

# 三峡水库蓄水后守护型工程对改善 长江中游航道条件的作用

张明进<sup>1</sup>, 杨燕华<sup>1</sup>, 张华庆<sup>1</sup>, 白玉川<sup>2</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;  
2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**运用河流动力学理论,推求出整治水位下河槽在冲刷前、后航深变化值的表达式,对表达式的理论分析结果表明,在三峡水库下泄清水冲刷的条件下,通过守护关键可动洲滩,控制航槽不向两侧展宽,同时控制航槽内低矮的洲滩不被冲蚀,使清水冲刷只向纵向发展,就能达到增加航深的目的,这正是守护型控导工程对改善航道条件的积极作用所在。以长江中游荆江藕池口河段和太平口河段为例,计算了这两个河段守护关键可动洲滩后航深的变化值,模型计算值与实测断面概化后得到的航深变化值基本一致,进一步验证了守护型工程实现航道改善的作用。

**关键词:**航道整治;守护型控制工程;三峡水库;清水下泄;长江中游

中图分类号:TV131.2<sup>+9</sup>

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)04-0055-04

**Effect of protective control works on improving waterway condition in middle reaches of Yangtze River after impounding of Three Gorges Reservoir**//ZHANG Mingjin<sup>1</sup>, YANG Yanhua<sup>1</sup>, ZHANG Huaqing<sup>1</sup>, BAI Yuchuan<sup>2</sup>(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the river dynamics theory, we derived a mathematical expression of waterway depth variation before and after erosion of the channel at regulation stage. Then, the theoretical analysis of the expression showed that waterway depth could increase. Under the erosion of the release of clear water from the Three Gorges Reservoir, in order to make the release of clear water only erode vertically, it is necessary to take several measures, that is, protecting key movable bottomlands, controlling dredged channel (not broadening in both sides), and protecting low bottomlands from erosion in dredged channel. Thus, protective control works play a positive role in improving waterway condition. Taking Ouchikou and Taipingkou segments of the Jingjiang River at the middle reach of the Yangtze River as examples, we computed the variation of waterway depth in both segments after protecting key movable bottomlands. The model derived results are in accordance with the variation of waterway depth resultant from generalized measured profile, which further verifies the effect of protective control works on improving the waterway condition.

**Key words:** waterway regulation; protective control works; Three Gorges Reservoir; release of clear water; middle reaches of Yangtze River

长江中游河道为大型冲积性河道,水面宽阔,洲滩广布,河床可动性强,形成了众多浅滩碍航河段。在三峡水库蓄水后,水库下游河段长期依循一定规律的来水来沙过程发生重大改变,水库下泄泥沙急剧减少,出库水流平均含沙量较建库前的多年平均值减少约 80%,接近清水下泄,引起水库下游河床发生长距离、长时段的冲刷与河势调整,河床将长时期处于重建平衡过程中。根据已有长系列计算成

果,长江中游荆江河段自三峡水库蓄水后需 30~40 年方能达到最大冲刷深度,目前长江中游河床仍处在持续冲刷过程中。

由于长江中游的河宽较大,枯水期的河槽宽度远远大于航道宽度,航道整治若采取常用的“束水攻沙”原理,即在浅滩两岸修筑大量丁坝,缩窄河宽,增强浅区水动力条件使浅区冲深,进而提高航道水深,将大幅度缩窄河宽,减小过水断面面积,危及

$$(Q/B)^{6/7} J/n^2 \leq KD^{20/21} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $B$  为河宽,  $m$ ;  $J$  为能坡比降;  $D$  为床沙粒径,  $m$ ;  $n$  为包括沙粒和形态阻力在内的综合糙率;  $K$  为系数, 水平床面  $K = 77.4$ , 逆坡或沙波迎水面  $K > 77.4$ 。

若只用连续方程代入式(1)则可得

$$Q/BH^{7/6} \leq K'D^{1/3} \quad (3)$$

式中:  $H$  为断面平均水深,  $m$ , 是  $n$  和  $J$  的函数,  $n$  越大、 $J$  越小,  $H$  越大;  $K'$  为与  $K$  相类似的系数。

坝下冲刷重建平衡过程中, 河流体系内各种要素都要发生调整, 调整的目标是满足式(2)或式(3)。式中  $Q$  为流域加诸的外在因素, 其余  $B$ 、 $H$ 、 $D$ 、 $n$ 、 $J$  都是内在因素, 是可调的, 各要素既有独立性, 又相互依存, 调整极其复杂多样, 既有个性又有共性, 其中  $B$ 、 $H$ 、 $D$  是调整的基本要素,  $n$ 、 $J$  潜于  $H$  之中。

由式(3)可知, 对于处于冲刷重建平衡过程中的坝下河道来说, 河宽、水深、床沙粒径处于不断调整之中。在这一调整过程中, 为了达到增加水深的目的, 可以采用人工干预的措施控制其他两个因素的可变范围。这其中, 控制河宽的变化是最有效也最易实现的措施。

## 1.2 冲刷前后航深的变化

运用河流动力学理论, 将河道进行概化。图 1 为河道断面概化示意图, 其中虚线为概化断面,  $B_0$  为河宽,  $B$  为深槽宽度,  $h_n$  为滩上水深,  $h_p$  为造床流量下的深槽水深, 深槽深度  $H$  为深槽水深与滩上水深之差。在长江中游航道整治中, 为了适应三峡蓄水后来沙量锐减、河道向宽浅方向发展的趋势, 采取了守滩冲槽的治理思路。在这种思路下, 可以认为整治线宽度就是深槽宽度, 整治水位一般为滩面高程,  $H$  可以认为是规划航深。

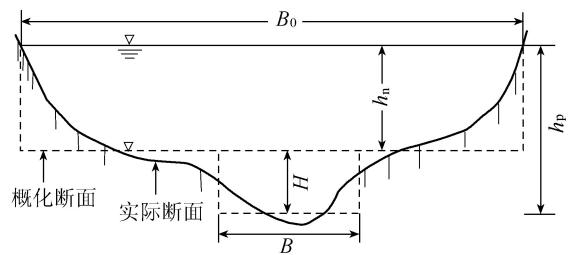


图 1 河道断面概化示意图

水深的增减与水位降落相关, 为了重点分析冲刷前后航深的变化, 将深槽部分水位降落与河床调整关系概化为图 2 所示模型, 图中  $\zeta$ 、 $B$ 、 $H$ 、 $Z$  及  $J$  分别为水位、河宽、水深、河底高程及比降, 其中下标 1 表示整治前, 下标 2 表示整治后(下同);  $\Delta\zeta$  及  $\Delta Z$  分别为水位下降值及河床平均冲刷深度。

如图 2 所示, 由水流连续方程可写出

防洪安全, 而且工程量浩大, 经济上不可行。目前, 经过 10 余年的探索, 在长江中游航道整治中形成了新的治理理念, 即在三峡水库清水下泄条件下, 实施守护关键洲滩的控导工程, 守护住对通航条件起关键、控制性作用的洲滩, 从而保持有利的滩槽形态, 稳定枯水期主流和主航槽位置。洲滩稳定后, 三峡水库下泄清水就能较好地发挥其冲槽作用, 从而改善航道条件。一系列的工程实践已经证明了守护型工程可以改善航道条件, 达到航道治理的目标, 例如长江中游荆江河段自 2000 年以来进行了重点水道关键部位的整治工程, 包括枝江—江口<sup>[1-2]</sup>、沙市<sup>[3]</sup>、瓦口子、马家咀<sup>[4]</sup>、周天<sup>[5]</sup>、藕池口<sup>[6]</sup>、碾子湾<sup>[7]</sup>和窑监<sup>[8]</sup>等 8 个水道共 11 项已建或在建航道整治工程, 其中多处整治部位均采用护滩带、护底带、护岸等控导工程, 取得了较好的整治效果。

目前守护型控导工程实现航道条件改善的机制在理论上尚缺乏完整的表述, 本文运用河流动力学理论, 对整治水位下河槽在冲刷前、后航深的变化规律进行推求, 并基于三峡水库清水下泄的水沙运动特点及其影响下的河床变形特征, 探讨守护型工程在改善长江中的航道条件中起到的作用。

## 1 坝下游河道冲刷与航道变化

### 1.1 坝下河道演变规律

三峡水库蓄水后, 坝上游河段来水来沙条件基本未发生改变, 但河段出口边界条件却发生了重大变化; 坝下游河段河床边界条件未发生改变, 而河段进口来水来沙条件却发生了重大变化: 二者均使原平衡条件被打破, 进入一个再造床的漫长时期。水库上游重建平衡是以淤积来实现的, 最终将实现淤积平衡; 而下游重建平衡是以冲刷来实现的, 最终将实现冲刷平衡。淤积平衡要求水流条件增强, 冲刷平衡要求水流条件减弱, 二者截然相反<sup>[9]</sup>。

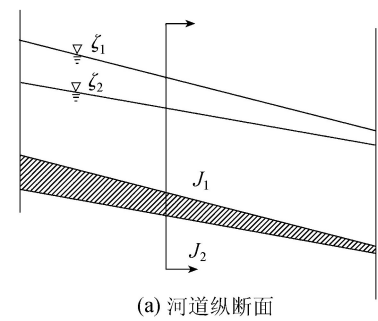
淤积平衡既要悬移质淤积达到平衡, 也要推移质淤积达到平衡, 对于平原河流, 由于悬移质输沙量远大于推移质, 只要悬移质淤积达到平衡, 就可以认为是淤积平衡; 冲刷平衡则不然, 因为冲刷使床沙粗化而不可悬, 只存在唯一的推移质冲刷平衡。

推移质冲刷平衡实际是一种静平衡, 即冲刷至极限平衡时床沙不再运动, 推移质输沙率为零。在恒定均匀流条件下可表示为

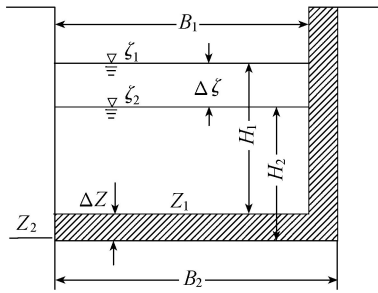
$$U - U_c \leq 0 \quad (1)$$

式中:  $U$  为断面平均流速,  $m/s$ ;  $U_c$  为床沙起动流速,  $m/s$ 。

以水流连续方程、运动方程(曼宁公式)及沙莫夫公式代入式(1)可得



(a) 河道纵断面



(b) 河道横断面

图2 河床下切水位降落示意图

$$B_1 H_1 U_1 = B_2 H_2 U_2 \quad (4)$$

将曼宁公式代入式(4)可得

$$H_2 = \left[ \frac{B_1}{B_2} \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^{0.5} \frac{n_2}{n_1} \right]^{0.6} H_1 \quad (5)$$

同流量水位下降值为

$$\Delta\zeta = \zeta_1 - \zeta_2 = H_1 \left\{ 1 - \left[ \frac{B_1}{B_2} \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^{0.5} \frac{n_2}{n_1} \right]^{0.6} \right\} + \Delta Z \quad (6)$$

假定冲刷前水深  $H_1$  满足航深要求,则根据式(6)可知冲刷后仍能满足航深要求的必要条件为

$$\Delta\zeta - \Delta Z = H_1 \left\{ 1 - \left[ \frac{B_1}{B_2} \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^{0.5} \frac{n_2}{n_1} \right]^{0.6} \right\} \leq 0 \quad (7)$$

### 1.3 参数分析

**a. 糙率调整。**水库下泄清水后,下游河道持续冲刷,床沙级配不断发生调整,床沙粗化是河床糙率的制约性因素。河床的糙率由两部分组成,一部分是沙粒阻力(肤面阻力),另一部分是沙波阻力(形态阻力)。对于卵石夹沙河床,河床粗化后,粒径大为增加,沙粒阻力增大,粗化程度越高,增大幅度也越大;对于细沙,河床粗化后变成中粗沙,冲刷后又由于断面形态调整,流速降低,常处于低能态,易于形成沙波,糙率大为增加,则有

$$\frac{n_2}{n_1} > 1 \quad (8)$$

**b. 比降调整。**坝下河道河床冲刷一般具有坝下近距离河段冲刷最为剧烈、冲刷量随离坝距离增加而减小的特征。水库运行初期坝下游冲刷幅度较大,随着水库运行,冲刷逐渐向下游发展。因而,一般情况下,坝下河道纵向比降总体变缓,则有

$$\frac{J_1}{J_2} > 1 \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入到式(7)中可得到

$$1 < \frac{B_2}{B_1} \leq \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^{0.5} \frac{n_2}{n_1} \quad (10)$$

取  $B_2 \approx B_1$  偏于安全。由此可见,在三峡水库下泄清水冲刷的前提下,通过守护关键可动洲滩,就能保持  $B_2 \approx B_1$ ,只要控制航槽不向两侧展宽,同时控制航槽内低矮的洲滩不被冲蚀,使得清水冲刷只能向纵向发展,就能够达到增加航深的目的。在坝下河道达到冲刷平衡前,随着冲刷历时增大,航深不断增大,即便冲刷前水深稍有不足,冲刷后也必能满足式(7)的要求。这也就揭示了守护型控导工程改善航道条件的积极作用,即守护工程通过对河床横向变形的控制,减小洲塌滩冲产生的横向补沙,加大浅区纵向冲刷,从而为浅区水深持续渐进式改善提供边界条件,对恢复平衡过程中的坝下河段可变洲滩的平面守控可以实现与传统的立体式调整型航道整治工程类同效果。本文分析方法同样适用于建设枢纽后,清水下泄条件下坝下河段的航道整治问题。

## 2 实例分析

以长江中游荆江藕池口河段和太平口河段为例,采用本文提出的方法计算这两个河段自守护关键可动洲滩后工程区航深的变化值。

藕池口左槽、太平口左汊工程区河段整治前(分别为2010年、2006年)及整治后(分别为2013年、2011年)平均实测断面及概化断面见图3和图4。由图3和图4可见,藕池口左槽工程区河段整治前航深约为5.4m,整治后至2013年航深约为7.9m;太平口左汊工程区河段整治前航深约为3.5m,整治后至2011年航深约为5.3m。

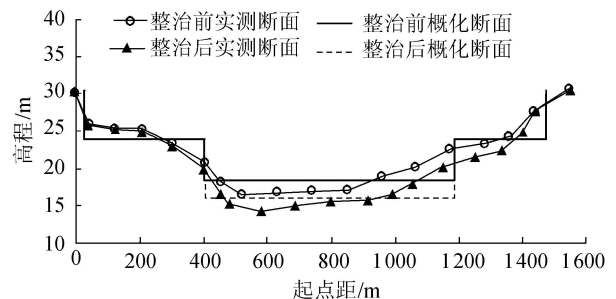


图3 藕池口左槽工程区河段实测及概化断面

根据荆江河段实测资料<sup>[10]</sup>,对于藕池口左槽,整治前(2010年)枯水比降  $J_1$  约为0.036%,糙率  $n_1$  约为0.022;河道经过冲刷后,河段比降变小,糙率增大,至2013年,  $J_2$  约为0.025%,  $n_2$  约为0.026。对于太平口左汊,整治前(2006年)枯水比降  $J_1$  约



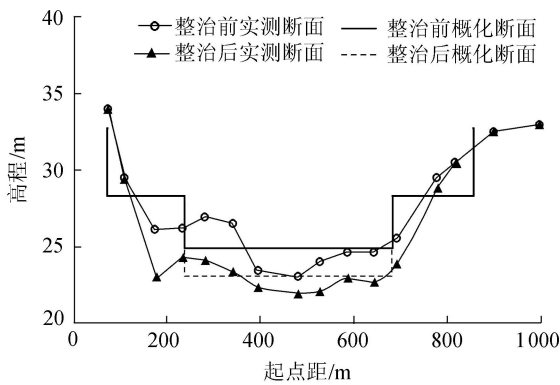


图4 太平口左汊工程区河段实测及概化断面

为 0.039%, 糙率  $n_1$  约为 0.02; 至 2011 年,  $J_2$  约为 0.027%,  $n_2$  约为 0.024。由实测断面经过概化可知, 藕池口左槽  $H_1 = 5.4$  m, 太平口左汊  $H_1 = 3.5$  m, 代入式(7)可得到航深增加值  $\Delta H$  及冲刷后航深  $H_2 = H_1 + \Delta H_0$ 。对于藕池口左槽, 有  $\Delta H = 2.3$  m,  $H_2 = 7.7$  m; 对于太平口左汊, 有  $\Delta H = 1.55$  m,  $H_2 = 5.05$  m。

根据计算结果, 藕池口左槽和太平口左汊工程区河段在实施守护工程后, 航深分别提高了 2.3 m 和 1.55 m, 2013 年藕池口左槽工程区河段的航深能达到 7.7 m, 2011 年太平口左汊工程区河段的航深能达到 5.05 m。可见, 本文理论模型计算得到的航深变化值与实测断面概化后得到的航深变化值基本一致。此外还可以看出, 通过守护洲滩, 引导清水冲刷而得到的航深的增加值受到河段自身基本要素 ( $H_1$ 、 $n_1$ 、 $J_1$ ) 的制约, 当坝下河段再造床达到新的平衡状态后, 河段水力要素趋于稳定, 守护型工程的效果也就达到了极限, 而更高标准的航深要求须依靠进攻型工程整治措施来达成。

### 3 结论

**a.** 长江中游河道为大型冲积性河道, 采用常用的“束水攻沙”原理进行航道整治将危害防洪安全, 目前新的治理理念为, 在三峡水库蓄水运行以后, 接近清水下泄的条件下, 实施以守护关键洲滩为目的的控导工程来改善航道条件。本文通过推求出整治水位下河槽在冲刷前、后航深变化值的表达式, 从理论上探讨了守护型控导工程改善航道条件的作用。

**b.** 对于坝下冲刷重建平衡过程的河道来说, 河宽、平均水深、床沙粒径处于不断地调整之中。在这一调整过程中, 为了达到增加水深的目的, 可以采用人工干预的措施控制河宽和床沙粒径的可变范围。这其中, 控制河宽的变化是最有效也是最易实现的措施。

**c.** 运用河流动力学原理, 推求出整治水位下河槽在冲刷前、后航深变化值的表达式, 由该式可见,

在三峡水库下泄清水冲刷的前提下, 通过守护关键可动洲滩, 控制航槽不向两侧展宽, 同时控制航槽内低矮的洲滩不被冲蚀, 使得清水冲刷只能向纵向发展, 就能够达到增加航深的目的。这正是守护型控导工程改善航道条件的积极作用所在。

**d.** 值得提出的是, 一旦有利的滩槽格局被破坏, 航道条件已经恶化, 或者守护型控导工程强度不能满足规划的航深要求, 进攻型的整治措施虽然也是必要的, 但对于长江这样的大河, 水流能力大, 要实现同等的整治效果, 不仅整治难度大幅增加, 投入的人力物力也将成倍增加。另外, 由式(3)可知, 影响水深的因素包括河宽和床沙粒径, 本文初步研究了河宽的调整对提高水深的作用, 可为下一步考虑床沙粒径对水深的影响研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 刘怀汉, 茆长胜, 李彪. 长江中游枝江—江口河段敏感性试验及整治思路探讨[J]. 水运工程, 2009(11): 153-158. (LIU Huaihan, MAO Changsheng, LI Biao. Sensitivity test and regulation idea of Zhijiang-Jiangkou section at the midstream of the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2009(11): 153-158. (in Chinese))
- [2] 杨丽芳, 黄伟, 付中敏, 等. 长江中游枝江—江口河段河床演变与航道整治思路[J]. 水运工程, 2012(10): 24-29. (YANG Fangli, HUANG Wei, FU Zhongmin, et al. River evolution and waterway regulation of Zhijiang-Jiangkou section at midstream of the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2012(10): 24-29. (in Chinese))
- [3] 朱玉德, 李旺生. 长江中游沙市河段航道治理思路的探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(4): 223-226. (ZHU Yude, LI Wangsheng. Discussion on waterway regulation of Shashi section at the midstream of the Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2006, 27(4): 223-226. (in Chinese))
- [4] 李明, 黄成涛, 刘林, 等. 三峡工程清水下泄条件下分汉分段控制措施[J]. 水运工程, 2012(10): 30-34. (LI Ming, HUANG Chengtao, LIU Lin, et al. Control measures of braided reach under release of clear water caused by Three Gorges Project[J]. Port and Waterway Engineering, 2012(10): 30-34. (in Chinese))
- [5] 雷国平, 谷祖鹏, 郑惊涛, 等. 长江中游周天河段河床演变及整治思路[J]. 水运工程, 2012(10): 35-40. (LEI Guoping, GU Zupeng, ZHENG Jingtao, et al. River bed evolution and regulation idea of Zhoutian river reach in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2012(10): 35-40. (in Chinese))

(下转第 74 页)

3.599 亿  $m^3$ , 约占年安全开采量的 42.98%; 6—9 月为雨季, 灌溉水量减少, 需水量也相应减少, 开采量为 2.65 亿  $m^3$ , 约占年安全开采量的 31.65%; 12 月至次年 2 月农业灌溉基本停止, 地下水开采量很少, 为 1.065 亿  $m^3$ , 占年安全开采量的 12.72%, 主要用于农村生活和少量的工业生产用水。

## 4 结 语

阜阳市浅层地下水位埋深浅、易开发, 地下水水位主要受开采和水文气象影响, 开采的地下水主要用于农业灌溉, 其次用于农村生活和工业生产。针对阜阳市农灌区地下水运动特点, 采用地下水多年调节计算模型对地下水水位动态特征进行模拟, 以调节计算末期地下水位埋深恢复到起调埋深为目标, 得到阜阳市安全开采系数为 0.469, 安全开采量为 8.374 亿  $m^3$ ; 不同分区安全开采系数及相应的安全开采量不同。根据需水过程, 采用等比例法确定了年内地下水安全开采过程, 计算结果可为阜阳市浅层地下水安全开采提供可靠依据。

## 参考文献:

[1] 汪超培, 计岭. 安徽淮北平原水文地质条件与供水引发的环境地质问题分析[J]. 地下水, 2011, 33(5): 115-116. (WANG Chaopei, JI Ling. Analysis of environmental geological problems caused by hydrology and geological conditions and water supply of Anhui Huaibei plain[J]. Groundwater, 2011, 33(5): 115-116. (in Chinese))

[2] LEE C H. The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type [J]. Transactions American Society of Civil Engineers, 1915, 78: 148-151.

[3] THEIS C V. The source of water derived from wells; essential factors controlling the response of an aquifer to development [J]. Civil Engineering, 1940, 10(5): 277-280.

[4] TODD D K. Groundwater Hydrology [M]. New York:

Wiley, 1959.

[5] DOMENICO P. Concepts and models in groundwater Hydrology [M]. New York: McGraw Hill, 1972.

[6] 王振龙, 鲁程鹏, 刘猛. 地下水安全开采量的概念与评价[J]. 水文, 2010, 30(2): 14-19. (WANG Zhenlong, LU Chengpeng, LIU Meng. Concept and estimation of safe yield of groundwater systems [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(2): 14-19. (in Chinese))

[7] 王金生, 王长申, 滕彦国. 地下水可持续开采量评价方法综述[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 525-533. (WANG Jinsheng, WANG Changshen, TENG Yanguo. Review on assessment methods of groundwater sustainable yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 525-533. (in Chinese))

[8] 王家兵, 崔爱敏. 天津深层地下水安全开采量[J]. 技术经济研究, 2007(7): 32-34. (WANG Jiabing, CUI Aimin. Safe output of the deep groundwater in Tianjin [J]. Study on Technical Economy, 2007(7): 32-34. (in Chinese))

[9] 殷丹, 许春东, 束龙仓, 等. 淮北市岩溶地下水可持续开采量及临界水位的确定[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 25-28. (YIN Dan, XU Chundong, SHU Longcang, et al. Research on sustainable exploitation yield and critical water level of karst groundwater in Huaibei City [J]. Water resources and Power, 2012, 30(7): 25-28. (in Chinese))

[10] LARSONA K J, MARINO M, BASSAGAOLU H. Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model [J]. Journal of Hydrology, 2001, 242(1): 79-102.

[11] 王振龙, 高建峰. 实用土壤墒情监测预报技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[12] 王晓红, 侯浩波. 浅谈地下水对作物生长规律的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 2(3): 13-16. (WANG Xiaohong, HOU Haobo. The influence of shallow groundwater on crops growth laws [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 2(3): 13-16. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-03-06 编辑: 郑孝宇)

(上接第 58 页)

[6] 闫军, 付中敏, 陈婧, 等. 长江中游藕池口水道河床演变及航道条件分析[J]. 水运工程, 2012(1): 99-104. (YAN Jun, FU Zhongmin, CHEN Jing, et al. River-bed evolution and navigation condition of Ouchikou waterway in the middle Yangtze River [J]. Port and Waterway Engineering, 2012(1): 99-104. (in Chinese))

[7] 何传金. 长江中游荆江河段航道治理思路、对策及初步成效[J]. 水运工程, 2012(10): 11-17. (HE Chuanjin. Waterway regulation ideas, countermeasures and initial effects for Jingjiang reach in middle Yangtze River [J]. Port and Waterway Engineering, 2012(10): 11-17. (in Chinese))

[8] 左利钦, 陆永军, 季荣耀, 等. 下荆江窑监河段河床演变及整治初步研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 39-45. (ZUO Liqin, LU Yongjun, JI Rongyao, et al. Evolution and regulation of Yaojian reach in the middle Yangtze River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 39-45. (in Chinese))

[9] 乐培九, 张华庆, 李一兵. 坝下冲刷 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 5-6.

[10] 罗保平, 祁茂文, 冯刚, 等. 长江中游碾子湾水道航道整治工程可行性研究报告 [R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2002: 32-34.

(收稿日期: 2014-05-13 编辑: 郑孝宇)