

基于 GIS 的黄河内蒙古段冰下河床三维 可视化方法与应用

王 祚, 李畅游, 冀鸿兰, 李 超

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为了揭示冰封期黄河河床的演变过程, 基于地理信息系统(GIS)技术, 研究了黄河内蒙古段冰下河床三维可视化分析方法。根据野外测量结果进行了河道地形剖析, 绘制了河床地形等值线图、矢量地形图及弯道典型断面; 在可视化过程中, 绘制了冰封期和畅流期河床的三维表面图及地貌晕渲图, 并对冰封期和畅流期河床冲淤变迁做了定量计算, 对冰盖流和明渠流两种条件下的河床空间进行了对比分析。结果表明: 运用 GIS 技术可以实现河床表面的三维建模和不同时期河床冲淤变化的定量计算, 及时反映出河道变迁过程, 准确计算河床冲淤量, 阐释冰封期泥沙与水流运动相互作用的机理。

关键词:冰下河床; 河床三维可视化; 冰封期; 河床冲淤变迁; 地理信息系统; 黄河内蒙古段

中图分类号:TV222.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)04-0080-05

Three-dimensional visualization method and its application on riverbed under ice of Yellow River in Inner Mongolia based on geographic information system//WANG Zuo, LI Changyou, JI Honglan, LI Chao(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to uncover the evolution process of Yellow River's riverbed in frozen period, we studied the analytical method of three-dimensional visualization on riverbed under ice of the Yellow River in Inner Mongolia based on geographic information system(GIS). According to the results of field experiments, we analyzed the river terrain and plotted the riverbed contour maps, the vector topographic maps, and the typical cross sections of curved reach. In the process of visualization, we plotted the three-dimensional surface maps and shade relief maps, and made a quantitative calculation of riverbed's scouring and silting changes in the frozen period and open period. Besides, we carried out a contrastive study of riverbed spatial under conditions of open channel flow and ice cover flow. The results showed that the GIS technology can be applied to the three-dimensional model-building of riverbed and the quantitative calculation of its scouring and silting changes at different times. It also can instantly reflect the change process of river channel, accurately calculate the scouring and silting volumes of riverbed, and explain the mechanism of interaction between sediment and flow movement in frozen period.

Key words: riverbed under ice; three-dimensional visualization of riverbed; frozen period; scouring and silting changes of riverbed; geographic information system(GIS); Yellow River in Inner Mongolia

三维地形可视化是一门研究数字地面模型的显示、简化、仿真等内容的学科^[1], 已越来越成为地理信息领域的研究热点, 在地形分析方面发挥着重要的作用, 广泛应用于地理信息的各个方面^[2]。目前, 地理信息系统(GIS)已被用于水下河床地形的可视化研究中, 如海岸、河流等水下地形的淤积与侵蚀表面积、体积的变化及空间分布均能通过 GIS 技术方便地实现^[3]。GIS 及可视化技术是研究河床演变规律的一种行之有效的方法, 可视化、形象化程度

较高^[4], 利用地形三维可视化技术能够直观而形象地表现水下河床地形地貌的形态特征与变化规律, 但 GIS 在冰盖下河床地形可视化分析中应用较少。本文利用 GIS 技术研究黄河内蒙古段冰下河床地形三维可视化方法及其应用。

1 黄河内蒙古段冰情特点

黄河内蒙古河段干流总长 823 km, 河道总落差仅 162.5 m; 从河道流向看, 内蒙古河段总体呈“几”

基金项目: 国家自然科学基金(51369017, 51339002); 内蒙古自治区自然科学基金(2013MS0719)

作者简介: 王祚(1987—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事工程水力学与水工模型试验研究。E-mail: wangzuoyff@sina.com

通信作者: 冀鸿兰(1970—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 主要从事河冰水力学及冰工程防灾减灾技术研究。E-mail: honglanji@sina.com

形大弯曲;从河道特征看,该河段总体上河宽坡缓,蜿蜒曲折,河道中浅滩弯道迭出^[5]。黄河也是世界上泥沙最多的河流,具有水少沙多、水沙异源的特点^[6]。

黄河内蒙古段位于黄河流域最北端,海拔高程在千米以上,冬半年被蒙古冷高压所控制,加之高空西北气流的引导,往往会受大陆冷空气南侵的影响,天气寒冷。由于河道是自南而北流向,纬度相差 4° 以上,因此气温在地域上存在上游高、下游低的差别,而且随时间的变化也呈现出入冬时下游降温比上游降温早的特点;初春回暖时,情况则相反^[7]。特殊的地理环境、纬度和气象条件组合,使得黄河内蒙古段几乎每年都发生凌汛现象,灾情频发。该河段的流凌封河通常是自下而上,解冻开河则是自上而下,十分容易形成冰塞和冰坝,因而防凌历来成为该河段各级防汛部门最重要的工作之一。

2 测区河道地形

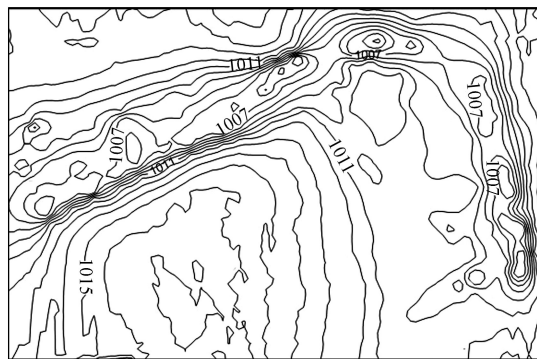
2.1 冰封期野外地形测量

2013年1月对黄河内蒙古段乌拉特前旗三湖河口进行了冰盖下三维地形测量,黄河内蒙古段河道轮廓如图1所示,测量区域与测量断面如图2所示,箭头方向代表流向。采用先进的GPS-RTK配合钻冰机以及声呐等多种仪器设备展开野外测量。以乌拉特前旗三湖河口水文站为中心在其上下游河段布设了38个测量断面。由于测量区域属于黄河较大的弯道,地形极为复杂,因此断面测量间距应适度加密,定为50~100m,顺直河段间距适当放宽。每个断面布控10~12个测点,对于较宽或较窄的河面可增加或减少测点,以满足精度要求。测量时首先

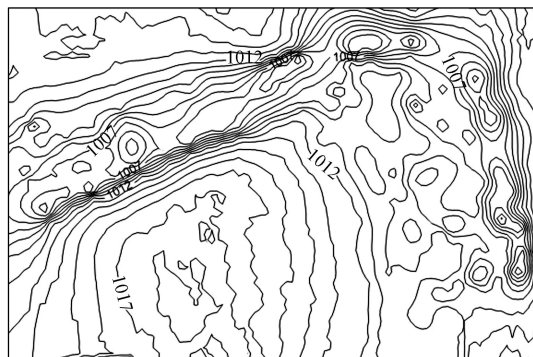
使用GPS-RTK测量冰面 x,y 坐标和高程,再用直角尺测量冰厚,同时用声呐探测水深,最终经过计算得到冰面、水面及河床的三维坐标。

2.2 地形等值线图

根据测区地形的三维坐标,利用Surfer软件绘制冰盖下河床地形等值线图如图3(a)所示,并与2013年8月畅流期情况进行对比(图3(b))。从图3可以看出,总体上,冰盖下河床地形等值线与明流时相比,变化趋势比较接近。



(a) 冰封期



(b) 畅流期

图3 河床地形等值线(单位:m)

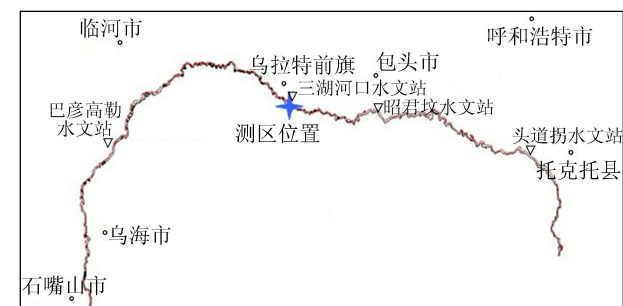


图1 黄河内蒙古段示意图

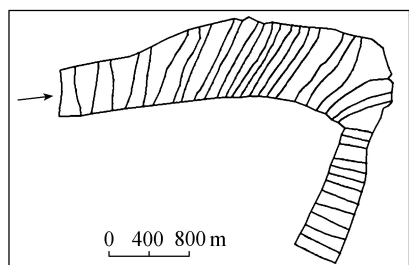


图2 三湖河口测量区域与测量断面示意图

2.3 冰下河床矢量地图

矢量地图是用小箭头表达的绘图方式,每个箭头的大小和方向都与其所在位置有关,箭头的方向表示局部的斜坡从高到低的方向,箭头的长短则表明局部斜坡的陡峭程度。根据测区地形的三维坐标,绘制冰盖下河床矢量地图如图4所示,由图4可知,冰封期研究区黄河三湖河口弯道地形的陡峭程

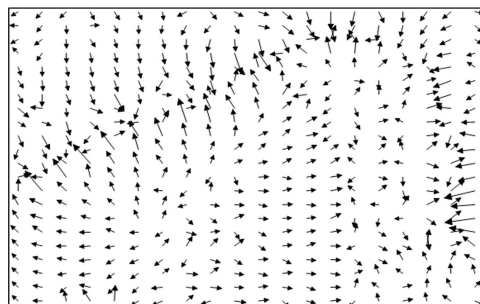


图4 冰下河床矢量地图

度明显高于两侧的河岸,并且深潭地形相比浅滩会更加陡峭。矢量地图可以展现出河床地形的陡峭程度,为进一步判断深泓线与主流方向提供了依据。

2.4 冰封期弯道断面特性分析

弯道水流是天然河流中一种很普遍的水流运动现象,会产生横向环流的作用,使得弯道中形成螺旋流,并表现为异常复杂的紊流^[8]。弯道螺旋流的存在,会使得弯道处泥沙运动特性表现出显著的不同。Tsai 等^[9]在对弯道冰盖下冲积河床床面横向坡度的研究中大致得出了以下结论:①冰盖出现后减小了环流强度;②河床横向坡度减小,凹岸床面会因淤积回升,凹岸冲刷有所缓解;③冰盖下有一对螺旋流。

选取三湖河口实测弯道冰下河床典型断面(图5)并与畅流期相同断面(图6)进行对比分析,可以发现,在冰封期,由于冰盖的存在减弱了弯道横向环流强度,使得凹岸床面有所抬升,冲刷现象减弱。

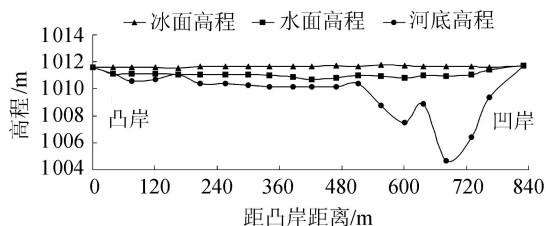


图5 冰下河床典型断面

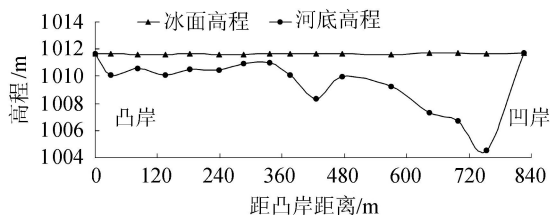


图6 明流河床典型断面

3 冰下河床可视化应用

以2013年1月内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗三湖口水文站附近实测弯道(图2)地形数据为例,进行冰下河床三维可视化应用分析,并与2013年8月畅流期情况作比较。

3.1 冰盖下河床三维可视化模型

a. 数据网格化。使用 Surfer 软件绘图,最核心的部分就是对数据进行网格化处理,即插值的计算。Surfer 提供了12种内插方法^[10],本文选择应用最多的克里金插值法进行网格划分^[3]。该方法按待插值点和相邻实际测得高程点的空间位置对待插值点高程做线性无偏最优估计,计算式为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中: $Z(x_i)$ 为在计算半径内全部参与内插点计算

的实测高程异常值; $Z(x_0)$ 为内插点的高程异常值; λ_i 为分配到每个实测高程点的权重。

b. 建立模型。根据网格化生成的数据,创建河床与冰盖表面三维可视化模型及真实地貌晕渲图如图7~12所示,其中图7~9中,灰色越浅表示高程值越大,越深表示高程值越小。由图7和图8比较可知,冰盖下河床表面与明流时相比,变化趋势十分相似,但夏季畅流期因河流强烈的紊动作用河床表面冲刷起伏的程度更大,箭头指向为水流前进方向。

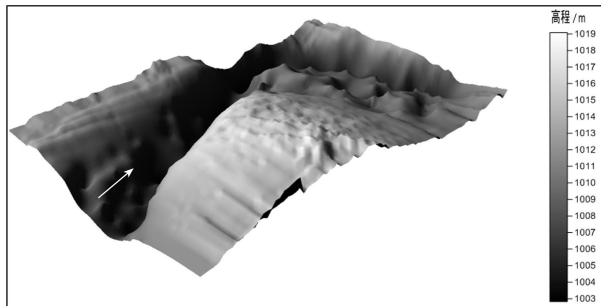


图7 冰下河床表面三维可视化模型

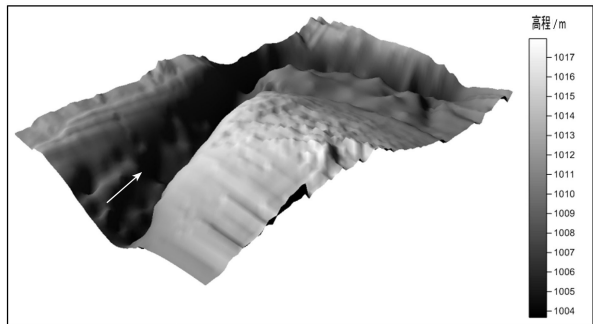


图8 明流河床表面三维可视化模型

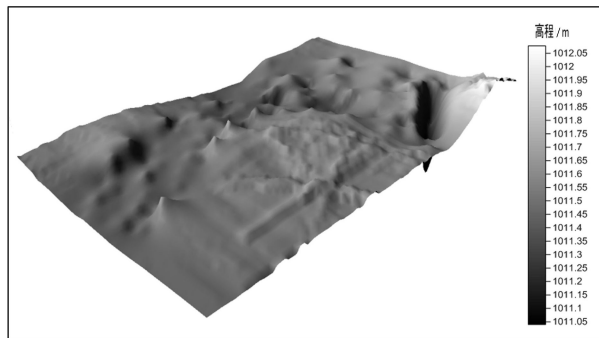


图9 冰盖表面三维可视化模型

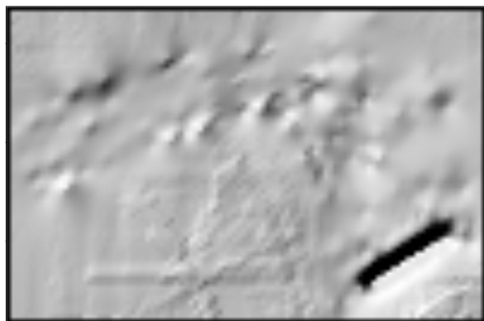


图10 冰盖表面真实地貌晕渲图

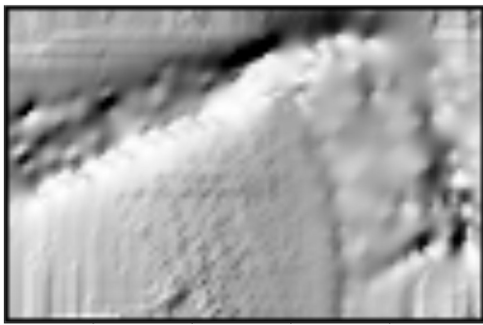


图 11 冰下河床真实地貌晕渲图

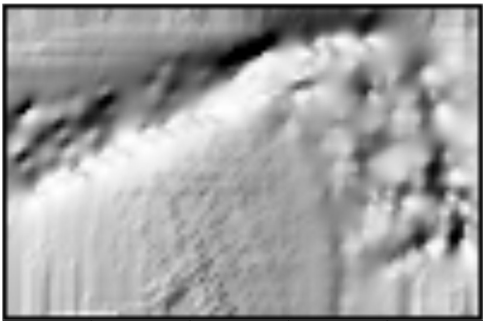


图 12 明流河床真实地貌晕渲图

河床表面三维立体图可以从整体上直观地呈现出测区河段弯道凹岸产生明显的冲刷现象,而凸岸则产生淤积。由图 11 和图 12 可清晰地看到黄河三湖河口弯道水流所流经的河床地貌形态。

3.2 冰封期与畅流期河床冲淤变迁

在水力因素和热力因素的共同作用下河流会形成冰盖,冰盖的形成改变了明渠河流的原有流速分布结构,同时也改变了河流的输沙特性。研究表明:在同样水位的情况下,如果河面上存在完整的冰盖,水流能量损失会较畅流期增加62%,过流能力会降低 29%^[11]。这将导致冰封期河流的输沙现象明显不同于畅流期,因而冰盖的形成会对河床的冲刷和淤积产生重大影响。

目前在河床演变分析中计算河床冲淤变化的两种常用方法为输沙量法和地形断面法^[12]。通常情况下各级水文站的多年实测水沙资料相当完备,因此在分析河床的冲淤状况时,输沙量法应用得非常多^[13]。如果河流地形的测量难度高、任务重,实测的河段及测量次数均较少,只有在洪水导致水沙发生重大改变的年份才实施测量,并且鲜有冰封期的地形测量,则可采用地形法计算不同测次间河床冲刷和淤积的体积。

输沙量法和地形断面法在计算河床冲淤变迁时都表现出一定的缺陷,即不能直观地显示河道冲淤的具体位置,虽然通过断面剖析和野外经验能够粗略地分析河道冲淤分布,但也只能提出类似“河道冲刷主要发生在河槽,淤积主要发生在高滩”等较

抽象的描述^[14]。鉴于这两种方法所存在的不足以及它们无法进行空间分析的局限,本文采用 GIS 法计算不同时期研究区域河床的冲淤体积和表面积变化,从而进行河床冲淤变迁分析。

由于测量区域冰封期形成了连续稳定的冰盖,冰盖的存在会使水位抬升,平均流速降低,同时冰封期河流输沙能力与环流强度也会降低不少,因此水流对河段的冲刷作用会减弱,淤积程度有所增大;而洪水期受降雨影响流量增大,平均流速与输沙率显著提高,弯道横向环流强度也明显加大,这些都加剧了河床的冲刷强度。图 13 和图 14 分别为冰封期和畅流期研究区实测流速及含沙量垂线分布对比图,可见畅流期流速和含沙量均大大超过冰封期。不同时期流速和输沙率的改变是造成冲淤变化的重要原因。

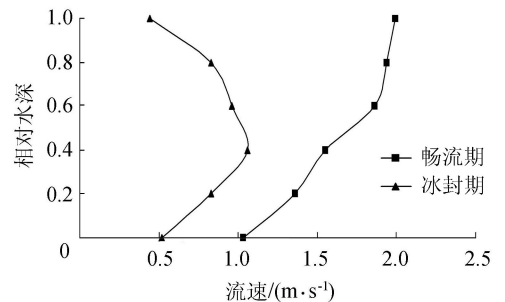


图 13 冰封期和畅流期流速垂线分布

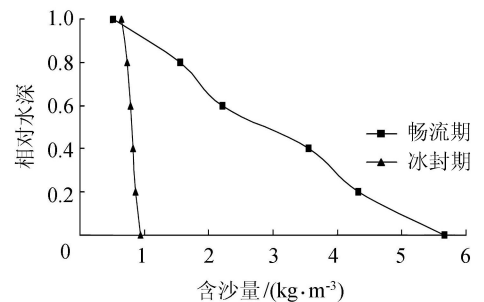


图 14 冰封期和畅流期含沙量垂线分布

由 GIS 法计算可知,从 2013 年 1 月冰封期至 2013 年 8 月夏季畅流期三湖河口弯道的冲刷体积为 980930.17 m³,淤积体积为 916585.88 m³,研究区总体上表现为冲刷,冲刷体积 64344.29 m³,畅流期冲刷的强度明显高于冰封期。将图 7 和图 8 两种三维可视化模型进行叠合分析即可得到冰封期到畅流期的冲淤等厚度三维立体图,如图 15 所示(图中厚度小于零表示冲刷,大于零表示淤积)。因而利用 GIS 法可以直观而准确地表示出从冰封期至夏季畅流期黄河内蒙古段三湖河口弯道河床所发生的冲淤变迁,若有较长河段多年的高精度地形资料就可以利用此方法进行河道演变的定量分析。

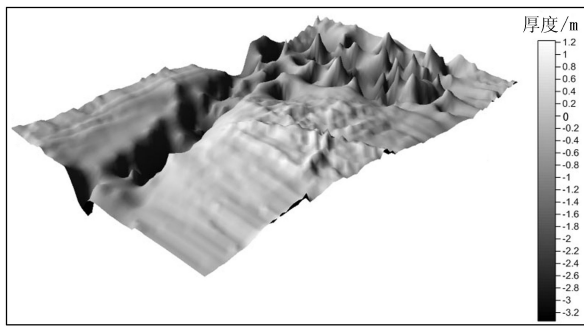


图 15 冲淤等厚度三维立体图

4 结 语

GIS 具有强大的三维建模与空间分析能力,利用 GIS 方法实现冰下河床三维可视化是一种有益的尝试,能够实现河床表面的三维可视化建模与真实地貌晕渲及不同时期河床冲淤变化的定量计算,结合多年实测的水沙资料则能更加直观、准确、科学地研究黄河内蒙古段的河道演变和冰情变化。利用 GIS 技术可以及时反映出河道变迁过程,准确计算河床冲刷和淤积量,揭示河冰过程与泥沙、水流运动相互作用的机理,为黄河河道整治和防凌防汛工作提供一定的技术支持。

参考文献:

[1] 吕秋灵,张俊霞. 三维地形可视化及其实时显示方法 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):85-87. (LU Qiuling, ZHANG Junxia. 3D-terrain visualization and real-time display techniques [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(4):85-87. (in Chinese))

[2] 伍莉,彭文. 长江航道水下地形三维可视化研究 [J]. 海洋测绘,2008,28(4):27-33. (WU Li, PENG Wen. Three dimensions visualization research in Changjiang waterway underwater terrain [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(4):27-33. (in Chinese))

[3] 白世彪. Surfer 软件在水下地形三维可视化与分析中的应用 [J]. 海洋测绘,2004,24(5):51-53. (BAI Shibiao. Application of surfer in the 3D-visualization and analysis of underwater topography [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(5):51-53. (in Chinese))

[4] 王艳姣,张鹰,陈荣. 基于 GIS 长江口北港河段冲淤变化的可视化分析 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):223-226. (WANG Yanjiao, ZHANG Ying, CHEN Rong. GIS-based visualized analysis of scouring and siltation in North Channel of Changjiang Estuary [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2):223-226. (in Chinese))

[5] 段高云,贺顺德,王玉峰. 黄河内蒙古河段防凌形势及对策 [J]. 人民黄河,2010,32(4):36-37. (DUAN Gaoyun, HE Shunde, WANG Yufeng. The situation and countermeasures of ice prevention of Yellow River in Inner Mongolia [J]. Yellow River, 2010, 32(4):36-37. (in Chinese))

[6] 侯素珍. 黄河内蒙古河段河床演变特征分析 [J]. 泥沙研究,2010(3):44-50. (HOU Suzhen. Fluvial processes in Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2010(3):44-50. (in Chinese))

[7] 冀鸿兰,张傲姐,高瑞忠,等. 黄河内蒙古段开河日期预报模型及应用 [J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):42-45. (JI Honglan, ZHANG Aoda, GAO Ruizhong, et al. Application of the break-up date prediction model in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2):42-45. (in Chinese))

[8] 刁明军,杨海波,李斌华,等. 弯道水力学研究现状与进展 [J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2007,33(3):596-601. (DIAO Mingjun, YANG Haibo, LI Binhua, et al. A summary of the study and progress on hydraulics of curved flow [J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2007, 33(3):596-601. (in Chinese))

[9] TSAI W. Ice cover influence on transverse bed slopes in a curved alluvial channel [J]. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32(4):561-582.

[10] 杨柏宁. 水下地形三维建模 Surfer 与 MATLAB 比较分析 [J]. 上海国土资源, 2012, 33(1):75-78. (YANG Baining. Comparison of techniques between surfer and matlab to 3D modeling on underwater topography [J]. Shanghai Land & Resources, 2012, 33(1):75-78. (in Chinese))

[11] PRATLLE B. Review of flow resistance of consolidated smooth and rough ice cover [C]//Proceedings Canadian Hydraulic Symposium. Vancouver: IAHR, 1979:52-92.

[12] 黄志文. 基于 GIS 技术的泥沙冲淤及河床演变分析 [D]. 西安:西安理工大学,2006.

[13] 李义天,邓金运,孙昭华,等. 输沙量法和地形法计算螺山汉口河段淤积量比较 [J]. 泥沙研究,2002(4):20-24. (LI Yitian, DENG Jinyun, SUN Zhaohua, et al. Calculation of deposition in Luoshan-Hankou reach using sediment-transport balance and topographic change methods [J]. Journal of Sediment Research, 2002(4):20-24. (in Chinese))

[14] 王强. GIS 在河道冲淤及河床演变分析中的应用 [D]. 武汉:武汉大学,2004.

(收稿日期:2014-04-25 编辑:熊水斌)