

河流岸滩挫落崩塌机理及其分析模式

王延贵

(中国水利水电科学研究院国际泥沙研究培训中心,北京 100048)

摘要:为探讨岸滩挫落崩塌发生的机理和分析模式,通过分析河流岸滩土壤特性和地质结构,结合岸滩土体应力分布与变化特点,深入分析了岸滩挫落崩塌的力学机制和崩塌过程,指出在河床冲刷下切过程中,黏性岸滩顶部出现的纵向裂隙会促使岸滩挫落崩塌的发生,发生过程相对简单和短暂,破坏面为平面;根据岸滩崩塌体力学平衡分析,探讨了岸滩挫落崩塌的分析模式,导出了挫落崩塌的稳定分析方程,该方程反映了河岸土壤特性、岸坡形态、河床冲刷、岸滩渗流等因素的共同作用关系,将其应用于岸滩临界崩塌高度公式的推导,并利用实测资料对挫落崩塌分析模式的合理性进行了检验,结果表明该分析模式是合理的,可以在实践中应用。

关键词:挫落崩塌;崩塌机理;临界崩塌高度;岸滩;分析模式

中图分类号:TV143⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0021-05

Mechanism and analysis mode of sinking failures of river banks//WANG Yangui (*International Research & Training Center on Erosion and Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*)

Abstract: In order to study the mechanism and analysis mode of sinking failures, the paper analyzes the mechanical mechanism and process of sinking failures by analyzing the soil properties and geologic structures of the river bank and combining the stress distribution and variation characteristics of the river bank soil. It reveals that longitudinal cracks appeared at the top of the viscous bank accelerate the sinking failures during the process of bed degradation, and the process of the sinking failures is relatively simple and short with a plane failure surface. Based on the analysis on the mechanical equilibrium of bank collapses, the analysis mode of sinking failures was studied and a stable analytical equation of sinking failures was derived. The equation shows the interaction among soil properties, slope form, bed scour and bank seepage, and it can be employed to derive the critical height formulas of bank sinking failures. The rationality of the analysis mode was verified by the field measurements. The results suggest that it is rational and can be used in engineering applications.

Key words: sinking failure; mechanism of sinking failure; critical failure height; river bank; analysis mode

河流岸滩崩塌是河道侧向演变的重要形式,在冲积河流中普遍存在。岸滩崩塌是河道水流动力与河岸土质边界结构作用的结果,其中河岸土质边界结构条件是岸滩崩塌的内因,河道水流动力条件是岸滩崩塌的外因。岸滩挫落崩塌是重要的崩岸类型,除与河岸形态、土壤性质等有关外,还与河道水沙条件、河床冲刷状态等有关^[1-2]。对于具有纵向裂隙的黏性土岸滩,当河床冲刷下切到一定程度,岸坡土体下部失去支撑,岸坡发生挫落崩塌。河流上修建水库后,拦截了大量泥沙,改变了进入下游河道的水沙过程,导致下游河道严重冲刷和下切,促使岸滩挫落崩塌发生。长江三峡蓄水以来,造成下游荆江

河道大幅度冲刷,沙市三八滩、文村夹、石首弯道进口、调关弯道、监利乌龟洲等河段深泓高程降低幅度较大,如文村夹附近 1998 年 10 月至 2009 年 10 月间最大冲深 11.2 m,致使三峡水库下游河道崩岸状况发生变化,三峡水库试验性蓄水期 2010 年和 2011 年长江中下游发生崩岸险情分别为 64 处和 65 处,崩岸长度分别为 4.8 km 和 44.8 km,在荆江河段新沙洲、荆江门、张家墩、界牌等发生较大的崩岸^[3-4],其中挫落崩塌占有相当的比重,给两岸防洪及建筑物的安全产生重要影响。因此,深入研究河道冲刷下切对河流岸滩挫落崩塌的影响机理及崩塌分析模式是非常重要的。

1 岸滩挫落崩塌机理

1.1 挫落崩塌的力学机制

岸滩崩塌发生与否主要是由岸滩崩体下滑力(矩)与阻滑力(矩)的平衡关系决定的,当下滑力(矩)大于阻滑力(矩)时,岸滩崩体失稳发生崩塌。岸滩崩体受力状况与岸滩土体内的应力变化有很大的关系,崩体应力场受到外部条件的影响而发生变化。河床冲刷下切后,岸滩冲刷部分失去支撑作用,岸滩内应力场也将发生变化。王延贵等^[1,5-7]曾利用土力学挡土墙的破坏原理揭示河床冲刷下切后的岸滩挫落崩塌机理,结合土力学理论给出岸滩表面以下土体的应力分布,如图1所示。河床冲刷过程中,岸滩崩体内应力变化经历了弹性变形状态到塑性破坏的极限平衡状态,河床冲刷初期,由于河流岸滩土体一侧的泥沙逐渐被冲走,其坡度变陡,岸滩土体水平压力减小,此阶段处于弹性变形状态(图1(a))。若河床进一步冲刷,岸滩土体将发展为塑性极限平衡状态(图1(b)),此时岸滩顶部会出现拉应力,并出现与岸线平行的张性裂隙,张性裂隙深度 H' 可由极限平衡状态下水平侧向压力分布求得^[1,5-7],即

$$y = H' = \frac{2c}{\rho g} \tan\left(45^\circ + \frac{\theta}{2}\right) \tag{1}$$

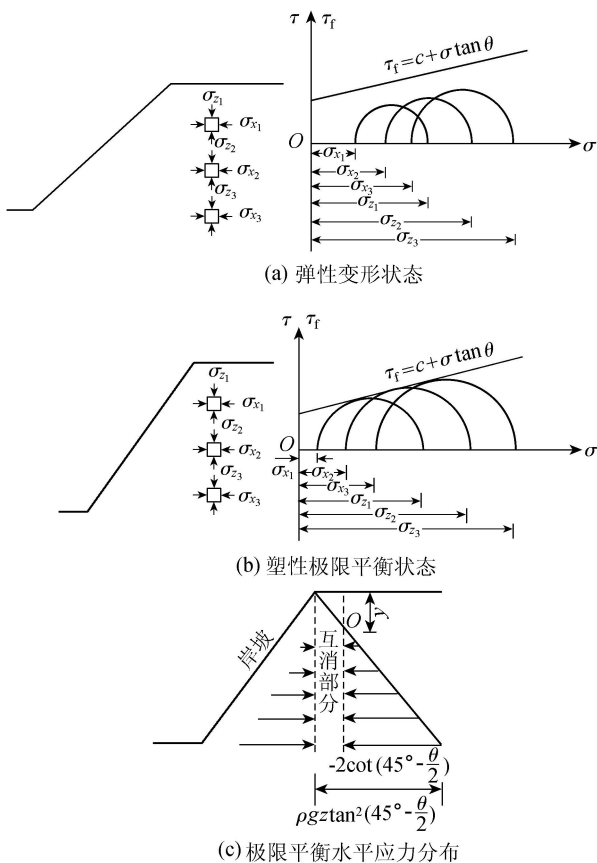


图1 河床冲刷下切后岸滩挫落崩塌力学机制示意图

式中和图1中: σ 为岸滩土体应力; σ_z 为岸滩土体自重应力; σ_x 为岸滩土体水平侧向压力; τ 为土体切应力; τ_f 为土体抗剪强度; c 为土体黏聚力; θ 为土体内摩擦角; ρ 为土体密度。据文献^[1,5]的研究,岸滩顶面裂隙的产生会促进岸滩挫落崩塌的发生,裂隙越深,岸滩崩体越不稳定,挫落崩塌越易发生。

1.2 挫落崩塌的发生过程

对于黏性土壤岸滩而言,一方面,由于岸滩顶部土壤的收缩及张拉应力的作用而产生裂缝^[6-7];另一方面,河床冲刷下切会促使岸滩崩体内的应力发生变化,使岸滩顶部产生张性裂隙。表面张性裂隙将会使得岸滩的稳定性降低,当河床冲刷达到一定深度时,岸滩土体下部将逐渐失去支撑,使得崩体沿着破坏面滑落而形成挫落崩塌。岸滩挫落崩塌一般沿河岸呈条形,横向崩塌宽度较小,发生挫落崩塌的过程较简单和短暂,破坏面为平面。挫落崩塌发生后,新出露的岸壁直立,仍可发生新的挫落崩塌。岸滩崩体沿破坏面进入河道的方式主要有旋转倒入河内的倒塌(图2(a))和平滑入河的滑塌(图2(b))两种模式^[8-9]。由于这两种崩塌入河模式的崩塌机理并无不同,因此其崩体稳定评价分析方法应是相同的。挫落崩塌崩体稳定评价可采用崩体受力平衡法进行分析,通过计算崩体的安全系数,判断岸滩崩体的稳定性。

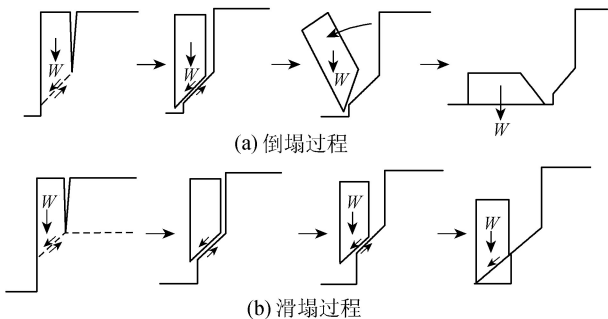


图2 挫落崩塌模式与发生过程示意图

2 岸滩挫落崩塌的分析模式

2.1 挫落崩塌模式分析

对于黏性岸滩顶面出现纵向裂隙的情况,崩体最可能沿着滑裂面 AB 崩塌,如图3所示。岸滩崩体作为一个整体,且假定为刚性,崩体所受的力主要包括有效重力 W 、破坏面处的支撑力 N 和阻滑力 P_τ 、渗透力 P_d 及外力 P_0 。设整个岸滩崩体断面面积为 A ,崩塌断面渗透线以上和以下的崩体断面面积分别为 A_u 和 A_d ,且

$$A = A_d + A_u = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2 \tan \alpha_2} + \frac{H^2 - H'^2}{2 \tan \alpha} - \frac{H_1^2}{2 \tan \alpha_1} - \frac{H^2 - H_2^2}{2 \tan \alpha_0} \tag{2}$$

其中

$$S_{\alpha\theta} = \sin^2\alpha - \cos\alpha\sin\alpha \frac{\tan\theta}{K}$$

$$n_{J\gamma} = \frac{(\rho_{\text{sat}} - \rho_w - \rho)S_{\alpha\theta} + \rho_w JS_{\beta\alpha}}{\rho}$$

$$S_{\beta\alpha} = \cos(\beta - \alpha) \sin \alpha - \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \frac{\tan \theta}{K}$$

$$S_{\alpha} = \frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\tan \alpha_0} \quad S_t = \frac{c}{K \rho g}$$

$$S_A = \frac{H_2^2 - H_1^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H_1^2}{\tan \alpha_1} + \frac{H'^2}{\tan \alpha} - \frac{H_2^2}{\tan \alpha_0}$$

式中: $S_{\alpha\theta}$ 为主要反映岸滩土体内摩擦角和破坏面倾角影响的参数; $S_{\beta\alpha}$ 和 $n_{j\gamma}$ 为主要反映渗透力影响的参数; S_{α} 为主要反映河岸形态和破坏面角度影响的参数; S_i 为河岸强度系数, 反映河岸土壤黏性与重力的对比关系; S_A 为主要反映河岸崩体大小和形态影响的参数。方程(10)为岸滩崩体稳定分析模式方程, 主要反映了河岸土壤特性、岸坡形态、河床冲刷、岸滩渗流等因素的共同作用关系。折线岸滩破坏面的倾角主要取决于河岸形态、裂隙深度和土壤内摩擦角, 可由式(11)确定^[10]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{H^2 - H'^2}{\frac{H_2^2 - H_1^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H_1^2}{\tan \alpha_1} + \frac{H^2 - H_2^2}{\tan \alpha_0}} \right) + \theta \right] \quad (11)$$

2.2 典型岸滩形态挫落崩塌的分析模式

Thorne 等^[9]深入研究了洪水期的河岸崩塌问题,指出枯水期的河流岸滩崩塌影响因素与洪水期具有明显的不同。在枯水期间,岸滩水流浸泡和渗流对河流岸滩崩塌的作用较小,而河流岸滩高度、河床冲刷等则是影响岸滩崩塌的主要因素^[11-12]。因此,在探讨枯水期河流岸滩崩塌的分析模式时,不需要考虑岸滩水流浸泡和渗流的作用,即 $f=0$ 。枯水期岸滩崩体稳定分析模式方程变为

$$S_{\alpha\theta}S_{\alpha}H^2 - 2S_{\perp}H + (2S_{\perp}H' - S_{\alpha\theta}S_A) = 0 \quad (12)$$

式(12)就是枯水期岸滩崩体稳定分析方程。在枯水期,对于不同岸滩形态的挫落崩塌,崩体稳定分析方程不变,皆为式(12),所变化的是方程中的一些系数。最典型的岸滩为简单边坡(简单边坡是指河岸边坡形态为直线的边坡),简单边坡岸滩的首次崩塌和二次崩塌有很大的差异。根据简单边坡岸滩崩塌的特点,求得几种典型岸滩形态挫落崩塌稳定分析方程的主要变化参数,如表1所示。

3 挫落崩塌分析模式的应用与检验

在分析河流岸滩崩塌过程中,文献[1,5]提出了岸滩临界崩塌高度的概念,指出河床冲刷下切过程中,能够维持岸滩稳定的最大高度称为岸滩临界

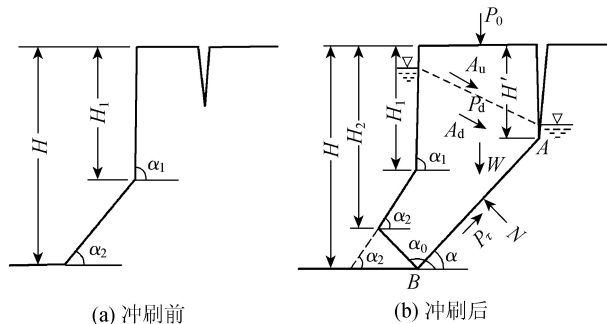


图3 挫落崩塌稳定分析示意图

崩体的有效重力为

$$W = \rho g A + f(\rho_{\text{cat}} g - \rho_w g - \rho g) A \quad (3)$$

其中

$$f = \frac{A_d}{A}$$

式中: ρ 和 ρ_{sat} 分别为土体的密度和饱和密度; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度。

崩体所受的渗透水动力为

$$P_d = \rho_w g J A_d = \rho_w g J f A \quad (4)$$

式中: J 为土体内渗流梯度。

联解 x 和 y 轴向力的平衡方程:

$$\begin{cases} D_F \cos \alpha + P_d \cos \beta - N \sin \alpha = 0 \\ W + P_0 - D_F \sin \alpha + P_d \sin \beta - N \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

得

$$\begin{cases} D_F = (W + P_0)\sin\alpha + P_d\cos(\beta - \alpha) \\ N = (W + P_0)\cos\alpha + P_d\sin(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (6)$$

式中: D_F 为崩体的下滑力。

崩体破坏面上的阻滑力为

$$P_{\tau} = N \tan \theta + cl \quad (7)$$

式中: l 为崩体断面的破坏长度, $l = \frac{H-H'}{\sin \alpha}$ 。

岸滩崩体的稳定系数定义为崩体阻滑力与下滑力的比值,相应的稳定系数为

$$K = \frac{P_\tau}{D_F} = \frac{[(W + P_0)\cos\alpha + P_d\sin(\beta - \alpha)]\tan\theta + cl}{(W + P_0)\sin\alpha + P_d\cos(\beta - \alpha)} \quad (8)$$

若 $P_0=0$, 有

$$K = \frac{[\rho + f(\rho_{\text{sat}} - \rho_w - \rho)]g \cos \alpha + \rho_w g f \sin(\beta - \alpha) \} A \tan \theta + cl}{[\rho + f(\rho_{\text{sat}} - \rho_w - \rho)]g A \sin \alpha + \rho_w g f A \cos(\beta - \alpha)} \quad (9)$$

式中: β 为渗透力与水平方向的夹角。将式(2)及

$$l = \frac{H-H'}{\sin \alpha} \text{ 代入式(9), 整理得}$$

$$(S_{\alpha\theta} + fn_{j\gamma})S_{\alpha}H^2 - 2S_{\text{t}}H + [2S_{\text{t}}H' - (S_{\alpha\theta} + fn_{\text{t}\gamma})S_{\text{t}}] = 0 \quad (10)$$

表1 简单边坡稳定分析方程的主要参数

典型崩塌类型	参数	河岸形态 参数取值
首次崩塌 一般情况	$S_A = \frac{H_2^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2}{\tan \alpha} - \frac{H_2^2}{\tan \alpha_0}$ $\alpha = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{H^2 - H_2^2}{\frac{H_2^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2 - H_2^2}{\tan \alpha_0}} \right) + \theta \right]$	$H_1 = 0$
首次崩塌 垂向冲刷	$S_\alpha = \frac{1}{\tan \alpha}$ $S_A = \frac{H_2^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2}{\tan \alpha}$ $\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H_2} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{H'}{H} \right)^2 \right) \tan \alpha_2 \right] + \theta \right\}$	$H_1 = 0$ $\alpha_0 = 90^\circ$
二次崩塌 一般情况	$S_A = \frac{H_2^2 - H'^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2}{\tan \alpha} - \frac{H_2^2}{\tan \alpha_0}$ $\alpha = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{H^2 - H'^2}{\frac{H_2^2 - H'^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2 - H'^2}{\tan \alpha_0}} \right) + \theta \right]$	$\alpha_1 = 90^\circ$ $H_1 = H'$
二次崩塌 垂向冲刷	$S_\alpha = \frac{1}{\tan \alpha}$ $S_A = \frac{H_2^2 - H'^2}{\tan \alpha_2} + \frac{H^2}{\tan \alpha}$ $\alpha = \frac{1}{2} (\alpha_2 + \theta)$	$\alpha_1 = 90^\circ$ $H_1 = H'$ $\alpha_0 = 90^\circ$

崩塌高度,对应的岸滩崩体稳定系数 $K=1$ 。当河流岸滩高度大于岸滩临界崩塌高度时,岸滩将发生挫落崩塌。在黏性岸滩顶面出现张性裂缝的情况下,取稳定系数 $K=1$,求解方程(10)便得岸滩临界崩塌高度^[1,5]:

$$H_{cr} = \frac{S_t}{(S_{\alpha\theta} + fn_{J\gamma}) S_\alpha} + \sqrt{\left(\frac{S_t}{(S_{\alpha\theta} + fn_{J\gamma}) S_\alpha} \right)^2 - \frac{2S_t H' - (S_{\alpha\theta} + fn_{J\gamma}) S_A}{(S_{\alpha\theta} + fn_{J\gamma}) S_\alpha}} \quad (13)$$

式(13)表明,岸滩临界崩塌高度的主要影响因素包括河岸土壤特性、岸坡形态、河床冲刷、岸滩渗流等。作为算例,文献[1,5]对洪水期的临界崩塌高度的变化过程进行了估计和分析,结果表明洪水期和洪水退落末期是河岸容易崩塌的重要时期。

在枯水期的低水位状态,根据方程(12)可求得相应的岸滩临界崩塌高度^[1,5]:

$$H_{cr} = \frac{S_t}{S_{\alpha\theta} S_\alpha} + \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_{\alpha\theta} S_\alpha} \right)^2 - \frac{2S_t H' - S_{\alpha\theta} S_A}{S_{\alpha\theta} S_\alpha}} \quad (14)$$

其中 $S_{\alpha\theta} = \sin^2 \alpha - \cos \alpha \sin \alpha \tan \theta$
枯水期岸滩临界崩塌高度与河岸强度系数成正比,与河岸裂隙深度和岸滩坡度成反比,这进一步说明河流岸滩纵向裂隙会促进岸滩崩塌。

岸滩崩塌机理十分复杂,影响因素很多,而开展岸滩崩塌、边界条件和水动力条件的观测工作难度

较大,因而岸滩崩塌分析模式的验证工作受到很大的限制。鉴于岸滩临界崩塌高度公式是建立在崩塌模式基础之上的,且相比之下岸滩临界崩塌高度在实验室或天然河流中较容易获取,因此,可以利用岸滩临界崩塌高度公式的合理性来间接检验河岸崩塌分析模式的适用性。

在天然河道中,针对河岸土质特性、河岸形态及水流条件等同时开展观测的情况是比较少的,且一般观测的河岸高度和坡度都是稳定状态的,比临界值小20%以上^[5,13]。根据文献[14]提供的天然河流崩塌资料和文献[1,5]的试验资料,进行了岸滩崩塌高度的对比分析。在此需要说明的是,文献[14]提供的 Niger 河崩塌资料为稳定河岸高度与坡度的关系,没有区分河岸崩塌类型,实际上也很难区分,因此该资料仅用于检验;模型沙崩塌高度试验在水槽内进行,采用清水下切的试验方式,岸滩崩塌多为挫落崩塌。图4(a)和(b)分别为 Niger 河稳定河岸高度和实验室模型沙崩塌高度的检验情况。由图4可见,无论是 Niger 河的野外实测资料,还是模型沙的崩塌试验研究,岸滩实测临界崩塌高度与计算值基本一致,表明河流岸滩崩塌分析模式是合理的,可以在实践中应用。

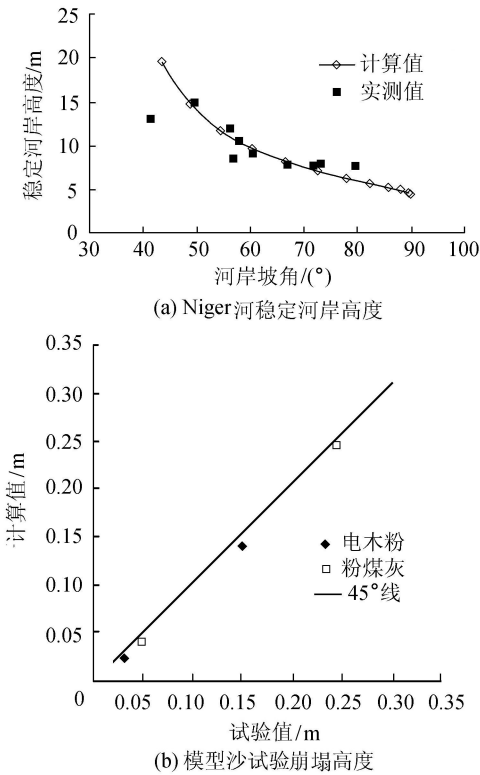


图4 岸滩挫落崩塌分析模式的检验

4 结 论

a. 从河岸土体应力分析出发,阐述了黏性河岸挫落崩塌的机制,指出在河床冲刷过程中,岸滩顶部

会出现纵向裂隙,纵向裂隙会加速岸滩挫落崩塌的发生。

b. 岸滩挫落崩塌沿河岸一般呈较小宽度的条形崩塌,崩塌过程简单和短暂,破坏面为平面,崩体沿破坏面进入河道的方式主要有倒塌和滑塌两种。

c. 通过岸滩崩体受力和稳定分析,建立了挫落崩塌的分析模式,给出了挫落崩塌的稳定分析方程;结合岸滩临界崩塌高度的分析,野外和室内实测资料检验表明该分析模式是合理的。

参考文献:

[1] 王延贵. 冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析与试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2003.

[2] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等. 江河崩岸的影响因素分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009,39(1):36-40. (ZHANG Xingnong,JIANG Chuanfeng,CHEN Changying, et al. Influencing factors for bank collapse in fluvial rivers [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009,39(1):36-40. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报:2010 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[4] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报:2011 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[5] 王延贵,匡尚富. 岸滩临界崩塌高度的研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1158-1165. (WANG Yangui,KUANG Shangfu. Critical height of bank collapse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1158-1165. (in Chinese))

[6] 蔡伟铭,胡中雄. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建

筑工业出版社,1991.

[7] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.

[8] ASCE Task Committee on Hydraulic, Bank Mechanics, and Modeling of Riverbank Width Adjustment. River width adjustment I :processes and mechanisms[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998, 124(9):881-902.

[9] THORNE C R, TOVEY N K. Stability of composite riverbanks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1981,6:469-484.

[10] JUMIKIS A R. Soil mechanics [M]. Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc. 1962.

[11] 王延贵,匡尚富,黄永健,等. 洪水期岸滩崩塌有关问题的研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(2):90-97. (WANG Yangui, KUANG Shangfu, HUANG Yongjian. Study on bank collapse during flooding periods [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003,1(2):90-97. (in Chinese))

[12] 王延贵,匡尚富. 河岸淘刷及其对河岸崩塌的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(4):251-257. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Study on bank erosion and its influence on bank collapse[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005,3(4):251-257. (in Chinese))

[13] 官厅水库坍岸研究小组. 水库滩岸研究[M]. 北京:水利电力出版社,1958.

[14] ABAM T K S. Factors affecting distribution of instability of river banks in the Niger Delta[J]. Engineering Geology, 1993, 35:123-133.

(收稿日期:2012-11-29 编辑:熊水斌)

(上接第 20 页)

[7] 刘晓敏,张喜英,王慧君. 太行山前平原区小麦玉米农艺节水技术集成模式综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2011,19(2):421-428. (LIU Xiaoming, ZHANG Xiyi, WANG Huiun. A comprehensive evaluation of wheat/maize agronomic water-saving modes in the piedmont plain region of the Mount Taihang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(2):421-428. (in Chinese))

[8] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9):175-183. (LI Yong, YANG Xiaoguang, YE Qing, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961-2007 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 175-183. (in Chinese))

[9] 海河流域节水和高效用水战略研究报告[R]. 天津:天津市中水科技咨询有限责任公司,2008.

[10] 曹永强,姜莉,张伟娜,等. 海河流域京津冀地区农产品

虚拟水实证研究[J]. 水利经济,2010,28(5):11-14. (CAO Yongqiang, YANG Li, ZHANG Weina. et al. An empirical study on the agricultural product virtual water in the Beijing-Tianjin-Hebei region of Haihe River basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(5):11-14. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-31 编辑:熊水斌)

