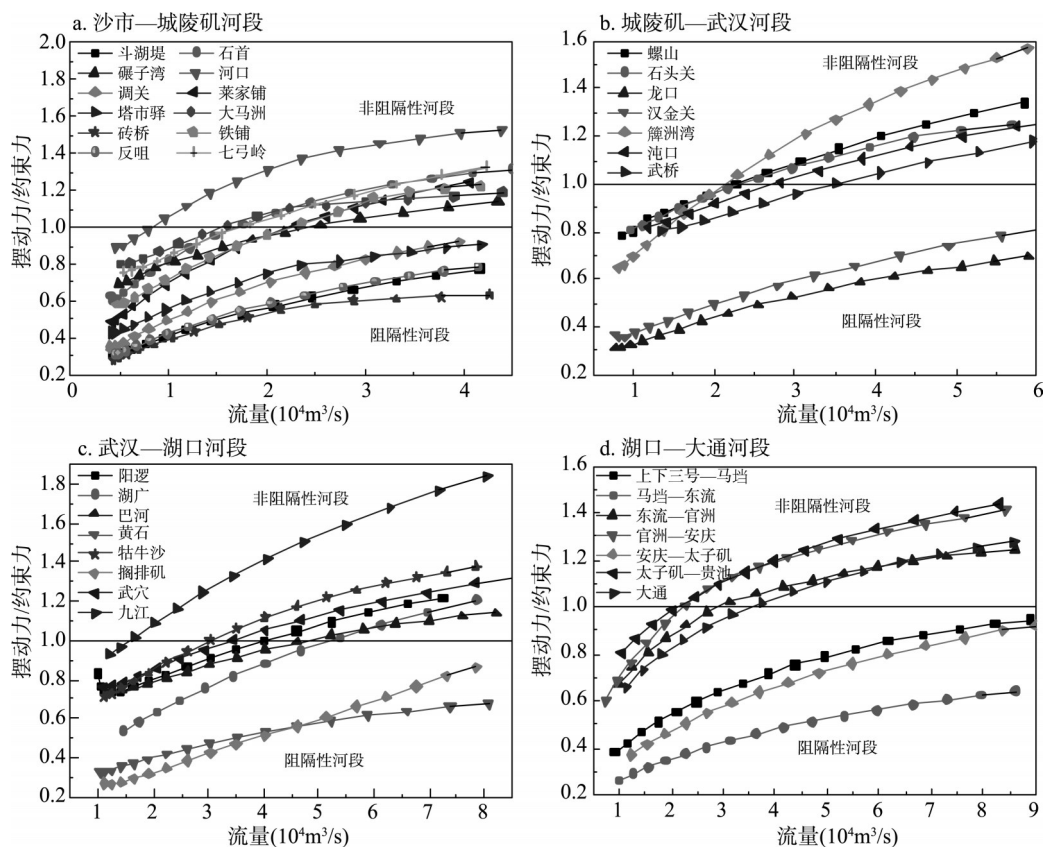


图6 长江中下游单一河段水流动力轴线摆动力与河道边界约束力的比值

Fig. 6 The ratio of the migration force of the flow dynamic axis to the confining force of the channel boundary in the middle and lower reaches of the Yangtze River

径大于0.158 mm等。

(2) 阻隔性河段的作用机理在于, 不同流量级下, 河道边界约束力始终大于水流动力轴线摆动力, 即便上游河势发生调整, 本河段的河道边界始终能约束主流的摆动幅度, 从而归顺上游不同流量级及不同河势条件下的主流平面位置, 为下游河道提供了相对稳定的入流条件。

参考文献(References)

- [1] Liu Ya, Wang Fei, Li Yitian. Objective river pattern of waterway regulation of goose-head-shaped anabranching channel in the Middle and Lower Yangtze River. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 443-451. [刘亚, 汪飞, 李义天. 长江中下游鹅头型汉道航道整治目标河型研究. 水利学报, 2015, 46(4): 443-451.]
- [2] Li Yitian, Tang Jinwu, Zhu Lingling, et al. Evolution and Waterway Regulation of the Middle and Lower Yangtze River. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2012. [李义天, 唐金武, 朱玲玲, 等. 长江中下游河道演变与航道整治. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [3] Liu Lin, Huang Chengtao, Li Ming, et al. Periodic evolution mechanism of staggered beach in typical straight reach of the Middle Yangtze River. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 445-456. [刘林, 黄成涛, 李明, 等. 长江中游典型顺直河段交错边滩复归性演变机理. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(3): 445-456.]
- [4] Luo Haichao. Characteristics of fluvial processes and stability of the braided channel in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(6): 10-19. [罗海超. 长江中下游分汉河道的演变特点及稳定性. 水利学报, 1989(6): 10-19.]

- [5] Tang Jinwu, You Xingying, Hou Weiguo, et al. Fluvial processes trend of Ma'anshan reach in Lower Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2015(1): 30-35. [唐金武, 由星莹, 侯卫国, 等. 长江下游马鞍山河段演变趋势分析. 泥沙研究, 2015(1): 30-35.]
- [6] Sun Zhaohua, Feng Qiufen, Han Jianqiao, et al. Fluvial processes of sandbars in the junction reach of single-threaded channel to anabranching channel and its impact on navigation: A case study of the Tianxingzhou Reach of the Yangtze River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(4): 647-655. [孙昭华, 冯秋芬, 韩剑桥, 等. 顺直河型与分汊河型交界段洲滩演变及其对航道条件影响: 以长江天兴洲河段为例. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 647-655.]
- [7] You Xingying, Tang Jinwu, Zhang Xiaofeng, et al. Preliminary study on the characteristics and origin of barrier river reach in the Middle and Lower Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(4): 545-551. [由星莹, 唐金武, 张小峰, 等. 长江中下游阻隔性河段特征及成因初步研究. 水利学报, 2016, 47(4): 545-551.]
- [8] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. *Fluvial Process*. Beijing: Science Press, 1987. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [9] Leng Kui. The evolution analysis of Chengluo Reach at the Middle Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 1993 (3): 109-116. [冷魁. 长江中游城螺河段河床演变分析. 泥沙研究, 1993(3): 109-116.]
- [10] Yu Wenchou. Action of nodes of the braided channel at the Lower Yangtze River in the fluvial processes. *Journal of Sediment Research*, 1987, 12(4): 14-23. [余文畴. 长江下游分汊河道节点在河床演变中的作用. 泥沙研究, 1987, 12(4): 14-23.]
- [11] Song Xiaolong, Xu Guoqiang, Bai Yuchuan, et al. Experiments on the short-term development of sine-generated meandering rivers. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2016(11): 42-58.
- [12] Ramos, Judith, Gracia, et al. Spatial-temporal fluvial morphology analysis in the Quelite River: Its impact on communication systems. *Journal of Hydrology*, 2012, 49(3): 432-433.
- [13] Clerici A, Perego S, Chelli A, et al. Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1106-1122.
- [14] Regalla C, Kirby E, Fisher D, et al. Active forearc shortening in Tohoku, Japan: Constraints on fault geometry from erosion rates and fluvial longitudinal profiles. *Geomorphology*, 2013, 195(4): 84-98.
- [15] Julian J P, Torres R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 193-206.
- [16] Bandyopadhyay S, Ghosh K, De S K. A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India. *Geomorphology*, 2014, 224(224): 111-121.
- [17] Langendoen E J, Mendoza A, Abad J D, et al. Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks. *Advances in Water Resources*, 2015, 93: 4-14.
- [18] Wohl E. Particle dynamics: The continuum of bedrock to alluvial river segments. *Geomorphology*, 2015, 241: 192-208.
- [19] Yin Xueliang. A preliminary study on the formation cause of the bend river and the experiment of making riverbed. *Journal of Geographical Sciences*, 1965, 31(4): 287-303.
- [20] Xu Jiongxin. Study of sedimentation zones in a large sand-bed braided river: An example from the Hanjiang River of China. *Geomorphology*, 1997, 21(2): 153-165.
- [21] Lane E W. Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1955.
- [22] Розовский. и. л. движение воды на повороте открытого русла. 1957.
- [23] Xia Junqiang, Deng Shanshan, Lu Jinyou, et al. Channel adjustments in the Jingjiang Reach of the Middle Yangtze River. *Scientific Reports*, 2016, 6.
- [24] Zhang Dujing, Sun Hanzhen. A preliminary study on the effect of the changes of the hydraulic conditions in bends on the river pattern of the upper and lower Jingjiang stretches of the Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 1983, 3 (1): 14-24. [张笃敬, 孙汉珍. 弯道水力条件的变化对形成上下荆江河型影响的探讨. 泥沙研究, 1983, 3(1): 14-24.]
- [25] Zhang Zhitang, Lin Wanquan, Shen Yongjian. An approach on the main current belt of stream flow in river bend. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1984(1): 47-56. [张植堂, 林万泉, 沈勇健. 天然河湾水流动力轴线的研究. 长江科学院院报, 1984(1): 47-56.]
- [26] Bawa N, Jain V, Shekhar S, et al. Controls on morphological variability and role of stream power distribution pattern, Yamuna River, western India. *Geomorphology*, 2014, 227: 60-72.

Mechanism of barrier river reaches in the middle and lower reaches of the Yangtze River

YOU Xingying^{1,2}, TANG Jinwu³, ZHANG Xiaofeng¹, YANG Yunping⁴,
WENG Zhaohui², SUN Zhaohua¹

(1. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China; 3. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430012, China; 4. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The channel in the middle and lower reaches of the Yangtze River is characterized by staggered distribution of the bifurcated channel and the single-thread channel. The amplitude of change of river regime is stronger in a bifurcated channel than in a single-thread channel. The adjustment of the river regime in the upper reaches usually propagates to the lower reaches through the migration of the main stream line and causes the riverbed evolution of the lower reaches. Whether the adjustment of the river regime in the bifurcated channel can pass through a single-thread channel and propagate to the lower reaches will affect the stability of the overall river regime. Studies show that the barrier river reach can block the upstream channel adjustment from propagating to the lower reaches; therefore, it plays a key role in stabilizing the river regime. This study investigates 34 single-thread channel reaches in the middle and lower reaches of the Yangtze River. On the basis of the systematic summary of the regularities of riverbed evolution in the middle and lower Yangtze River, the control factors of barrier river reach are summarized and extracted: the planar morphology of single-thread and meandering; no flow deflecting node in the upper or middle part of the river reach; the hydraulic geometric coefficient is less than 4; the longitudinal gradient is greater than 1.2‰; the clay content of the concave bank is greater than 9.5%; the median diameter of the bed sediment is greater than 0.158 mm. Derived from the Navier-Stokes equation, the calculation formula of the bending radius of flow dynamic axis is deduced, and then the roles of these control factors in restricting the migration of the flow dynamic axis and shaping the barrier river reach are analyzed. The barrier river reach is considered as such when the ratio of the migration force of the flow dynamic axis to the constraining force of the channel boundary is less than 1 at different flow levels. The mechanism of the barrier river reach is such that even when the upstream river regime is adjusted, the channel boundary of this reach can constrain the migratory amplitude of the main stream line and centralize the planar position of the main stream line under different upstream river regime conditions, providing relatively stable incoming flow conditions for the lower reaches, thereby blocking the adjustment of upstream river regime from propagating to the lower reaches.

Keywords: barrier river reaches; flow dynamic axis; channel boundary; the middle and lower reaches of the Yangtze River