

长江中游武汉-湖口段鹅头洲演化动力学分析

黄蔚¹, 江俊杰², 李长安³

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北 武汉 430074; 2. 江西省地质调查研究院,江西 南昌 330000; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院,湖北 武汉 430074)

摘要:为了探讨长江中游武汉-湖口河段鹅头洲河道的形成及演化规律,运用地球动力学方法进行了河演分析。结果表明,鹅头洲河道弯头上游段微元体所受的弯道离心力与掀斜抬升力和科氏力作用方向相反,相互消减,减弱了河流向左岸的侵蚀作用强度;在弯头下游段,3 种力相互叠加,加强了向右岸的侵蚀作用,使鹅头洲河道上游弯道长且宽,下游弯道短,且呈窄的鹅头形状,鹅头顶端始终指向抬升作用一侧。

关键词:河道演化;科氏力;鹅头洲河道;长江

中图法分类号:TV85 文献标志码:A DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.005

1 鹅头洲河道基本特点

鹅头洲河道是长江中下游分汊河型中的一种特殊形式。区内有九江、官洲、铁板洲、紫沙洲和黑沙洲 5 个鹅头洲河段,其共同特点是:① 呈上游弯道长、下游弯道短的鹅头形状;② 上游弯道宽、下游弯道窄;③ 鹅头顶端均指向左岸,即鹅头顶端指向区域抬升作用的北西一侧;④ 右岸为山矾控制,左岸为松散冲积物的边界;⑤ 区内鹅头洲形成的时间一般都较早;⑥ 遥感分析表明,在现今鹅头洲河道的左岸,还有更老的古鹅头洲残迹。这说明鹅头洲河道是在特定河势和边界条件下形成的,其演变具有周期性交替特性,一个周期至少数十年或数百年^[1-7]。

2 鹅头洲演化的动力学分析

2.1 科氏力

长江中游河道呈“W”形,总体走向为近东西向,但局部走向为北东、北西向,水流受到科氏力作用后,主要是通过横向涡流使河流产生侧向侵蚀,导致河流横断面的形态变化。

2.1.1 横向涡流

横向作用力对水流作用产生横向环流^[8],其速度

分布可描述为

$$w = hv \left\{ -2 \left[\int_0^\eta \ln \frac{\eta}{1-\eta} d\eta + 1 \right] - g^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^\eta \ln^2 \frac{\eta}{1-\eta} d\eta - 2 \right) \frac{1}{ck} \right\} \frac{1}{k^2 r} \quad (1)$$

式中, w 为横向速度; h 水深; v 为纵向平均速度; k 为卡门系数; r 为所在点的曲率半径; η 为相对深度; c 为谢才系数。

科氏加速度等效于弯道的向心加速度,横向速度 w 分布为

$$w = 2h\omega v \sin\varphi \left[-2 \left(\int_0^\eta \ln \frac{\eta}{1-\eta} d\eta + 1 \right) - g^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^\eta \ln^2 \frac{\eta}{1-\eta} d\eta - 2 \right) \frac{1}{ck} \right] \frac{1}{k^2} \quad (2)$$

由科氏力产生的横向涡流在上层横向流速的方向偏向河流右岸,在底层河流的方向偏向左岸,且在河流底层涡流现象最为明显。当 $\frac{\rho w^2}{(\rho_s - \rho) g_d}$ 在 0.03 ~ 0.06 之间时启动,长江水文特征表明^[9],科氏力所产生的横向流速可以使泥沙启动。

2.1.2 河道断面变化

河道的变化满足方程

$$\frac{\partial(H-h)}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial qbs}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rqbn)}{\partial n} \right] = 0 \quad (3)$$

在河流冲淤达到平衡时,则满足 $\frac{\partial(H-h)}{\partial t} = 0$ 。

因此,科氏力产生的横向流速达到输沙平衡时满足

$$2\omega \sin\left(\frac{\varphi}{v}\right) \frac{\partial(rqbn)}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得到在科氏力作用下的河道横断面形态方程应满足

$$H-h = k \sin(k_1 n + k_2 v + k_3) \quad (5)$$

式中, k, k_1, k_2, k_3 均为常数。

由河床所受剪应力 $\tau = v_{\max} - v/1n \frac{y_1}{y_2}$ 可知^[10],两岸剪应力的大小与深泓线距离的对数成比例,从而导致河流冲刷不对称分布,使长江深泓线向右岸迁移。

2.2 构造掀斜作用力

研究区北西侧为大别山抬升区。这种抬升作用表现为掀斜抬升。北侧的大别山隆起以每年 2~3 mm 的速率抬升,南侧的下扬子凹陷区以每年 1.8 mm 的速率沉降^[5-6],北抬南降的长期掀斜抬升作用,可能是促使长江右摆的主要原因。江西省地震局九江地震台的地形变监测成果表明,该地区的地形变作用为北(西)上升,南(东)沉降。1991~2000 年该地区的地形在周期性的南(东)-北(西)摆动,总体上是南(东)沉降北(西)抬升(图 1)。这种掀斜抬升作用是该江段河道演化的重要地球动力学作用机制,而短周期的南(东)-北(西)摆动作用,使河道中水流的造床造岸作用更加强烈。

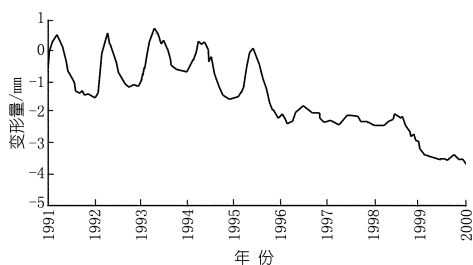


图 1 九江地区地形变监测结果

不对称的构造掀斜作用使地面有差异性的升降,造成河床倾斜,破坏河流稳定,促使河道变迁。

(1) 抬升侧水位下降。如图 2 所示, S 表示箕状断陷的陡坡, L 表示缓坡, X 表示河平面宽度, h 表示河心区水深, φ 表示缓坡倾角。断块发生掀斜时,河水流量不变,掀斜后掀斜面倾角(φ_2)将大于掀斜前的倾角(φ_1)。

由 $\frac{L_1^2}{L_2^2} = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1}$ 导出,当 $\varphi_2 > \varphi_1$ 时,必有 $L_2 < L_1$,

所以掀斜面的河流水位相对下降。

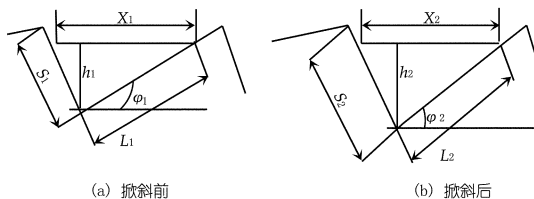


图 2 掀斜作用下河道计算

(2) 下降侧水位上升。由于 $S = \frac{h}{\cos \varphi}$, 当断块掀斜

时, $\cos \varphi$ 变小。同时, h 呈增大趋势,故 S 增大,即相对下降面发生河水水位上升。

(3) 河面变窄。由 $\frac{X_1^2}{X_2^2} = \frac{\sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1}$ 可知,当断块掀斜时, $\varphi_2 > \varphi_1$, 存在 $X_2 < X_1$, 即河宽变窄。

(4) 流速增大。由于流量不变, $Q = AU$, 在掀斜发生的地段,由于河面变窄,断面面积减小,流速将增大。

(5) 河道向相对下降的一侧迁移。由于不对称的构造掀斜作用而引起的河道横断面的变化特征是河流流速增大,河宽加大,从而导致河水对两岸的冲刷增强,两岸均呈现出后退趋势,河道总体向相对下降的河岸变迁。

2.3 弯道离心力

鹅头洲河道水流流动符合弯道水流特征,水流流过弯道时,受离心力作用,产生凹岸水位升高、凸岸水位降低现象,并在水压作用下,形成弯道横向环流。

将描述弯道水流的雷诺方程以柱坐标形式来表达,其简化方程为

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_\tau \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial^2 u_r}{r} = -gI_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z}$$

式中, r, θ 和 z 分别为流场中某点的柱坐标值; u_r, u_θ 和 u_z 分别为沿横向、纵向及垂直方向的分速度值; I_r 为横

比降; τ_r 为横向切应力, $\tau_r = \rho v_\tau \frac{\partial u_r}{\partial z}$, 其中, v_τ 为

Boussinesq 紊动运动黏滞系数。

(1) 弯道水流横向比降 I_r 。由于离心力的作用,自由水面平衡遭到破坏,形成了凹岸水位升高,凸岸水位降低,可以由运动方程求得横向比降^[11]

$$I_r = \left(1 + \frac{g}{C^2 k^2}\right) \frac{U^2}{gr} \quad (6)$$

式中, r 为流线曲率半径; U 为垂线平均流速,在靠近凹岸处较大而在凸岸附近较小。

(2) 弯道环流。简单的二元恒流可由动态的直角坐标下横向动力平衡条件得到,其横向流速分布表达式为^[8]

$$v = \frac{1}{k^2} U \frac{H}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{kC} F_2(\eta) \right] \quad (7)$$

$$\text{其中, } F_1(\eta) = \int_0^\eta \frac{21n\eta}{1-\eta} d\eta - 2,$$

$$F_2(\eta) = - \int_0^\eta \frac{1n^2\eta}{1-\eta} d\eta - 2.$$

由弯道水流中微元体受力分析可知,上层流体向凹岸流动,下层流体则流向凸岸,这样便在断面上形成了一个封闭的环流。这一环流与主流的纵向流速 U 叠加形成螺旋流。弯道环流的产生主要是由于离心力与因横比降造成微元体在横向上的压力差相互作用。环流强度的大小通常可由横向流速与纵向流速之比的绝对值来衡量。环流在弯顶附近充分发展后,将因沿程曲率减小而衰落,相应地可求得环流从充分发展直到衰亡所需的距离^[12]。

3 鹅头洲河道形成过程

由于科氏力、掀斜抬升和弯道离心力的综合作用,在不同的河段互为消长,形成了鹅头洲河道。水流中微元体受到水压力(P)、弯道离心力(F)、科氏力(f_1)和掀斜抬升力(f_2)的综合作用。在向北西凸出的弯道上游一侧,微元体所受的弯道离心力与掀斜抬升力、水压力和科氏力作用方向相反,相互消减,减弱了河流向左岸的侵蚀作用强度。在弯道的下游一侧,弯道离心力、掀斜抬升力与科氏力作用方向相同,相互叠加,加强了向右岸的侵蚀作用,见图 3(e-g)。这样形成了:①上游弯道长、下游弯道短的鹅头洲河道;②由于下游弯道中水流受科氏力、掀斜抬升力、弯道离心力的相互叠加作用,河段水流速度加快,在上下游流量相等的条件下,河道缩窄;③鹅头顶端始终指向抬升作用的一侧。

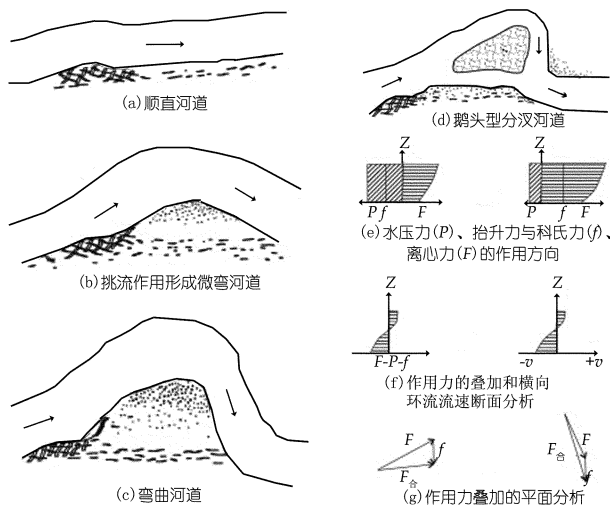


图 3 鹅头洲河道演化过程

河流演化过程中,随着冲刷作用的不断发展,抗侵蚀能力强的岩土体逐渐在边岸突出成为矾头,见图 3(a),在矾头的挑流作用下,河流产生向矾头下游对岸一侧的侧岸侵蚀,逐步形成了弯曲河道,见图 3(b)。边滩不断扩展,河道弯曲加大,横向环流作用也不断增强从而在凸岸中越靠近水边线处,其边滩堆积物高度越大,而在凸岸的远离水边线处形成了一低洼滩涂,见图 3(c),洪水期间,水流沿该低洼滩涂越流冲刷,形成了汉沟,并发展成为河道右汉,即形成鹅头洲河道,见图 3(d)。

4 结论

(1) 影响长江中游河道长周期演化发展的主导因素是地球动力学作用,主要包括掀斜作用力和科氏力。在大别山的掀斜抬升和科氏力作用下,长江中游河道长周期演化发展呈现由北向南迁移的趋势,这一趋势难以通过人工干预改变。古彭蠡泽原位于长江中游河道九江段以北地区,西汉后期逐渐消失,并相应在其南侧的鄱阳湖向南扩大,也是长江河道九江段由北向南迁移的表现。

(2) 影响长江中游短周期河道演化的主导因素是水流动力作用。矾头挑流作用使深泓线偏移,并产生微弯曲河道,从而形成弯道离心力,并进一步加强侧蚀作用。三峡工程运行后,对长江实现人工控洪,将使武汉-湖口河段存在一个下蚀作用加强的过程,导致矾头挑流作用进一步加剧;同时,控洪后将使可造成鹅头洲河道裁弯取直的特大洪水次数减少,河道曲率将进一步增大,鹅头洲河道将逐渐减少。

参考文献:

- [1] 李长安,张玉芬.中国主要水系贯通和洪灾形成的地质因素分析[J].大自然探索,1996,16(59):61-65.
- [2] 李长安.一次重要的第四纪构造运动及环境效应[J].地质科技情报,1999,18(4):42-46.
- [3] 李长安,杜耘,吴宜进,等.长江中游环境演化与防洪对策[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [4] 李长安.地文期、构造-气候耦合与地质灾害[J].地质前缘,1997,4(增2):204.
- [5] 李长安.桐柏-大别山掀斜隆升对长江中游环境的影响[J].地球科学,1998,23(6):562-566.
- [6] 李长安,张玉芬.大别山构造隆升及其环境效应[C]//1996年中国地球物理学会第十二届学术年会论文集,1996:228.
- [7] 刘广润,殷鸿福,陈国金,等.长江中游主要水患区环境地质调查评价报告[R].武汉:湖北省地质调查院,2003.
- [8] 罗索夫斯基.弯道水流的研究[J].泥沙研究,1958,3(1):83-95.
- [9] 李长安,殷鸿福,俞立中,等.长江流域泥沙特点及对流域环境的潜在影响[J].长江流域资源与环境,2000,9(4):504-509.
- [10] 倪晋仁,马蔼乃.河流动力地貌学[M].北京:北京大学出版社,

1998.

[12] Noh M A, Townsend R D. Shear - stress distribution in stable channel bends[J]. J. Hydr. Div., ASCE, 1979, 105(10): 1233 - 1245.

[11] 钱宁, 张仁, 周志德, 等. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社,

1983.

(编辑: 李 慧)

Dynamic analysis of braided channel evolution in middle reaches (from Wuhan to Hukou) of Yangtze River

HUANG Wei¹, JIANG Junjie², LI Chang'an³

(1. Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China; 3. School of Earth Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The formation and evolution of braided channel in middle Yangtze River reach (from Wuhan to Hukou) was investigated by the analysis method of Geodynamics. The results show that in the upstream of braided channel, the centrifugal force loaded on the micro - unit at the channel bend are in the opposite direction to tilted lift force and the Coriolis force, which counterbalances constantly and weakens the erosion effect towards the left bank; at the lower reaches, the above 3 forces are added together, which strengthens the erosion effect towards the right bank, forming the braided channel with long and wide bend channel at the upper reach and short bend channel at lower reach. So, the head of the braided channel directs to the side of the lift force.

Key words: Yangtze River; braided channel; river channel evolution; Coriolis force

(上接第 16 页)

Study on response of soil erosion and sediment yield to land use change by using ¹³⁷Cs tracing method: case of a small agricultural catchment (Banzhulin Catchment) in Three Gorges Reservoir region

JU Li¹, WEN Anbang², LONG Yi², YAN Dongchun², SHI Zhonglin²

(1. Sichuan Hydraulic Research Institute, Chengdu 610000, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The small watersheds are the primary source of incoming sediment for the Three Gorges Reservoir region, so the study on erosion and sediment yield of small watersheds is important to the accurate forecast of incoming sediment variation of Three Gorges Reservoir. A small and typical agricultural catchment (Banzhulin Catchment) was selected, the influence of land use change on the spatial distribution of sediment yield was researched by using ¹³⁷Cs tracing method. The results indicated that the soil erosion situation of the forestland and dry land transformed from paddy field changed little. The variation of soil erosion and sediment yield is small in short period after the land use change. The dry land is the main source of sediment yield and the paddy field is the sedimentation area.

Key words: ¹³⁷Cs tracing; Three Gorges Reservoir region; sediment yield; land use change

更 正

由于本刊的工作疏忽, 特对 2015 年第 21 期两篇论文作出如下更正。

《三峡水库蓄水期综合调度需求分析》一文的作者署名和基金项目应为: 陈炯宏^{1,2}, 徐涛³, 李长春³, 喻杉^{1,2}, 丁毅^{1,2} (1. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430010; 3. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 宜昌 443000)。基金项目: 国家大坝安全工程技术研究中心项目“防洪调度决策支持系统开发”(CX2013Z07 - 2); 三峡水库科学调度关键技术研究项目“基于水文预报的三峡水库蓄水调度方式研究”(2413020005)。特此更正。

《水库诱发地震数据采集器的设计与实现》一文的作者署名和基金项目应为: 刘文清^{1,2}, 宋伟^{1,2}, 徐新喜^{1,2} (1. 国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010; 2. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)。基金项目: 国家大坝安全工程技术研究中心项目“水库地震数据高速采集技术系统”(CX2014Z04)。特此更正。

《人民长江》杂志编辑部

2015 年 11 月 12 日