



## 长江中下游窝崩时空分布与形成特点\*

张跃博<sup>1</sup>, 孙启航<sup>2</sup>, 张晓宇<sup>3</sup>, 李君涛<sup>2</sup>

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430050;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 3. 宁波市港航管理中心, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 长江中下游地区的窝崩现象对沿岸防洪安全构成了重大威胁。通过实测资料分析法, 阐述了长江中下游窝崩的时空分布规律及形成特点。结果表明: 1) 三峡工程后大规模窝崩的发生比例显著增加, 窝塘长度达 300 m 以上的大尺度窝崩比例由工程运用前(1973—2002年)的 21% 增加至工程后的 36%。2) 窝崩现象主要发生于汛期及汛后, 空间上集中于主流顶冲或贴岸段(如弯道凹岸和江心洲洲头)。3) 长江中下游窝崩的形成受近岸水流动力、河床边界条件和土体特性等多因素影响, 大尺度窝崩现象的形成过程首先从局部河段河势改变开始, 形成近岸深槽; 然后深槽面积逐渐增大, 最深点持续冲深, 且向河岸侧持续移动, 直至深槽楔入河岸, 近岸边坡陡峭, 在近岸水流的持续作用下, 引发河岸崩塌。研究成果可为长江中下游的防洪减灾与河道治理提供科学依据和技术支撑。

**关键词:** 窝崩形成; 时空分布; 近岸深槽; 水沙条件; 长江中下游

中图分类号: U617; TV148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0100-10

## Spatio-temporal distribution and formation characteristics of arc-shaped bank erosion in middle and lower reaches of the Yangtze River

ZHANG Yuebo<sup>1</sup>, SUN Qihang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>3</sup>, LI Juntao<sup>2</sup>

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

2. Tianjin Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

3. Ningbo Port and Shipping Administration Center, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** The arc-shaped bank erosion phenomenon in the middle and lower Yangtze River poses significant threats to flood control safety along the riverbanks. Through systematic analysis of measured data, this paper elaborates on the spatio-temporal distribution patterns and formation characteristics of arc-shaped bank erosion in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The results show that: 1) The proportion of large-scale arc-shaped bank erosion (scour-pit length  $\geq 300$  m) increased substantially after the Three Gorges Project operation, rising from 21% during the pre-operation period (1973–2002) to 36% post-operation. 2) The phenomenon of arc-shaped bank erosion mainly occurs during and after the flood season, and is spatially concentrated in the mainstream impingement or nearshore flows (such as curved concave banks and the heads of midstream islands). 3) The formation of arc-shaped bank erosion in the middle and lower reaches of the Yangtze River is influenced by multiple factors such as nearshore hydrodynamics, riverbed boundary conditions, soil characteristics. The formation process of large-scale arc-shaped bank erosion begins with changes in local river conditions, forming nearshore deep troughs. Then, the area of the deep troughs gradually increases, and the deepest point continues to deepen and move towards the riverbank until

收稿日期: 2025-02-19

\*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS20240603)

作者简介: 张跃博(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程咨询设计及安全评估等工作。

通信作者: 孙启航(1996—), 男, 博士, 工程师, 从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: sunqihang@whu.edu.cn

the deep trough wedges into the riverbank. The nearshore slope is steep, and under the continuous action of nearshore water flow, the riverbank collapses. The research results can provide critical scientific basis and technical support for flood control, disaster reduction, and river management in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

**Keywords:** formation of arc-shaped bank erosion; spatio-temporal distribution; nearshore deep trough; hydrodynamic and sediment conditions; middle and lower reaches of the Yangtze River

窝崩是长江中下游一种典型的崩岸形式, 具有发展速度快、破坏力强等特点, 往往数小时内崩塌宽度即可达到上百米<sup>[1]</sup>。三峡工程运用后, 水沙条件的大幅改变和局部河势的剧烈调整, 使长江中下游局部河段发生了十分严重的窝崩险情。长江下游扬中市指南村附近于 2017 年 11 月 8 日发生窝崩险情, 崩窝长约 540 m、宽约 190 m, 造成主江堤损毁约 440 m。窝崩的发生不仅直接威胁堤防安全, 造成防洪险情, 而且容易引起局部河势突变, 对航运、供水等造成不利影响<sup>[2]</sup>。

窝崩的形成与发展涉及近岸水流与河岸土体的相互作用<sup>[3-4]</sup>。现有研究方法主要包括实测资料分析、数值模拟、原型观测和概化水槽试验。张幸农等<sup>[5]</sup>根据窝崩现象发生的时间和地点统计得出, 窝崩出现概率最高的时期是汛期和汛后枯水期, 并且规模较小的第一种冲刷型的窝崩基本出现在汛期, 而规模较大的多出现在汛后枯水期。从空间上看, 长江下游南岸多山地丘陵, 河漫滩地相对较窄, 北岸则为宽阔的冲积河漫滩地, 土质疏松、抗冲性较差, 江阴以上河段尤为明显。余文畴等<sup>[6]</sup>利用 1993 年 8 月扬州港窝崩内的实测原型流速数据, 分析得出从河道近岸水流中分出的一股进入窝崩区域内的水流是整个窝塘内回流动力的结论。Hackney 等<sup>[7]</sup>通过分析湄公河 Kratie 弯道处连续崩窝的实测三维流场, 得出结论: 窝崩内的垮塌土体可以将水流转向河岸, 从而增大河岸的侵蚀速率。原型观测方法大多数情况只能

捕捉窝崩发生之后窝塘内的流场与地形。

本文基于实测水沙与地形资料, 分析长江中下游近期水沙条件变化及河床冲淤过程; 定量阐述中下游河段窝崩现象的主要特征与时空分布特点, 揭示了长江中下游窝崩的形成条件与形成过程。不仅有助于进一步掌握冲积河流河床的演变规律, 而且能为长江中下游河道治理及防洪减灾等提供科学依据及技术支撑。

## 1 近期长江中下游概况

长江中下游为冲积平原河流, 干流河道从宜昌至湖口全长约 1 893 km, 流经湖北、湖南、江西、安徽、江苏和上海六省市, 流域面积约 80 万 km<sup>2</sup>, 见图 1。沿程河型多样, 以分汉型河道为主, 其长度约占河道总长度的 65% 以上<sup>[8]</sup>。长江上游来沙量的减少及水库群的运用, 致使进入中下游的来水来沙量发生改变, 且主要表现为沙量的大幅度降低。三峡工程运用后, 进入长江中下游河道的沙量大幅减少, 导致河床发生长距离、长时间的冲刷, 2003—2020 年累计冲刷约 49 亿 m<sup>3</sup><sup>[9]</sup>, 其中中游和下游的平滩河槽累计冲刷量分别约为 26 亿和 23 亿 m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>, 进一步导致河岸崩退现象在长江中下游普遍存在, 2003—2020 年中下游干流河道共发生崩岸险情 1 000 多处, 累计崩岸长度约 730 km。其中规模较大的崩岸中, 条崩约占 80% 以上, 窝崩占 15%~20%<sup>[11]</sup>。



图 1 长江中下游

Fig. 1 Middle and lower reaches of the Yangtze River

## 2 中下游窝崩主要特征与时空分布特点

根据文献调查,收集了1970—2021年中下游规模较大的47处窝崩信息,主要包括窝崩现象发生的时间与地点、窝塘的长度与宽度<sup>[12-15]</sup>。所统计的窝崩现象的长度为30~680 m,宽度为10~680 m。依据上述统计资料,从窝崩现象主要特征、时间、空间分布3个方面对长江中下游窝崩特点进行分析。

### 2.1 窝崩平面特征

根据资料分析,长江中下游窝崩现象的主要特征为:1) 窝塘宽度与长度之比( $B/L$ )一般大于0.1且小于1;2) 大尺度窝崩发生前一般存在近岸深槽楔入岸坡;3) 窝崩发展过程持续时间较短,一般为数小时至数十小时。

从平面形态看,相较于条崩和洗崩,窝崩具有较大的宽长比。长江中下游窝崩宽度与长度的关系见图2,可以看出, $B/L$ 值介于0.11~1.28,平均值达0.51,而条崩一般均小于0.1<sup>[16]</sup>。较大的宽长比往往造成堤外滩地全部崩失,严重时导致主江堤损毁。可以发现,8.5%的窝崩宽度大于长度,主要分布于受人为工程影响较少的区域,如和畅洲北汊、南京高家圩等;31.9%的窝崩宽长比值介于0.5~1;55.3%的窝崩宽长比介于0~0.5。通过分析窝崩实例,发现宽长比小于1的原因主要有:1) 在窝崩发生后,及时实施应急抢险措施,有效遏制了窝崩的进一步发展。2) 河岸土体在横向上具有差异性,受河道水流入渗的影响,

越靠近河道河岸土体抗剪强度越小,稳定性越低。

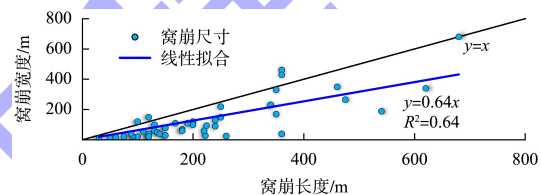


图 2 长江中下游窝崩宽度与长度的关系

Fig. 2 Relationship between width and length of arc-shaped bank erosion in middle and lower reaches of the Yangtze River

### 2.2 时间分布特点

#### 2.2.1 三峡工程运用前后窝崩分布特点

三峡工程运用前,窝崩现象的发生频率呈现出大洪水年份(1996、1998年)远大于其他年份的特点。三峡工程运用后,中下游窝崩整体的频率有所降低,但长度超过300 m的大窝崩比例由三峡前(1973—2002年)的21%增加至三峡后(2003—2021年)的36%。20世纪50—80年代,中下游重要岸段和关键节点岸线得到初步控制,大规模崩岸引起河势重大变迁的现象已基本不存在,但局部河段的窝崩现象时有发生,如1976年11月发生于马鞍山电厂附近长460 m和宽350 m的特大窝崩。1973—1992年大窝崩发生的频率平均为每年0.6处。20世纪90年代以后,经过多年实施护岸工程,长江中下游总体河势已基本保持相对稳定,但是由于遭遇连续大洪水,尤其是1998年大洪水,窝崩发生的频率明显增大,1993—2003年平均每年为2.2处,见图3。虽然

1998 年窝崩数量多达 10 处, 但窝崩长度均介于 120~260 m, 长度大于 300 m 大窝崩并未发生。21 世纪后, 长江中下游护岸工程进一步加强, 特别是在 1999—2003 年, 实施了长江重要堤防隐蔽工程, 工程完成长度 455 km, 涉及湖北、湖南、江西、安徽等 4 省堤防约 2 000 km<sup>[17]</sup>, 使窝崩频率有所降低。

三峡工程运用后, 清水下泄导致中下游河床发生持续冲刷, 因主流顶冲、深泓贴岸、岸坡变陡, 导致长度超过 300 m 的大窝崩比例增加了 15%。如中游的虾子沟、肖潘以及下游的和畅洲、指南村均发生了较为严重的窝崩险情, 严重危及长江大堤安全。三峡工程运用后, 长江中下游大规模护岸及河道整治工程的实施, 稳定了河势, 但进一步造成了部分深槽持续的冲深发展, 最终引发局部河岸崩塌, 这可能是造成三峡后大尺度窝崩比例增大的原因之一。

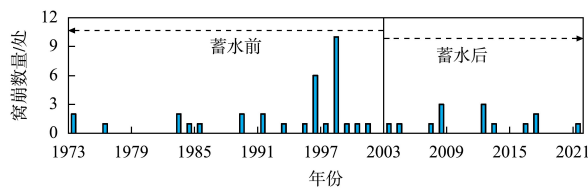


图 3 三峡工程蓄水前后长江中下游窝崩数量的分布  
Fig. 3 Distribution of arc-shaped bank erosion in middle and lower reaches of the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Project

### 2.2.2 年内分布特点

统计崩岸现象在年内的分布, 其中枯水期、涨水期、洪峰期、退水期分别为 12—2 月、3—5 月、6—8 月、9—11 月。1973—2021 年长江中下游窝崩现象发生的时间分布与所占比例见图 4。可以看出, 窝崩现象多发生于洪峰期 6—8 月及枯水期 12—2 月, 数量共计 29 处, 约占总数的 62%; 退水期 9—11 月内窝崩也时有发生, 共计 10 处, 约占总数的 21%; 涨水期 3—5 月窝崩数量相对较少, 共计 8 处, 约占 17%。更进一步, 从窝崩发生的月份来看, 8 和 12 月内窝崩最为频繁, 崩岸数量均为 7 处, 约占 14.9%; 其次是 4、7 和 11 月, 窝崩数量均为 6 处, 约占 12.8%。由此可知, 长江中下游窝崩在汛前 4 月、汛期 7—8 月以及汛后

11—12 月发生频率较高, 共计占比为 68%。其中涨水期近岸水流流速增加, 坡脚冲刷加剧, 因此窝崩现象在涨水期的数量也较多。其他月份窝崩现象频率相对较低。此外需要指出的是, 三峡工程运用后窝崩现象的发生时间更加集中于汛后 11—12 月, 在共计 13 处的窝崩现象中, 9 处的发生时间位于 11—12 月。原因可能在于三峡工程运用后, 坝下游水流年内过程发生较大改变, 年内退水速度明显加快, 快速退水阶段的河岸稳定性会大大降低<sup>[18]</sup>, 易引发窝崩。

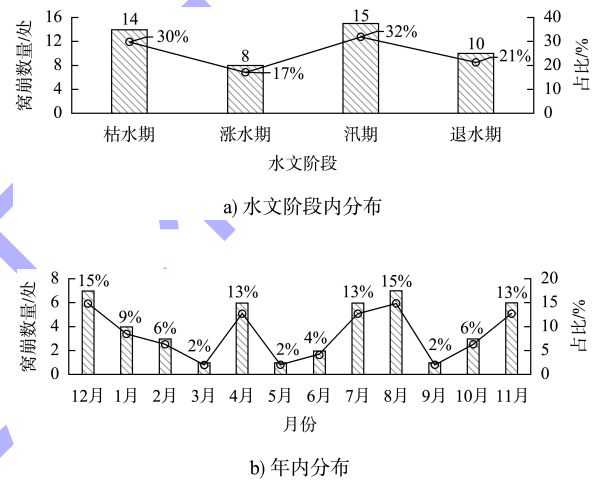


图 4 1973—2021 年长江中下游窝崩现象的年内时间分布及数量占比

Fig. 4 Annual temporal distribution and proportion of arc-shaped bank erosion in middle reaches of the Yangtze River from 1973 to 2021

### 2.3 空间分布特点

长江中下游窝崩现象的空间分布与沿程河势变化及河岸土体特性密切相关, 主要集中于大通—江阴河段, 且大多出现于主流顶冲或贴岸段, 如弯道凹岸、江心洲的洲头和洲尾。1973—2021 年长江中下游窝崩现象的空间分布情况见图 5, 可以看出, 大通—江阴河段窝崩数量最多, 为 34 处, 占总数量的 72%; 其次是湖口—大通河段, 为 5 处, 占比为 10%; 荆江段和城陵矶—湖口段窝崩数量最少, 均为 4 处, 占比均为 9%。从下游窝崩的南北分布上来看, 南岸窝崩数量略多于北岸, 其中位于北岸的窝崩数量为 18 处, 占比 46.2%, 南岸 21 处, 占比 53.8%。



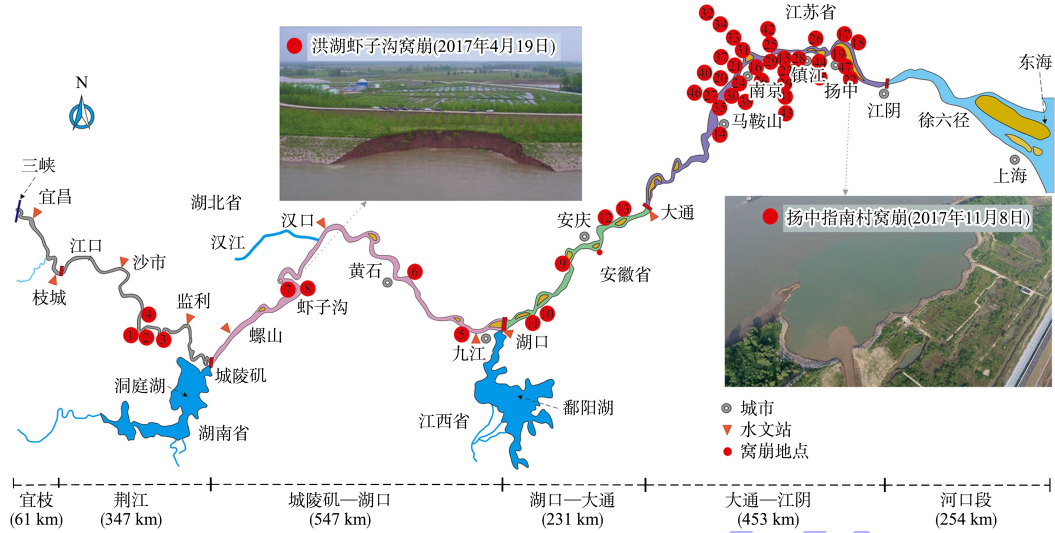


图 5 1973—2021 年长江中下游窝崩现象空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of arc-shaped bank erosion in middle and lower reaches of the Yangtze River from 1973 to 2021

大通—江阴河段窝崩频繁发生的原因之一在于该河段河岸土体特性较差。中下游以大通为界，大通以上为径流河段，其流量、水位基本不受潮汐影响；大通以下为感潮河段，水位及流量受潮汐影响大，水位变动速率较径流河段偏大。感潮河段的潮流过程会造成水位变动区的河岸土体处于干湿循环状态。研究表明，在干湿循环作用下，土体内部的裂隙反复张开闭合，逐渐发育、汇集，并由密实状态逐渐变为内部裂隙发育的松散状态<sup>[19]</sup>。在土体特性方面表现为抗剪强度参数（内摩擦角和黏聚力）随着干湿循环次数的增加而减小，并且干湿循环 4 次之后抗剪强度参数趋于稳定<sup>[20]</sup>。因此，下游潮位过程通过影响水位变动区的河岸土体特性来影响河岸稳定性。

### 3 中下游窝崩形成特点

#### 3.1 窝崩形成条件与过程

根据窝崩形成条件性质的差异，可将其分为水动力条件和河床边界条件，见图 6。前者主要包括近岸水流流速、局部区域水流紊动、河道水位涨落等条件，后者主要涉及近岸深槽楔入河岸、河岸形态及土体组成、边界抗冲性不连续等。

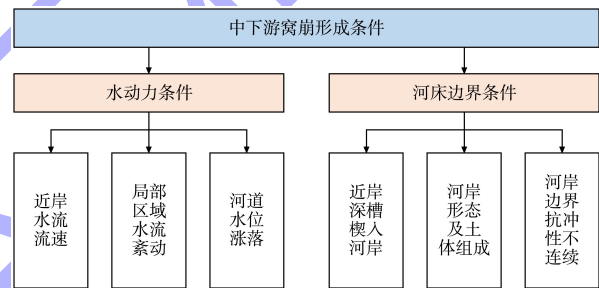


图 6 长江中下游窝崩的形成条件

Fig. 6 Formation conditions of arc-shaped bank erosion in middle and lower reaches of the Yangtze River

近岸深槽楔入河岸是中下游大尺度窝崩现象的主要形成条件。依据实测地形资料，发现大尺度窝崩形成前附近河床均存在深槽楔入河岸的现象。此外，在河岸边界抗冲性不连续处（如护岸工程空白段）和局部区域水流紊动强度大的区域（如丁坝下游），也易因水流淘刷形成窝崩，但此种窝崩数量相对较少且尺度较小。如 2010—2012 年中游荆江沙市河段腊林洲守护工程施工过程中先后出现了 5 次窝崩，窝塘长度为 40~65 m，宽度为 20~30 m<sup>[21]</sup>。

中下游典型大尺度窝崩形成过程见图 7。首先局部河段河势改变，导致近岸形成深槽见图 7a)、b)。深槽形成之后，若其最深点高程、平面形态以及位置均比较稳定，则不会形成窝崩。若深槽处于

发展之中, 持续冲深, 并向河岸侧移动, 直至楔入河岸, 见图 7c), 则会导致近岸边坡陡峭, 河岸土体失去支撑力<sup>[22]</sup>, 引发崩塌, 见图 7d)。最后, 窝塘开始逐渐形成, 内部出现回流, 水动力作用进一步增强, 持续淘刷河岸边界, 引起窝塘持续变形<sup>[23]</sup>。

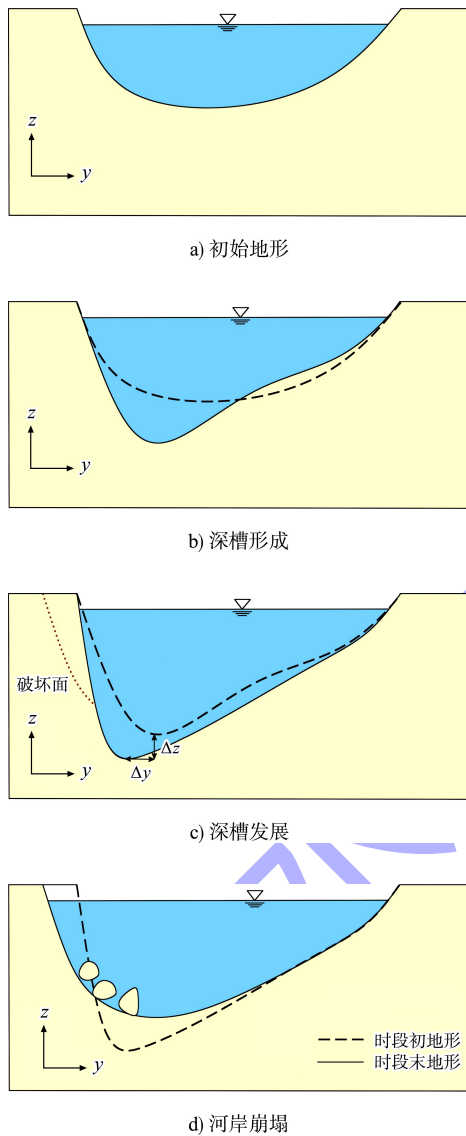


图 7 大尺度窝崩形成过程

Fig. 7 Formation process of large-scale arc-shaped bank erosion

一般情况下, 深槽在水动力条件较强(主流或回流所在)处形成, 受河型的影响较大。弯曲型河段凹岸弯顶的上、下端为深槽<sup>[24]</sup>, 2 个河弯之间的过渡段为浅滩, 浅滩的上、下游也可能出现深槽, 见图 8a)。分汉型河段深槽一般位于主汉, 若支汉发育, 也可能有深槽, 窝崩位置一般位于江

心洲洲头处或汉道中部, 见图 8b)。顺直段的深槽一般位于局部束窄处, 见图 8c)。此外, 丁坝或矶头等下游处见图 8d), 在回流的持续淘刷作用下, 一般有深槽发育<sup>[25]</sup>。根据统计, 1973 年来长江上发生的 47 处窝崩均位于上述易产生深槽的位置, 其中位于弯道凹岸或连续弯道过渡段有 17 处, 如中游洪湖肖潘和虾子沟窝崩; 局部束窄段 8 处, 如彭泽马湖堤和南京西坝头窝崩; 汉道或江心洲段 19 处, 如南京高家圩和镇江和畅洲窝崩; 矶头/丁坝段 3 处, 如黄冈茅山堤团林段及南京燕子矶窝崩。

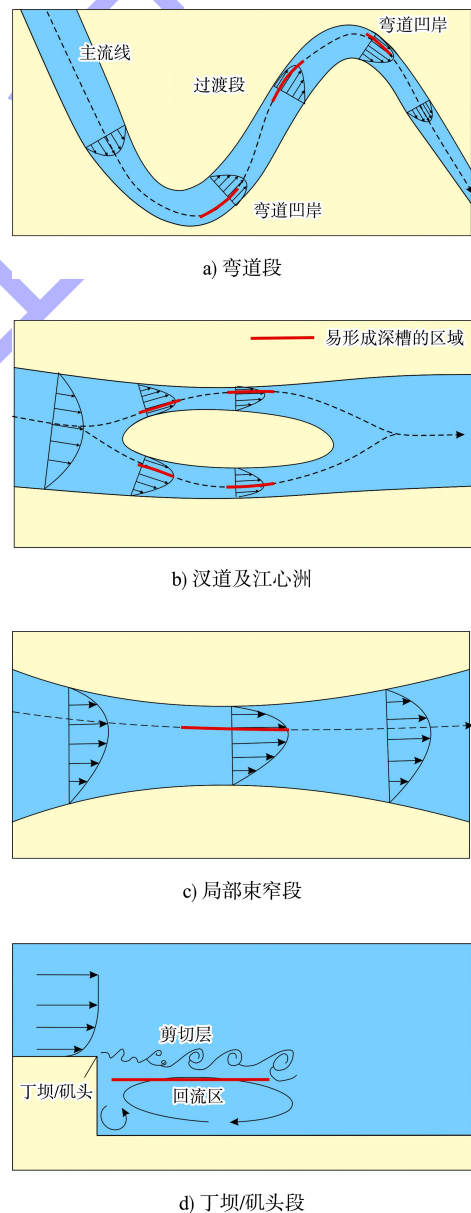


图 8 易形成深槽的河段

Fig. 8 River sections prone to forming deep troughs

### 3.2 典型窝崩形成原因

长江下游扬中指南村段窝崩险情发生于2017年11月8日，窝塘长540 m、宽190 m。根据资料分析，该处窝崩形成的主要原因为：上、下游的深槽均向窝崩处移动，导致指南村处深泓点持续冲深，使岸坡失去支撑力，最后在近岸水流持续冲刷下河岸发生崩塌。

1999年以来扬中段太平洲左汊深泓线的变化过程见图9，可以看出，扬中段深泓由落成洲左汊经嘶马弯道后在窝崩发生处(指南村)变为贴向右岸。1999—2006年，窝崩下游处浅滩上移，导致主流在窝崩处分流。2011年鳊鱼沙洲头守护工程实施以后，浅滩位置及形态相对固定，近岸深槽得以持续发展。鳊鱼沙洲头守护工程实施前后-10 m心滩的平面形态变化见图10，可以看出工程实施后心滩的平面形态相对稳定，长约3 700 m、宽约450 m，面积约为109万 m<sup>2</sup>。

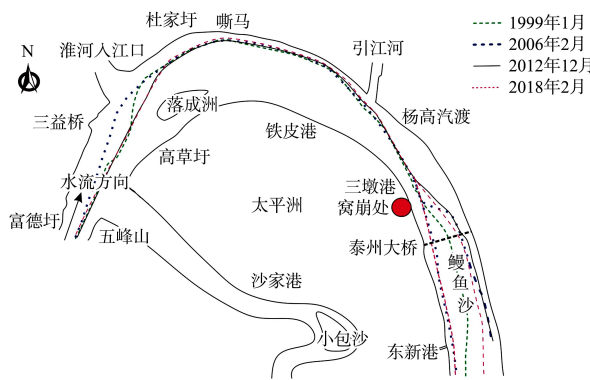


图9 1999年以来扬中段太平洲左汊深泓线的变化  
Fig. 9 Changes in the deepwater channel line in Taipingzhou left branch at Yangzhong section since 1999

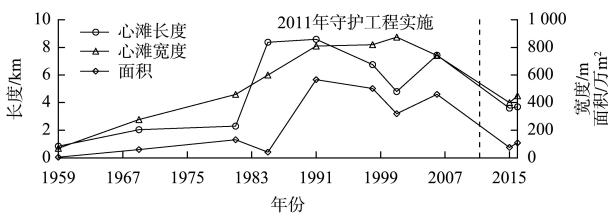


图10 鳊鱼沙洲头守护工程实施前后-10 m心滩平面形态变化

Fig. 10 Changes in planform morphology of -10 m shoal head at Manyusha before and after implementation of protective engineering

扬中指南村窝崩处水下地形变化见图11，可知窝崩处上、下游各有一处深槽(称为上、下深

槽)，且在2011年4月已形成。在2011年4月、2015年和2017年8月，下深槽中-40 m等深线距窝崩处的距离分别为291、267、99 m。因此在2011年4月—2017年8月，深槽的演变规律为垂向上近岸最低点持续冲深，平面上位置逐渐向河岸侧移动。

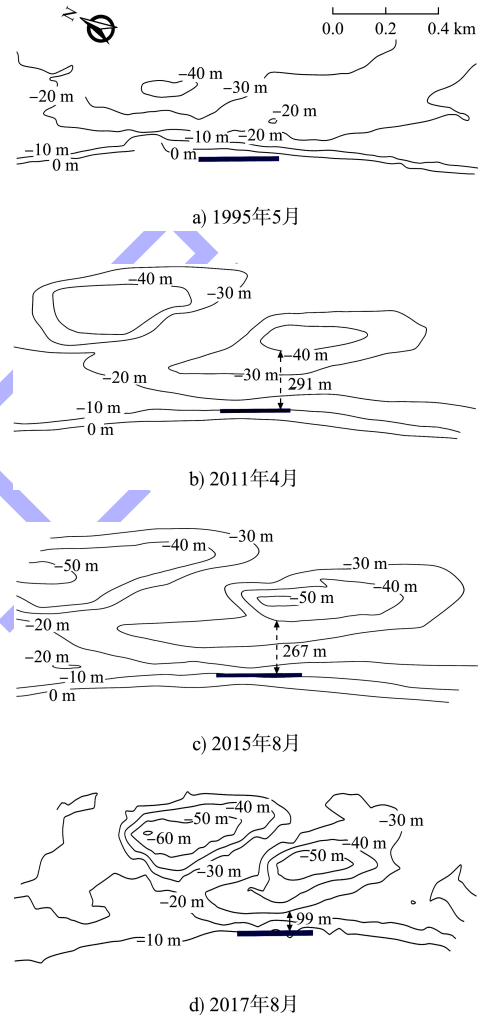


图11 扬中指南村窝崩处水下地形变化  
Fig. 11 Subaqueous topographic change at arc-shaped bank erosion zone of Zhinan Village in Yangzhong

上、下深槽的移动改变了窝崩处断面形态。指南村窝崩处的断面形态变化与河岸土体垂向分层见图12。可以看出，2001年9月—2011年10月，窝崩处断面形态变化不大，平滩面积仅由3.187 8万 m<sup>2</sup>增大至3.219 9万 m<sup>2</sup>，变化幅度仅1%。2011年10月—2017年8月断面形态变化幅度较大，平滩面积增大至3.962 7万 m<sup>2</sup>，变化幅度达23%，并且深泓点冲深16 m，河岸坡比由1:8.3增大至1:7.9，

主要原因在于上、下深槽分别向下游和上游移动, 至 2017 年 8 月均移动至窝崩处的断面。此时深泓至左岸的距离为 398.3 m, 与平滩河宽之比为 0.18, 可见深泓并未紧贴右岸, 且河岸坡比(1:7.9)远小于虾子沟发生窝崩前的坡比(1:3.6)。但 2017 年 11 月 8 日发生了窝崩险情, 原因可能在于指南村处河岸上部较陡, 下部较缓, 坡脚处提供了较大的支撑力, 当这部分坡脚被水流淘刷后, 河岸稳定性降低<sup>[26]</sup>, 导致岸坡表层的土体出现蠕动变形<sup>[27]</sup>, 并开始不断坍塌, 随后变形逐渐向河岸上部发展, 最终导致坡体整体位移而变形。

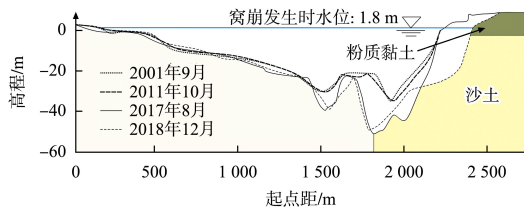


图 12 指南村窝崩处断面形态变化与河岸土体垂向分层  
Fig. 12 Cross-section morphology change and vertical stratification of riverbank soil at arc-shaped bank erosion zone of Zhinan Village

指南村处河岸上部土体由粉质黏土组成, 厚约 10.6 m, 平均液性指数为 1.7, 土体呈流塑状态, 易发生滑坡破坏<sup>[28]</sup>。下部粉沙层大于 10 m, 基本不含黏粒, 沙粒含量介于 61.2%~91.8%, 中值粒径约为 0.13 mm。2017 年河岸下层沙土的起动流速及相应水深处的水流流速见图 13。可以看出, 坡脚处沙土的起动流速为 0.604~0.632 m/s, 岸坡处水流流速为 0.290~1.545 m/s。2017 年 3 月 23 日—11 月 12 日岸坡均处于被冲刷状态。窝崩发生时, 岸坡处的水流流速(0.697 m/s)仍大于沙土起动流速(0.613 m/s), 使河岸土体崩塌后能被近岸水流挟带进入主流。

2017 年 11 月 8 日扬中指南村处潮位与窝崩状态随时间的变化见图 14。可以看出, 窝崩发生时(5 时 30 分)潮位开始上涨; 至 8 时 49 分, 潮位处于上升阶段; 现场观测结果表明<sup>[29]</sup>, 9 时 20 分左右崩岸速率明显加快, 至 17 时 46 分速率逐渐减小, 窝塘趋于稳定, 潮位处于下降阶段。由此可见, 感潮河段的窝崩形成过程可能受潮位变化

的影响, 在涨潮时, 崩塌速率较小, 在落潮时, 崩塌速率较大。

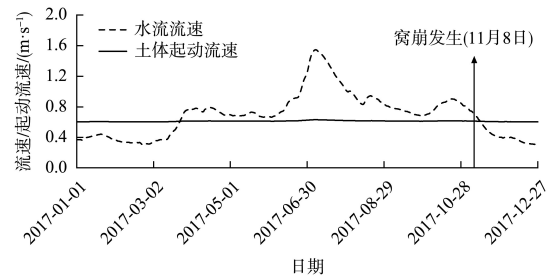


图 13 2017 年指南村窝崩岸坡处近岸水流流速与土体起动流速的变化过程

Fig. 13 Variation process of nearshore flow velocity and soil starting velocity at arc-shaped bank erosion zone of Zhinan Village in 2017

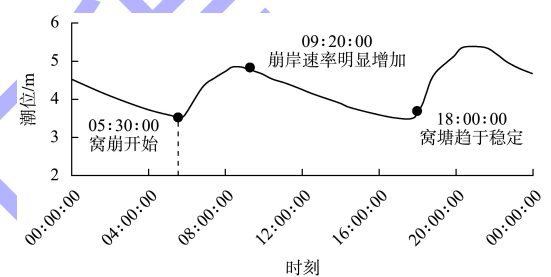


图 14 2017 年 11 月 8 日扬中指南村处潮位与窝崩状态变化  
Fig. 14 Change in tidal levels and arc-shaped bank erosion status at Zhinan Village, Yangzhong on November 8, 2017

#### 4 结论

1) 三峡工程运用后, 窝塘长度达 300 m 以上的大尺度窝崩比例由工程运用前(1973—2002 年)的 21% 增加至 36%。从年内时间分布来看, 中下游窝崩多发生于汛前的 4 月、汛期的 6—8 月及汛后的 11—12 月, 约占总数量的 68%, 但在三峡工程运用后窝崩现象多集中于汛后 11—12 月发生。

2) 从空间分布来看, 在长江中下游大通—江阴河段窝崩现象发生数量最多, 占总数量的 72%, 且位置多出现于主流顶冲或贴岸段, 如弯道凹岸、江心洲的洲头和洲尾。大通—江阴河段窝崩频繁发生的原因在于: 大通以上为径流河段, 其流量、水位基本不受潮汐影响; 大通以下为感潮河段, 水位及流量受潮汐影响大, 水位变动速率较径流河段偏大。

3) 长江中下游大尺度窝崩现象的形成过程首先从局部河段河势改变开始, 形成近岸深槽; 然后深槽面积逐渐增大、最深点持续冲深, 且向河



岸侧持续移动,直至深槽楔入河岸,近岸边坡陡峭,在近岸水流的持续作用下,引发河岸崩塌。

#### 参考文献:

- [1] 张幸农,牛晨曦,假冬冬,等.流滑型窝崩水流结构特征及其变化规律[J].水科学进展,2020,31(1):112-119.  
ZHANG X N, NIU C X, JIA D D, et al. Flow structure characteristics and changes in a simulated riverbank nest-shaped flow slide[J]. Advances in water science, 2020, 31(1): 112-119.
- [2] 张幸农,应强,陈长英,等.江河崩岸的概化模拟试验研究[J].水利学报,2009,40(3):263-267.  
ZHANG X N, YING Q, CHEN C Y, et al. Generalized model study on mechanism of riverbank failure[J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 40(3): 263-267.
- [3] 余文畴.长江中下游河道“口袋型”崩窝形成机理初步研究[J].人民长江,2007,38(6):40-42.  
YU W C. Preliminary study on the formation mechanism of “pocket-shaped” collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Yangtze River, 2007, 38 (6): 40-42.
- [4] 辛玮琰,刘晓菲,刘鹏飞,等.长江中游航道整治建筑物作用区水沙特性研究综述[J].水运工程,2022(7):185-191.  
XIN W Y, LIU X F, LIU P F, et al. Overview of research on flow and sediment characteristics of action areas of waterway regulation structures in middle reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2022(7): 185-191.
- [5] 张幸农,假冬冬,应强,等.长江下游窝崩机理及其治理技术[J].中国防汛抗旱,2022,32(9):1-6.  
ZHANG X N, JIA D D, YING Q, et al. Mechanism and treatment technology of nest-shaped bank collapsing in the Lower Yangtze River [J]. China flood & drought management, 2022, 32(9): 1-6.
- [6] 余文畴,苏长城.长江中下游“口袋型”崩窝形成过程及水流结构[J].人民长江,2007,38(8):156-159.  
YU W C, SU C C. Formation process and flow structure of “pocket-shaped” collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Yangtze River, 2007, 38 (8): 156-159.
- [7] HACKNEY C, BEST J, LEYLAND J, et al. Modulation of outer bank erosion by slump blocks: disentangling the protective and destructive role of failed material on the three-dimensional flow structure[J]. Geophysical research letters, 2015, 42(24): 10, 663-10, 670.
- [8] 卢金友,等.长江中下游河道整治理论与技术[M].北京:科学出版社,2020.  
LU J Y. Theory and technology of river regulation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [9] 夏军强.长江中下游河道崩岸机理与预警治理[J].中国防汛抗旱,2022,32(9):7.  
XIA J Q. Mechanism and early warning management of bank collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. China flood & drought management, 2022, 32(9): 7.
- [10] 水利部长江水利委员会.长江泥沙公报2020[M].武汉:长江出版社,2020.  
Changjiang Water Resources Commission. Changjiang sediment bulletin 2020 [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2020.
- [11] 张幸农,蒋传丰,陈长英,等.江河崩岸的类型与特征[J].水利水电科技进展,2008,28(5):66-70.  
ZHANG X N, JIANG C F, CHEN C Y, et al. Types and features of riverbank collapse [J]. Advances in science and technology of water resources, 2008, 28(5): 66-70.
- [12] 李宝璋.浅谈长江南京河段窝崩成因及防护[J].人民长江,1992,23(11):26-28.  
LI B Z. Causes and protection of scour-type bank collapse in Nanjing reach of the Yangtze River [J]. Yangtze River, 1992, 23(11): 26-28.
- [13] 夏细禾,路彩霞.河岸窝崩灾害与治理措施的研究[J].长江科学院院报,2001,18(6):11-14.  
XIA X H, LU C X. Research on disaster and regulation measures of  $\Omega$ -caving bank at river channel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(6): 11-14.
- [14] 吴永新,周玲霞,吴昊,等.长江南京河段崩岸规律及预警措施[J].水利水电快报,2017,38(11):99-102.  
WU Y X, ZHOU L X, WU H, et al. Bank collapse law and early warning measures in Nanjing reach of the Yangtze River [J]. Express water resources & hydropower information, 2017, 38(11): 99-102.
- [15] 罗龙洪,苏长城,应强,等.长江扬中河段指南村窝崩应急治理及效果分析[J].江苏水利,2020(2):25-28.  
LUO L H, SU C C, YING Q, et al. Emergency treatment and effect analysis of arc collapsing in Zhinan Village, Yangzhong Reach of the Yangtze River [J]. Jiangsu water resources, 2020(2): 25-28.

- [16] 冷魁. 长江下游窝崩形成条件及防护措施初步研究[J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 281-287.  
LENG K. Preliminary study on formation conditions and protection measures of scour-type bank collapse in the lower Yangtze River [J]. Advances in water science, 1993, 4(4): 281-287.
- [17] 成浩, 王造根. 长江重要堤防隐蔽工程护岸工程运行状况和效果分析[J]. 中国水利, 2006(16): 34-35, 37.  
CHENG H, WANG Z G. Operation and effect of bank revetments of hidden works in major levees of the Yangtze River[J]. China water resources, 2006(16): 34-35, 37.
- [18] 岳红艳, 吕庆标, 朱勇辉, 等. 河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 15-20.  
YUE H Y, LYU Q B, ZHU Y H, et al. Experimental study on the influence of water level fluctuation on bank collapse in river bank slope [J]. Yangtze River, 2021, 52(S2): 15-20.
- [19] 曹玲, 罗先启. 三峡库区千将坪滑坡滑带土干-湿循环条件下强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 93-97.  
CAO L, LUO X Q. Experimental study on strength characteristics of soil in Qianjiangping landslide sliding zone in Three Gorges Reservoir area under dry-wet cycle conditions[J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(S1): 93-97.
- [20] 邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2629-2638.  
DENG H F, XIAO Y, FANG J C, et al. Deterioration law of shear strength of soil in the slope subsidence zone and its influence on bank stability under dry-wet cycles[J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(9): 2629-2638.
- [21] 刘凯, 唐明. 荆江河道岸坡窝崩防治及处理方法[J]. 中国水运, 2012(4): 42-43.  
LIU K, TANG M. Prevention and treatment methods of scour-type bank collapse in Jingjiang River [J]. China water transport, 2012(4): 42-43.
- [22] 唐东旗, 姚秀芳, 焦玲, 等. 工程开挖尺度对黄土边坡稳定性影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1151-1155.  
TANG D Q, YAO X F, JIAO L, et al. Influence of engineering excavation scale on loess slope stability[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2015, 13(6): 1151-1155.
- [23] 高清洋, 杨阳, 程小兵, 等. 长江中下游护岸工程段崩岸原因分析: 以彭兴洲—江心洲段为例[J]. 水道港口, 2017, 38(1): 38-44.  
GAO Q Y, YANG Y, CHENG X B, et al. Cause analysis of revetments collapse in Pengxingzhou - Jiangxinzhou reach of the Yangtze River [J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(1): 38-44.
- [24] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
QIAN N, ZHANG R, ZHOU Z D. Riverbed evolution [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [25] 王媛, 李冬田. 长江中下游崩岸分布规律及窝崩的平面旋涡形成机制[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 919-924.  
WANG Y, LI D T. Exploration of distributed law of bank collapsing and plane eddy mechanism of arc collapsing along middle-lower Yangtze River [J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(4): 919-924.
- [26] 刘祥玉, 刘晓辉, 高清洋, 等. 长江中下游顺直河道水流冲刷引发崩岸的模拟试验[J]. 水运工程, 2019(4): 90-97.  
LIU X Y, LIU X H, GAO Q Y, et al. Simulation experiment of bank collapse caused by scouring in straight river section in middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2019(4): 90-97.
- [27] 姜新, 王建国, 尚岳全. 坡脚开挖影响边坡稳定的性数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(1): 89-91.  
JIANG X, WANG J G, SHANG Y Q. The effect of foot excavation upon the slope stability through numerical analysis [J]. Low temperature architecture technology, 2011, 33(1): 89-91.
- [28] 闻云呈, 贾梦豪, 张帆一, 等. 长江扬中河段典型岸段江岸稳定性研究[J]. 水道港口, 2022, 43(4): 457-465, 548.  
WEN Y C, JIA M H, ZHANG F Y, et al. Research on the riverbank stability of the Yangzhong reach in the Yangtze River [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(4): 457-465, 548.
- [29] 罗龙洪, 苏长城, 应强, 等. 长江扬中河段指南村窝崩原因分析[J]. 江苏水利, 2019(S2): 65-69, 80.  
LUO L H, SU C C, YING Q, et al. Analysis on the causes of arc collapsing in Zhinan Village Yangzhong Reach of the Yangtze River [J]. Jiangsu water resources, 2019(S2): 65-69, 80.