



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Hydraulic Engineering—Article

长江干流水下岸坡侵蚀自动识别

颜阁^a, 程和琴^{a,c,*}, 姜泽宇^a, 滕立志^a, 唐明^a, 石天^a, 姜月华^b, 杨国强^b, 周权平^b

^a State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200000, China

^b Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210000, China

^c Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200000, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 May 2020

Revised 22 November 2020

Accepted 3 March 2021

Available online 9 September 2021

关键词

多波束测深数据

形态要素

河岸侵蚀

水下陡坎

冲刷坑

崩岸

摘要

识别河岸侵蚀的风险是确保早期预警和预防或控制包括长江在内的河流集水区崩岸的一项重要挑战。本文引入一种基于地貌要素的算法,通过调整多波束回波探测数据的平坦度来提取河岸侵蚀信息。该算法绘制了10个水下地貌形态要素,包括坡、坡脚、水平面、脊、顶、谷、凹陷、凸起、坑和坡肩。利用21个平坦度值构建水下河岸侵蚀特征的识别策略。结果表明:当平坦度为10°时,作为侵蚀载体的岸坡陡坎被坡要素覆盖。平坦度为0°时,冲刷坑和岸坡破坏由河岸附近的坑要素和岸坡中的凹陷表示。河道水下沙波是加速河岸侵蚀的重要因素,尤其是靠近河岸坡脚的沙波;沙波的临界平坦度为3°。分析了水下地貌形态要素的分布,并用于绘制河岸侵蚀库存图。分析结果表明,近岸区水深较大,易形成较大的冲刷坑和较长的河岸陡坎。窝崩往往发生在较长的岸坡处,以缩短其长度。经讨论陆地、海洋和河流环境中平坦度值的不同设置,得出的结论是,多样化的平坦度值能够显著识别河流水下地貌形态。因此,本研究为基于平坦度的河流水下地貌形态要素识别提供参考,增强了从大量多波束测深数据定位水下岸坡失稳迹象与风险的能力。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

河岸侵蚀在任何河流系统中都是一个严重的问题,因为它可以贡献集水区总沉积物负荷的大部分[1–3]。它对河道附近的建筑物造成破坏和土地流失,从而导致河床和洪泛区的各种改变[4–5]。自三峡大坝截流以来,长江中下游干流侵蚀加剧,岸坡失稳频发。大坝下游冲积河流的河岸侵蚀对防洪管理很重要,这一话题最近受到广泛关注[6–7]。使用多个时期的观测记录对侵蚀速率的评估已经进行了数十年[8–10]。许多研究集中在使用基于地理信息

系统(GIS)的脆弱性分区技术[11–12]以及将河岸稳定性与河流过程(如坡脚侵蚀[13]和河床变形[14])相结合对河岸侵蚀进行建模。最近,新型测量仪器已应用于分析河岸侵蚀的机制,包括陆基激光扫描仪、声学多普勒流速剖面仪和多波束测深系统[15]。运动摄影测量法以及高分辨率地形数据已用于监测水面以上的河岸侵蚀[16]。然而,长江中下游干流大多数河岸侵蚀发生于水下,其大部分岸坡被水淹没。识别水下河岸侵蚀已成为早期发出警报的关键,因此对决策者和规划者来说是一个重要而紧迫的问题。

* Corresponding author.

E-mail address: hqch@sklec.ecnu.edu.cn (H. Cheng).

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering*, 2022, 19(12): 50–61

引用本文: Yan Ge, Heqin Cheng, Zeyu Jiang, Lizhi Teng, Ming Tang, Tian Shi, Yuehua Jiang, Guoqiang Yang, Quanping Zhou. Recognition of Fluvial Bank Erosion Along the Main Stream of the Yangtze River. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.027>

多波束测深系统的测量记录提供了一种创建高分辨率测深数据的方法, 这些数据用于生成坡度[17–18]或阴影地形图[19–20], 但还需要水下地貌形态要素图, 以期获得有关河岸侵蚀的更多信息。为了绘制地貌形态要素, Wood [21]根据坡度和曲率将地表分为6个要素, 包括通道、山脊、平面、顶、坑和隘口。Macmillan等[22]应用启发式规则和模糊逻辑将地形变量(如相对凸面、凹面和平面剖面)组合在一起, 对15个要素进行分类, 包括水平峰、发散肩、上凹陷和后坡。计算技术的进步推动了越来越多方法的发展。迭代自组织数据分析技术已用于从数字高程模型(DEM)中提取10个要素[23]。将顶帽法与Wood法相结合, 使用坡度、曲率和高程的阈值从DEM生成9个要素, 包括山脊、肩坡和后坡[24]。将基于对象的图像分析方法应用于高程、剖面曲率、平面曲率和坡度等4个参数的9个要素分割[25]。使用地貌要素法, 根据局部三元模式和视线原理从高程中提取陆地表面上的要素[26]。Cui等[27]也使用地貌要素法对海洋环境中相对较大尺度地貌单元的海底地貌形态要素进行分类。此外, 在描述海底沙波时, 地貌要素法优于Wood的标准[28]; 还应用了另一种基于测地线形态测量法的方法自动提取沙波的波峰和波谷[29]。

在河流系统中, 算法技术可以有效自动提取地貌形态要素。本研究应用地貌形态要素识别水下河岸侵蚀特征, 包括河岸陡坎、河岸破损和冲刷坑, 以及河岸坡脚和沙波。河岸陡坎是河岸侵蚀的载体。河岸破损和冲刷坑则是河岸侵蚀的遗迹。河岸坡脚在河岸侵蚀期间后退并影响河岸稳定性。沙波的移动改变了河床形态并影响流场环境, 进而部分影响河岸侵蚀过程, 特别是当沙波在河岸附近发育时。我们应用了地貌要素法, 因为它在不同区域具有灵活性[26–27,30–35]。我们的研究可以与许多现有研究区分开来, 因为它分析了平坦度对地貌要素制图的重要性。

2. 研究区域

本文研究范围就在长江干流和洞庭湖交汇处的上游, 位于三峡大坝下游约390 km处。研究区呈S形, 长25 km, 位于东经113°4′~113°8′、北纬29°26′~29°30′。该研究区的北部和南部分别与湖北省和湖南省接壤。图1(a)显示了2015年长江中游航道图生成的水深、浅水区(水深0 m以上区域)和河岸矢量, 数字处理基于1958年长江航道基准和1985年国家高程基准。研究河段可分为七洲至城陵矶、林角佬至七洲、林角佬上游等河段。河床浅水区表层沉积物为中细砂, 枯水期暴露在水面以上。

该河段的岸滩侵蚀很严重。根据2019年的一项调查, 主航道沿线几乎所有的河岸都面临崩塌。崩岸分为洗崩、条崩和窝崩[36–37]。我们的现场调查表明, 沿河岸的条形和弧形崩岸是该河段最普遍的破坏模式。尽管采取了河岸保护措施, 但河岸陡坎仍然面临严重的失稳风险(附录A中的图S1)。天然河流岸滩上部地层由固结度高的黏性土组成, 坡脚的松散砂层在河岸切割作用下致上部地层失去支撑, 其为条崩的产生机理[38]。而窝崩具有高度破坏性, 通常发生在冲刷深度和曲率相对较大的凹岸顶冲部位[39]。崩岸影响河道演变, 改变河势。在河道演变过程中, 深泓线的摆动与河道的侵蚀可能导致河岸崩塌。如果不及时控制河岸沿线的崩塌, 可能会加剧河势的进一步调整[40]。

3. 研究方法

3.1. 数据采集

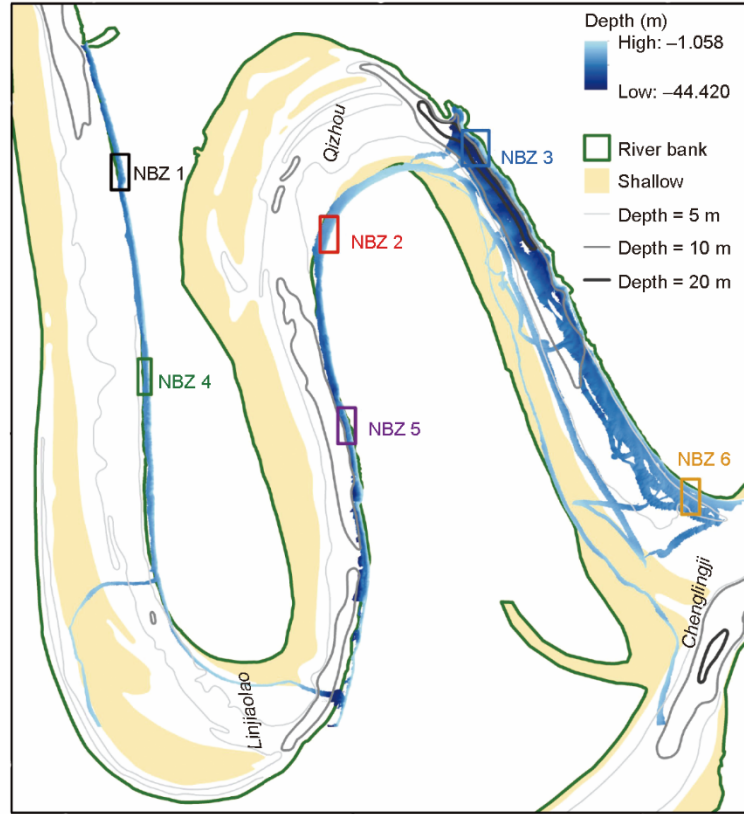
现场测量于2019年8月27–29日进行。使用频率为200/400 kHz的Reson SeaBat T50-P多波束测深系统在1~45 m的水深处获取测深数据。数据采用差分全球定位系统(DGPS)定位并使用美国Teledyne PDS软件包进行处理。为了确保水深的数据收集, 搭载多波束测深系统的珠海云州M80无人艇船速控制在8节以内。投影参考系统选用通用横轴墨卡托(UTM) 50 N。多波束测深系统扫描全长72.32 km, 主要扫描林角佬上游左岸邻带、林角佬至七洲右岸邻带、七洲至城陵矶主航道。

然后, 我们使用最新版本PDS软件中的编辑工具从水深点云数据中手动删除异常值。处理后的点云数据用于生成网格间距为0.5 m的格网模型, 从而在整个区域产生约1537万个网格。如图1(a)所示, 将格网模型导入ArcGIS 10.3版软件包中, 用作地貌要素法的输入, 绘制水下地貌形态要素以进行河岸侵蚀识别。选择6个样本区域并将其命名为“近岸区”(NBZ), 表示为NBZs 1~6, 用于以下分析[图1(b)]。

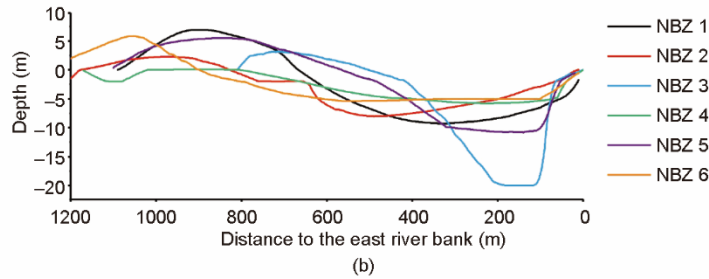
3.2. 地貌要素法和水下地貌形态要素原理

在地貌要素法中, 由Liao [41]开发的局部三元模式(LTP)方法描述了格网中心单元附近的地势类别, 并将地势作为输入, 根据局部高程识别出10个形态要素[图2(a)]。形态要素可分为三类, 包括凸要素(脊、坡肩、顶和凸起)、直要素(斜坡和水平面)和凹要素(谷、坡脚、坑和凹陷)。

实际上, LTP是根据8个高程变化趋势的组合来确定



(a)



(b)

图1. (a) 声学多波束测深数据；(b) 采样区域的横断面图。

的，从格网中心单元开始，沿着主罗盘方向 (D) 延伸到使用视线原理提取的查找距离 (L) [42]。从格网模型中提取 8 个高程剖面图，计算中心单元处的上开角 (ϕ_L^D) 和下开角 (ψ_L^D) 用于指示地形表面的开阔度，并根据剖面的高程角进行计算。每个中心单元有 8 个主罗盘方向，即北 (N)、南 (S)、西 (W)、东 (E)、东北 (NE)、西南 (SW)、西北 (NW) 和东南 (SE)，间隔 45° 。沿每个方向，根据剖面图计算一组高程角。高程角定义为将中心单元连接到纵断面上定位的点的直线与水平面之间的角度。负高程角和正高程角分别与剖面上低于和高于中心单元的点相关联。在主罗盘方向 (D) 的查找距离 (L) 内，可以根据最大高程角 (β_L^D) 和最小高程角 (δ_L^D) 计算沿查找

距离和方向的上开角和下开角，如下所示：

$$\begin{aligned}\phi_L^D &= 90^\circ - \beta_L^D \\ \psi_L^D &= 90^\circ + \delta_L^D\end{aligned}\quad (1)$$

图 2 (b) 说明了上开角 (ϕ) 和下开角 (ψ) 的概念。对于点 A ，最大和最小高程角均为负，产生大于 90° 的上开角和小于 90° 的下开角。因此，上开角和下开角都在 $0\sim 180^\circ$ 的范围内变化。对应于主罗盘方向 (D) 和查找距离 (L) 的剖面的高程变化趋势由上开角和下开角之间的差异表示。平坦度 (t)，也称为起伏阈值，是上开角和下开角之间差异的最小值，用于区分地平线与起伏线，将差异分为三个类，用 Δ_L^D 表示为：

$$\Delta_L^D = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi_L^D - \psi_L^D < -t \\ 0 & \text{if } |\phi_L^D - \psi_L^D| \leq t \\ -1 & \text{if } \phi_L^D - \psi_L^D > t \end{cases} \quad (2)$$

式中，(0)、(-1) 和 (+1) 表示来自中心单元的表面轮廓分别是水平、向下和向上的。对应于该符号的三种典型效应如图 2 (b) 所示，其中， Δ_L^D 表示为 Δ 。此外，由于每个高程剖面图都有一个 Δ_L^D ，因此计算了三元模式的 8 个符号。

Δ_L^D 在 8 个方向中的每一个方向上都有三个可能的值，可能的 LTP 总数为 3^8 (即 6561)。在考虑旋转和反射对称性后，只剩下 498 种不同的 LTP，即为地貌元型[26]。此后，Jasiewicz 和 Stepinski [26] 建立了一个陆地地貌要素的查找表[图 2 (c)]，其中，行和列分别表示三元模式中 (-1) 和 (+1) 符号的数量。使用查找表，根据 (-1) 和 (+1) 符号的数量对地貌元型进行分组，并定义 10 个地貌形态要素，其为 10 个水下形态要素。

3.3. 查找距离、跳过半径和平坦度的预设

用于有效应用地貌要素法进行水下河岸侵蚀识别的参数是查找距离 (L) 和平坦度 (t)，如方程 (2) 所示，以及跳过半径，如图 2 (b) 所示。在这里， L 确定遍历窗口

的大小。此窗口应相对较大以容纳河岸陡坎，而小窗口足以包含河岸破损和冲刷坑。当窗口大小大于某个阈值时，制图结果基本不再发生变化，因为上开角和下开角随着窗口大小的进一步增加而变化很小。使用更大的查找距离，我们可以同时识别更大范围内的要素。例如，Jasiewicz 和 Stepinski [26] 认为 50 个单元格是临界查找距离。因此，我们将查找距离设置为 100 m，这足以覆盖从河岸陡坎到河床的水深数据。没有考虑更大的窗口大小，是因为较大的查找距离会增加计算压力，但它对要素制图的贡献很小。

跳过半径用于过滤中心单元附近小地形变化的影响[图 2 (b)]。如上所述，在编辑工具中删除不明显的异常值很困难，并且中心单元附近的异常值会干扰形态要素的识别。因此，通过设置跳过半径以忽略中心单元附近的地形变化，计算从大于跳过半径的值开始。在本研究中，跳过半径为 3 m，即 N、E、S 和 W 方向在中心单元附近的 6 个单元内以及 NW、NE、SW 和 SE 方向的 4 个单元内的水深变化。

前人研究中的平坦度值从 1° 到 3° 不等[26–27,31–35]。从理论上讲，随着平坦度的降低，(-1) 和 (+1) 符号的数量都可以增加，这表明最初被水平面要素覆盖的更多水

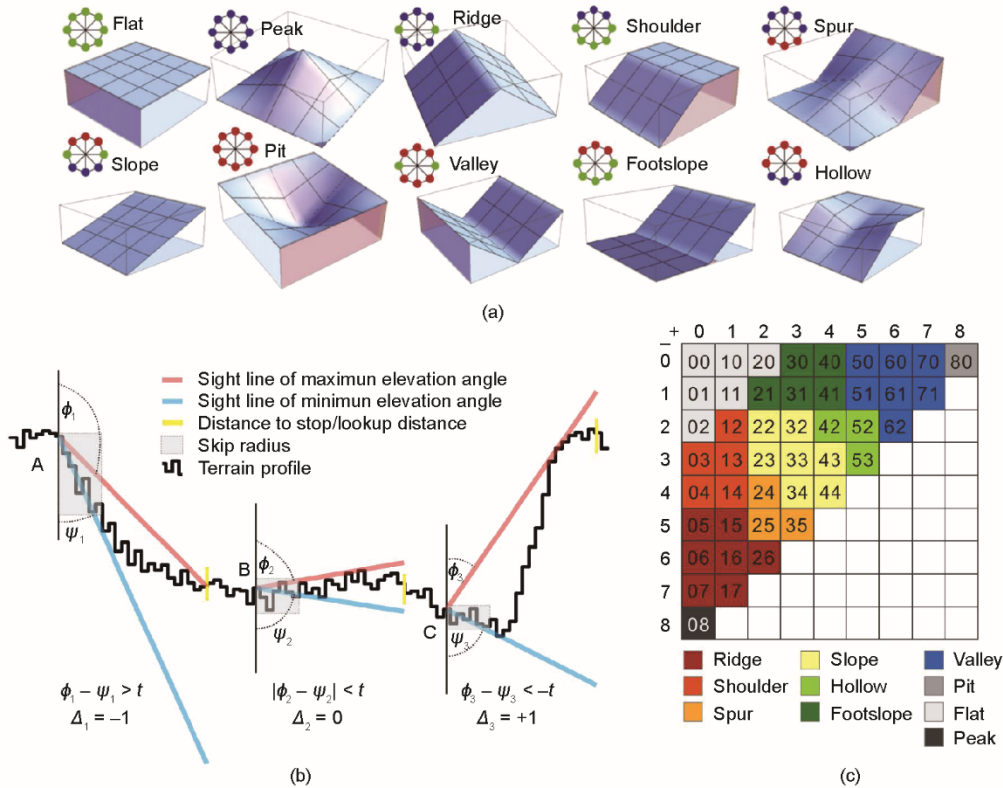


图 2. (a) 局部三元模式 (LTP) 的说明；(b) 视线原理；(c) 基于地貌形态要素自动分类中的查找表。(b) 中的 A、B 和 C 是三个中心单元，根据上开角 (ϕ) 和下开角 (ψ) 以及平坦度 (t) 之间的比较，显示了 Δ 的三个典型分配。在 (c) 中，要素是根据组合成两位数的 (-1) 和 (+1) 符号的数量定义的[26]。

下地貌表面可以归类为其他要素。调整平坦度值以生成和比较形态要素图是必要的。然后，确定适合水下地貌表面形态分类和河岸侵蚀特征识别的平坦度值。选取21个平坦度值生成形态要素图，以显示平坦度下降过程中的形态要素分布的变化趋势：40°、35°、30°、25°、20°和15°（间隔5°），以及14°、13°、12°、11°、10°、9°、8°、7°、6°、5°、4°、3°、2°、1°和0°（间隔1°）。

3.4. 形态要素制图程序

GRASS GIS 软件提供了地貌形态要素识别工具，但平坦度不能设置为零。此外，多种平坦度值条件下的形态要素识别比较耗时。我们在 MATLAB 2019b 中编写了地貌要素识别脚本。

为了增强上开角和下开角的计算，使用主罗盘方向的8个卷积在每个方向的每个时刻将测深数据矩阵移动一个单元格（图3）。移动图像在N、E、S和W方向上的距离差异是一个单元格大小，而在NE、SE、NW和NE方向上的距离差异是单元格大小的 $\sqrt{2}$ 倍。我们将(+1)和(-1)符号的数量分别保存为十位数和位数。因此，所有地貌元型都可以表示为两位数[图2(c)]，例如，52表示5(+1)和2(-1)。

使用具有 i5 3570 中央处理器（CPU）和 16 GB 内存的计算平台，当查找距离为 100 m 时，在没有并行计算的情况下大约需要 2.5 h 计算 15396×15237 矩阵中的上开角和下开角。通过比较上开角和下开角进行基于地貌要素法的形态要素分类大约需要 1 h 的计算时间。识别整个研究区域的地貌形态要素的总计算时间约为 5 h。

4. 结果

4.1. 平坦度对水下地貌形态要素识别的影响

使用各种平坦度值绘制具有不同特征的水下形态要素。图4显示了NBZs 4和6，它们用于反映形态要素分布受平坦度的影响。平坦度从40°到3°，斜坡要素的数量呈上升趋势，而平坦要素的数量变化呈相反趋势。平坦度为40°，绝大多数近岸水下区域为水平面要素。平坦度为10°时，水下岸坡为斜坡要素。平坦度小于10°时，河床斜坡、脊和谷要素逐渐增多。平坦度 $\leq 3^\circ$ 时，尽管顶要素和坑要素在脊和谷区域的中心扩展，其他要素分布模式基本保持稳定。

图5给出了形态要素分布的统计结果，表1列出了不同平坦度值条件下地貌要素法的识别结果。平坦度为

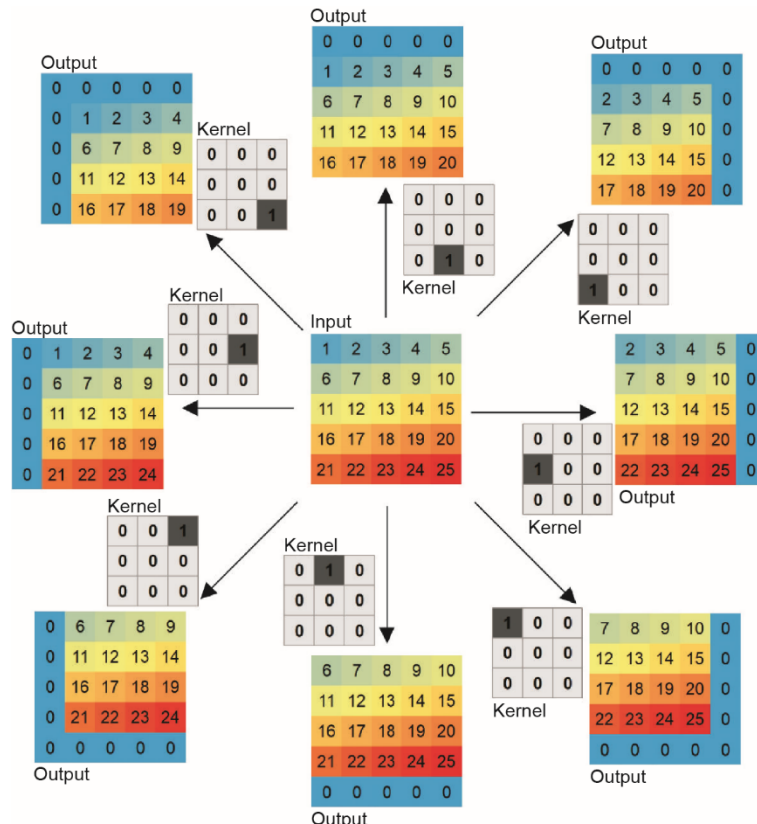


图3. 卷积移动网格模型示意图。

40°，水下地貌表面通常为水平面要素，约占面积的95%。平坦度为10°时，坡脚要素的百分比相对较大，约为9.68%~20.07%。平坦度从10°到3°时，斜坡要素增加并在接近3°时达到最大值；然而，水平面要素的百分比急剧下降并在3°时消失。结果表明，河床绝对平坦的床面极少，因为当平坦度值很小时，相对水平的床面就被识别成斜坡要素。凹陷要素和凸起要素随平坦度的降低

而增加，在0°处达到峰值，约为11.17%~20.63%。当平坦度为0°时，NBZs 1~6的坑要素也增加到最高，约为4.26%~10.33%。相比之下，水平面、坡肩和坡脚要素在平坦度为0°时消失。这可以用方程（2）来解释，其中， Δ_L^D 符号不能定义为（0）；平坦度为0°，（+1）和（-1）符号的总数为8，导致水平面、坡肩和坡脚要素消失，如图2（c）所示。

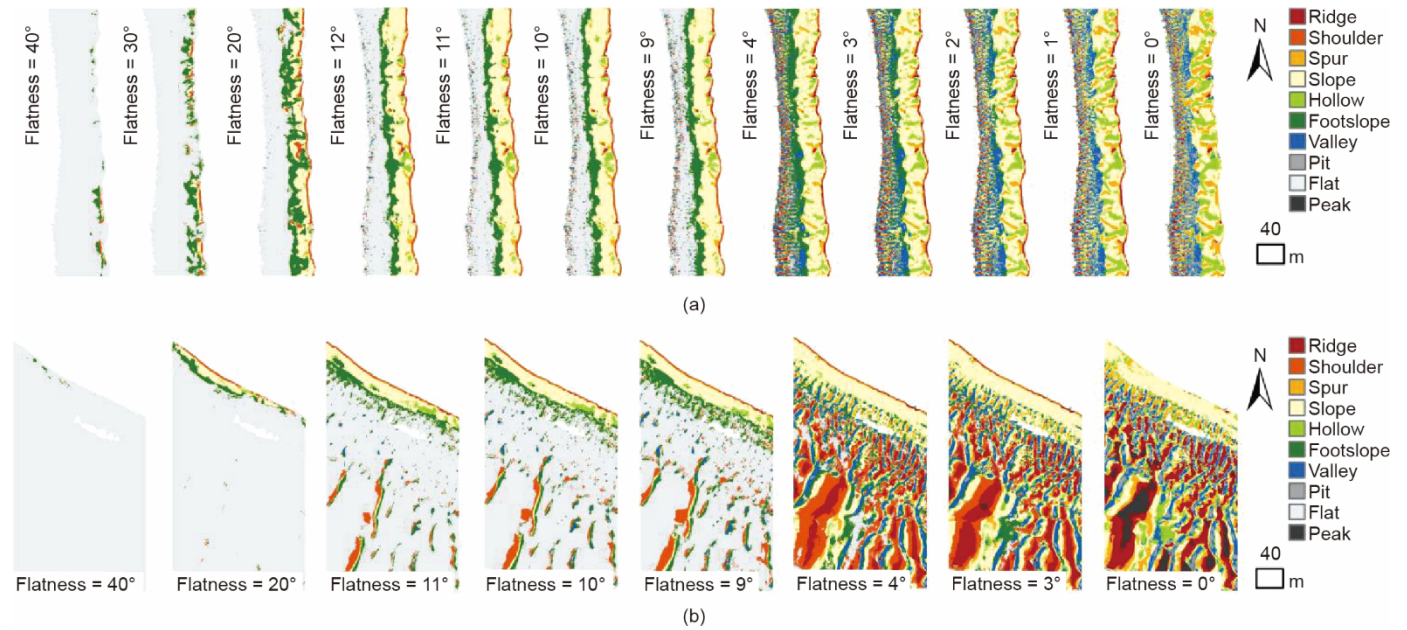


图4. NBZ 4 (a) 和NBZ 6 (b) 中，形态要素分布图随平坦度的变化。

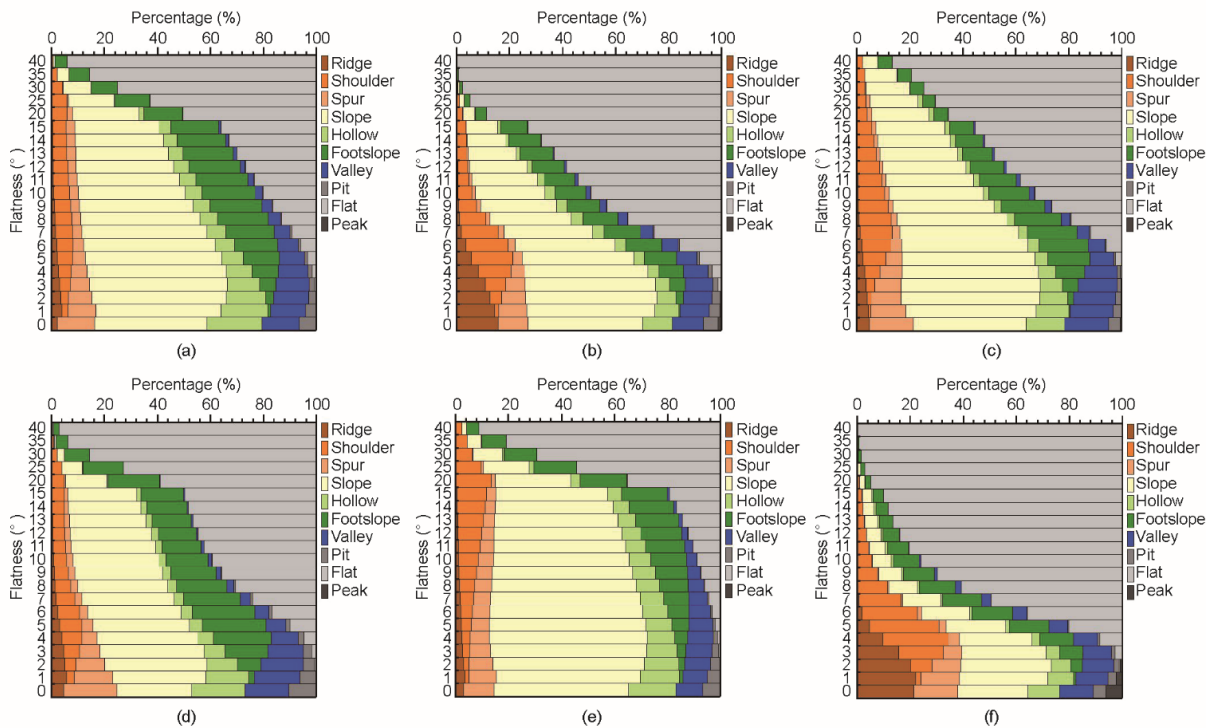


图5. (a) ~ (f) NBZs 1-6中形态要素分布面积随平坦度递减的统计结果。

表1 基于地貌要素法的10种形态要素统计结果

NBZ	Flatness (°)	Ridge		Shoulder		Spur		Slope		Hollow	
		Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)
1	10	1 042	0.93	6 697	5.97	3 545	3.16	45 557	40.58	6 835	6.09
	0	2 459	2.19	0	0	15 762	14.04	47 662	42.46	23 161	20.63
2	10	1 055	0.56	9 866	5.24	2 298	1.22	49 735	26.44	6 825	3.63
	0	29 296	15.57	0	0	21 628	11.50	81 271	43.20	21 007	11.17
3	10	1 967	0.56	35 326	10.01	5 542	1.57	125 431	35.56	7 810	2.21
	0	17 140	4.86	0	0	58 235	16.51	150 055	42.54	50 857	14.42
4	10	921	0.82	5 547	4.96	2 569	2.30	36 259	32.44	3 096	2.77
	0	5 379	4.81	0	0	22 229	19.89	31 443	28.13	22 581	20.20
5	10	1 751	1.22	10 629	7.38	8 283	5.75	73 729	51.22	11 539	8.02
	0	4 442	3.09	0	0	16 554	11.50	73 138	50.81	25 312	17.58
6	10	234	0.10	13 537	5.55	677	0.28	16 802	6.88	2,053	0.84
	0	52 495	21.51	0	0	39 795	16.31	64 864	26.58	28 781	11.79

NBZ	Flatness (°)	Footslope		Valley		Pit		Flat		Peak	
		Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)
1	10	22 525	20.07	3 182	2.83	315	0.28	22 536	20.08	21	0.02
	0	0	0	15 994	14.25	6 953	6.19	0	0	264	0.24
2	10	22 225	11.81	3 184	1.69	186	0.10	92 702	49.28	37	0.02
	0	0	0	22 055	11.72	10 400	5.53	0	0	2 456	1.31
3	10	53 444	15.15	6 664	1.89	674	0.19	115 733	32.81	156	0.04
	0	0	0	58 952	16.71	15 022	4.26	0	0	2 486	0.70
4	10	17 628	15.77	1 458	1.30	284	0.25	44 025	39.38	0	0
	0	0	0	18 453	16.51	11 551	10.33	0	0	151	0.14
5	10	19 569	13.59	5 469	3.80	115	0.08	12 869	8.94	2	0
	0	0	0	14 797	10.28	9 436	6.55	0	0	276	0.19
6	10	23 619	9.68	1 577	0.65	18	0.01	185 525	76.02	3	0
	0	0	0	31 482	12.90	11 128	4.56	0	0	15 500	6.35

4.2. 表征河岸侵蚀的形态要素

在本项研究中，河岸陡坎、冲刷坑和河岸破损用于估算水下河岸侵蚀特征。随着平坦度的降低，坡度较高的水下地貌表面被识别为斜坡要素。当斜坡要素的坡度比相对较大时，斜坡要素可以指示河岸陡坎崩塌的可能性[图6 (a)]。

冲刷坑的发展可以改变河岸陡坡的形状并加速河岸侵蚀。在河岸附近聚集的坑要素对应于冲刷坑。崩岸造成的河岸破损表示为凹陷要素。相应地，凸起要素表示崩岸的侧边界[图6 (b)]。

图6 (a) 表示分布在岸坡底部的坡脚要素，其将河岸陡坎与相对平坦的床面分开。水下沙波代表韵律地形，具有交替的脊和谷要素，为沙波的波峰和波谷[图6 (b)]。

4.3. 河岸侵蚀的关键平坦度

坡脚要素是从河岸陡坎到河床的过渡段。坡脚面积占

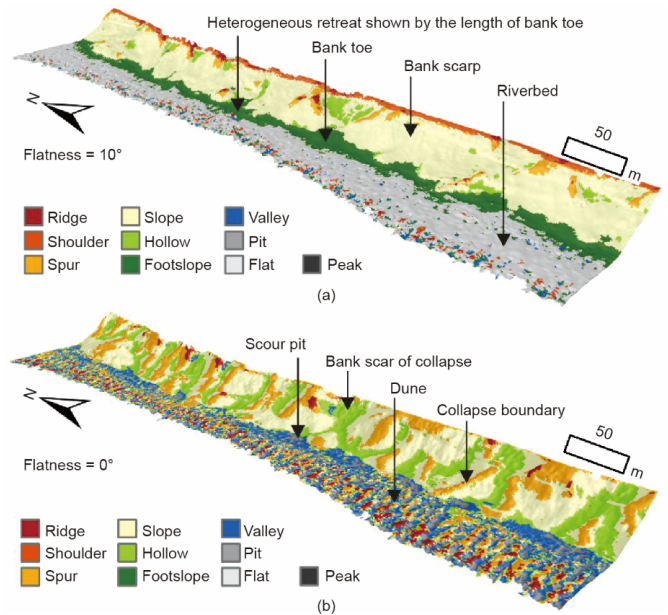


图6. 当平坦度为10°时，形态要素分布与河岸陡坎和河岸坡脚之间的关系 (a)，以及当平坦度为0°时，形态要素分布与崩岸形成的河岸破损和冲刷坑之间的关系 (b)。

比越高，陡坎与河床的边界越清晰。当平坦度为 10° 时，坡脚要素占比较大，突出河岸陡坎与河床之间的边界，将其视为关键平坦度。如图7(a)所示，此时的河岸陡坎被斜坡要素覆盖。图中还标记了6个断面位置，用于制作近岸水深剖面bp01~bp06。

图8显示了从地貌要素图中6个断面制作的剖面，可以看出，水下岸坡一般小于100 m。图8还显示，在河岸

陡坎和河床之间呈现一个地形突变。斜坡要素覆盖的剖面曲线具有 $1/3\sim 1/2$ 之间的坡比（代表坡高与水平方向上坡长投影的比值），而坡脚要素和水平面要素覆盖的曲线坡比小于 $1/5$ 。

Duan等[36]研究发现，长江中下游由细砂、亚黏土或黏土组成的稳定坡比小于 $1/3$ 。Tang等[43]认为稳定的坡比是判别河岸是否崩塌的标准。不同河流类型和地质条件

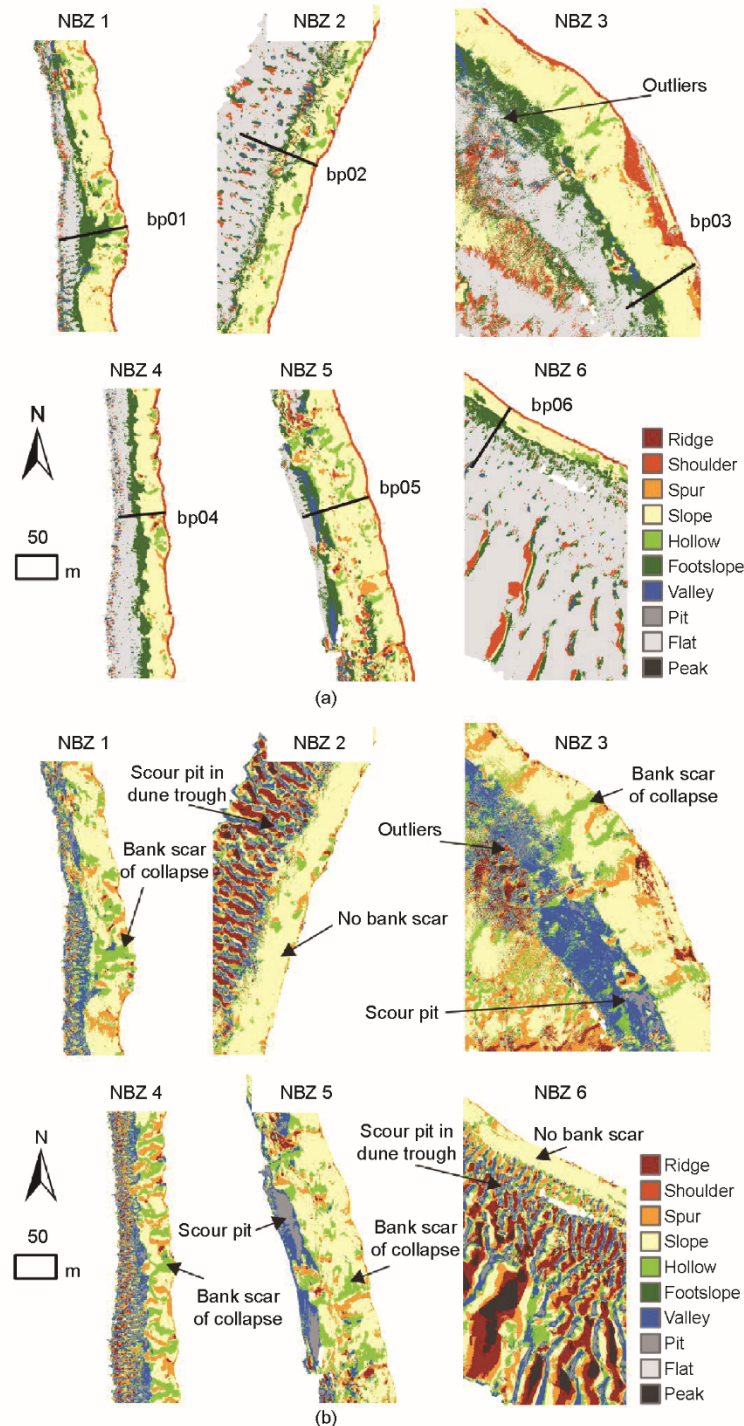


图7. 平坦度为 10° (a) 和 0° (b), NBZs 1~6中基于地貌元型的形态要素分类结果, 河岸剖面位置显示为bp01~bp06。

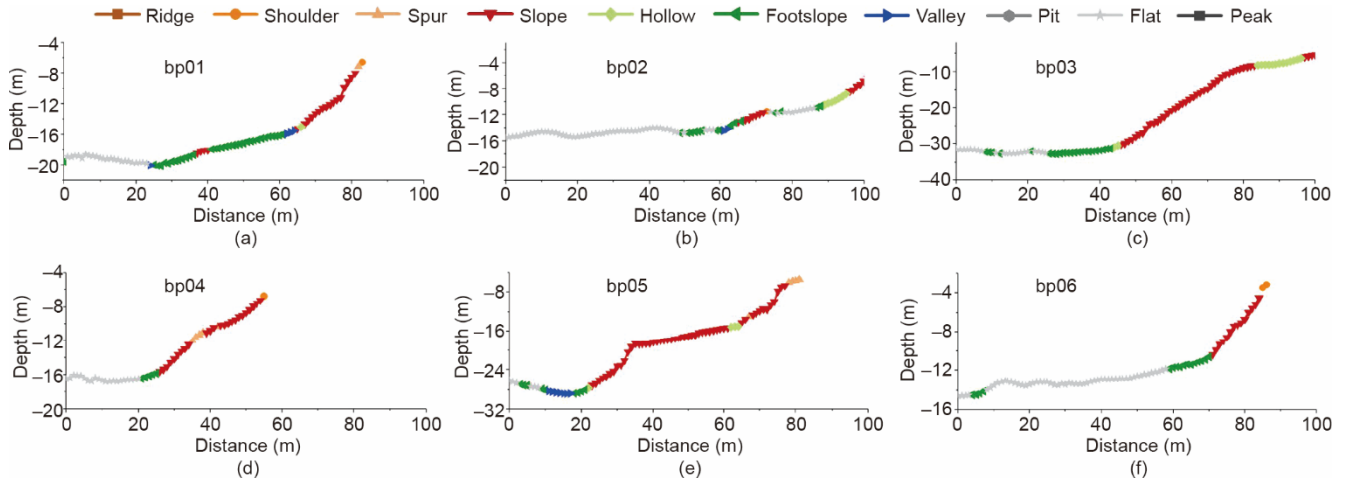


图8. bp01~bp06的河岸剖面上覆盖形态要素, 分别显示在 (a) ~ (f) 中。

下, 河岸的稳定坡比不同, 但通常约为 $1/3 \sim 1/2$ 。例如, 中细砂的稳定坡比范围最小, 为 $0.24 \sim 0.36$, 而黏土的稳定坡比最大, 为 $0.40 \sim 0.45$ 。当岸坡超过稳定坡比时, 可能会发生坍塌[44]。

在给定的平坦度为 10° 时, 坡比为 $1/3 \sim 1/2$ 的陡坎与长江的临界稳定坡比相似, 表明该部位存在崩塌的可能性。识别岸坡坡脚和河床的平坦度也应取 10° , 与河岸陡坎的平坦度相同。

图7 (b) 显示, 河岸破损和冲刷坑是河岸侵蚀的标志, 分别由凹陷要素和坑要素表示。当平坦度为 0° 时, 凹陷要素和坑要素的占有率仍较小, 不大于 $1/5$ (表1)。图4显示, 更大的平坦度会导致凹陷要素和坑要素的面积占比更少。建议以 0° 作为提取岸坡破损和冲刷坑特征的关键值, 因为其对应的要素覆盖面积最大。

沙波可视为谷要素和脊要素的组合, 其临界平坦度为 3° 。此时, 谷要素和脊要素分布在沙波的波峰和波谷的中心, 顶和坑要素的面积占比相对较低。当平坦度为 0° 时, 沙波可以通过脊和顶要素以及谷和坑要素的组合来表示 (图4), 此时, 顶要素和坑要素从脊要素区域和谷要素区域的中心扩展。平坦度 $\leq 3^\circ$ 时, 谷要素和脊要素的栅格数波动不大。因此, 用地貌要素法提取长江中游水下沙

波时, 平坦度 $\leq 3^\circ$ 提取是适合沙波识别的。

表2总结了关键平坦度值和水下地貌要素与近岸水下灾害地貌之间的对应关系。当平坦度为 10° 时, 斜坡要素与河岸陡坎相关, 而河床用水平面要素表示。在陡坎和河床之间, 坡脚要素表示河岸坡脚。当平坦度为 0° 时, 崩岸产生的破损和崩岸的边界由岸坡上的凹陷要素和凸起要素代表。冲刷坑由靠近岸坡坡脚的坑要素表示。该识别方案主要针对主河道一侧的近岸区。

5. 讨论

5.1. 河岸侵蚀分布与河势的关系

如图7所示, 地貌要素分类图显示了水下陡坎、冲刷坑、河岸破损、沙波的分布。深泓线靠近NBZs 3和5处的河岸[图1 (b)], 造成严重的冲刷。对比图7 (a) 和 (b), 冲刷坑位于河岸坡脚。在NBZs 3和5中, 冲刷坑的宽度大于 20 m , 河岸陡坎的长度约为 80 m 。在NBZs 2和6中, 当深泓线远离河岸时, 河岸坡脚处不发育冲刷坑, 河岸陡坎相对较短, 长度小于 30 m 。对于NBZs 1、2、4和6而言, 深泓线的水深小于 10 m , 冲刷坑的发育不显著。与已有研究[45–47]报道相似, 较小的冲刷坑分布在

表2 河岸侵蚀特征的形态要素识别策略

Flatness	Riverbed		Bank slope	
	Dunes	Depression	Gentle slope	Steep slope
10°	Flat → Bed	–	Footslope → Bank toe	Slope → Bank scarp
3°	Ridge → Crest of dune Valley → Trough of dune	–		
0°	Ridge and Peak → Crest of dune Valley and Pit → Trough of dune	Pit → Scour pit	Hollow → Bank scar of collapse Spur → Collapse boundary	

The strategy for the near-bank zone on the side of the main channel where depression forms along the thalweg.

沙波波谷内。而对于水深大于 11 m 的 NBZ 3 和 NBZ 5, 冲刷坑发育比较明显, 这表明, 形成较大的冲刷坑的水深在 11 m 附近。此外, 水下沙波反映了不稳定的床面形态 [48–50]。河床大部分区域被沙波覆盖, 说明河床不稳定, 处于动态调整过程中。

条崩的底部靠近水面。因此, 根据现场观察, 条崩产生的河岸破损位于水面上方。相比之下, 窝崩的底部在水下。本研究中使用多波束测深数据, 水下岸坡破损与窝崩发育位置相呼应。图 7 (b) 显示, 在 NBZ 1、NBZ 3、NBZ 4 和 NBZ 5 中, 河岸破损显著, 但在 NBZ 2 和 NBZ 6 中不存在。在窝崩位置, 陡坎长度减小。表明窝崩倾向于使岸坡陡坎后移并缩短, 进而提高岸坡的稳定性或减小潜在崩塌的规模。

虽然使用了 PDS 中的 Editing 工具来删除显著异常点, 并通过设置跳过半径, 以过滤剩余异常点对地貌要素分类的影响, 但是仍然有许多残留的异常点干扰了地貌要素识别。河床理论上应被水平面要素覆盖, 然而, 异常值则以分散点的形式出现 [图 7 (a)]。图 7 (b) 显示了导致不同要素之间轮廓不清晰的异常值。在未来的研究中, 必须减少异常值对水下灾害地貌识别的影响。

5.2. 河岸侵蚀调查制图

表 2 显示了在 ArcGIS 10.3 版本中用于指导河岸侵蚀调查制图的策略。河岸侵蚀调查制图是根据近岸单位的区域统计数据生成的。NBZ 分为 169 个单元, 间隔为 100 m。此外, 将河岸单元与平坦度值为 10° 和 0° 的形态要素图叠加, 以使用以下步骤计算河岸陡坎、河岸破损和冲刷坑的面积。首先, 根据沙波和坡脚的分布手动绘制岸坡的岸坡脚线; 根据岸坡脚线确定了岸边附近的两个区

域: 一个距岸坡脚线 50 m, 表示为多边形 A, 用于后续提取冲刷坑, 另一个是距岸坡脚线 200 m 内的岸坡侧, 表示为多边形 B, 以便随后提取岸坡陡坎和岸坡破损。其次, 使用 “Raster Calculation” 工具对形态要素图提取对象单元。以河岸破损为例, 从平坦度为 0° 的要素图中提取凹陷要素。然后, 当单元格位于河岸附近的合适位置时, 使用 “Extract by Mask” 工具选择单元格作为河岸侵蚀的要素。例如, 凹陷要素聚集形成河岸破损, 但仅保留多边形 B 内的单元。最后, 利用 NBZ 中所选单元格的叠加, 使用 “Zonal Statistics as Table” 工具计算每单位所选对象单元的面积。

总体看, 林角佬至城陵矶的河岸陡坎比林角佬上游的河岸陡坎面积更大, 河岸有更高的失稳风险。图 9 显示, 七洲至城陵矶河段, 较长的岸坡陡坎与较大面积的冲刷坑有关。当陡坎长度大于 20 m (即面积大于 2000 m^2) 时, 岸坡破损的面积较大 (面积大于 400 m^2), 表明陡坎较长的河岸容易发生崩岸。

5.3. 不同环境的地貌平坦度比较

在基于地貌要素方法描述地貌形态的多个研究中, 平坦度的设置不同。在高差约为 1000 m 的中分辨率 (10~100 m) 山区地形研究中, 平坦度常设置为 1° [26,31,33]。对于研究高差约 100 m 的中分辨率支流集水区, 平坦度也设置为 1° [35]。Kramm 等 [32] 使用了 3° 的平坦度值, 并比较了黄土高原地貌要素分类的各种栅格尺寸, 包括 5 m、10 m 和 30 m。最近, Cui 等 [27] 发现 3° 的平坦度值适合于栅格尺寸为 250 m 的海底地貌要素检测。

研究发现, 对于长江水下地貌, 平坦度大于 40° 无用, 因为此时水平面要素占据了 95% 左右的面积。绘制

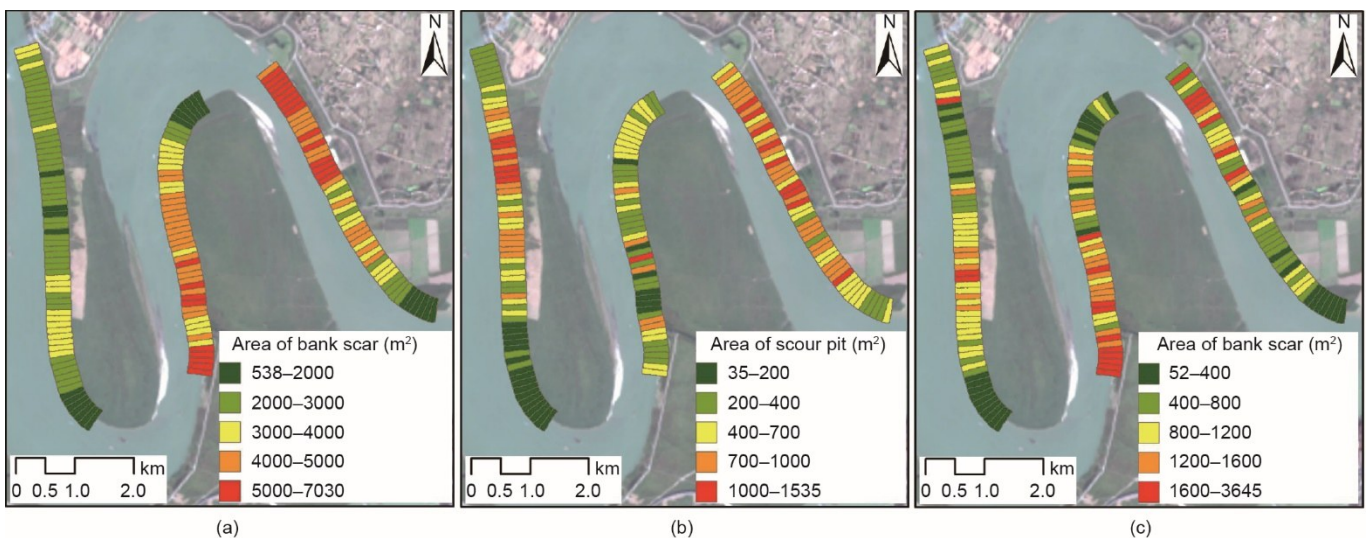


图 9. 根据河流-水下形态要素图绘制的河岸侵蚀调查图, 包括河岸陡坎 (a)、崩岸的水下河岸破损 (b) 和冲刷坑 (c)。

河流水下灾害地貌的平坦度临界值为 10° 和 0° 。当平坦度为 10° 时,水下岸坡陡坎、河岸坡脚、河床分别被斜坡要素、坡脚要素和水平面要素覆盖。当平坦度为 0° 时,由凹陷要素和坑要素指示岸坡破损和冲刷坑。当平坦度为 3° 时,沙波呈谷要素和脊要素的韵律性组合和重复。

虽然已有的文献对某一区域使用特定平坦度进行地貌要素分类,而本研究对河流水下地貌要素的识别则需要多种、不同的平坦度值,主要是因为河流水下灾害地貌具有叠加关系。例如,沙波分布在河床,岸坡陡坎上发育河岸破损,冲刷坑分布在岸坡坡脚。相对较大的平坦度可以过滤相对较小的粗糙度或纹理(表面起伏程度相对较小)。对于坡比约为 $1/3\sim 1/2$ 的河岸陡坎,需要大的平坦度将陡坎与河床分开。要从表面粗糙度和纹理中提取河岸破损、冲刷坑和沙波,需要有一个小的平坦度。相比之下,大多数现有研究陆地或海洋地貌的文献,没有考虑地貌要素叠加。

6. 结论

由多波束测量记录生成的传统地图无法反映河岸侵蚀的水下形态要素。因此,本研究引入了地貌要素算法,将水下表面自动分类为坡、坡脚、水平面、脊、顶、谷、坑、凸起、凹陷和坡肩单元,并检查了它们作为河岸侵蚀指标的功能。

在地貌要素方法中,必须预设三个参数:查找距离、跳过半径和平坦度。查找距离控制遍历窗口的大小,设置为 100 m 时,查找距离足够大以限制水下岸坡、冲刷坑和河岸破损。跳过半径设置为 3 m ,以消除异常值影响。平坦度在基于地貌要素法的要素提取中至关重要。当平整度为 10° 时,坡脚要素被视为一个水下岸坡坡脚,有效地将河岸陡坎与河床分开。水下岸坡陡坎剖面曲线的斜率在 $1/3\sim 1/2$ 之间,接近长江中游河岸的稳定坡比,易发生失稳。平坦度为 0° 时,凹陷要素和坑要素百分比最高,更好地代表了河岸破损和冲刷坑。在合适的平坦度下,分析水下地貌形态要素的分布,并绘制河岸侵蚀调查图。其显示在主航道一侧,水深相对较大的近岸区容易形成较长的岸坡陡坎,易发生窝崩;水深大于 11 m ,河岸陡坎发育,并伴有大型冲刷坑;窝崩的发生则反过来缩短了岸坡陡坎的长度,提高了岸坡的稳定性。

平坦度对于在河流环境中提取沙波也很重要,在长江的河流环境中,平坦度介于 $0^\circ\sim 3^\circ$ 之间。不同的平坦度值对于识别具有重叠关系的河流水下形态要素是必要的。这不同于现有研究中用一个平坦度值对陆地地貌和海底要素

进行的分类。

致谢

本研究得到了国家自然科学基金(NSFC)、荷兰科学研究组织(NWO)、英国工程和物理科学研究委员会(EP SRC)联合项目(51761135023),中国地质调查局项目(DD20190260)和NSFC项目(41476075)的资助。

Compliance with ethics guidelines

Ge Yan, Heqin Cheng, Zeyu Jiang, Ming Tang, Lizhi Teng, Tian Shi, Yuehua Jiang, Guoqiang Yang, and Quanping Zhou declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.027>.

References

- [1] Sekely AC, Mulla DJ, Bauer DW. Streambank slumping and its contribution to the phosphorus and suspended sediment loads of the Blue Earth River, Minnesota. *J Soil Water Conserv* 2002;57(5):243–50.
- [2] Evans DJ, Gibson CE, Rossell RS. Sediment loads and sources in heavily modified Irish catchments: a move towards informed management strategies. *Geomorphology* 2006;79(1–2):93–113.
- [3] Wilson CG, Kuhnle RA, Bosch DD, Steiner JL, Starks PJ, Tomer MD, et al. Quantifying relative contributions from sediment sources in Conservation Effects Assessment Project watersheds. *J Soil Water Conserv* 2008; 63(6): 523–32.
- [4] Henshaw AJ, Thorne CR, Clifford NJ. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. *Catena* 2013;100:107–19.
- [5] Marteau B, Vericat D, Gibbins C, Batalla RJ, Green DR. Application of structure-from-motion photogrammetry to river restoration. *Earth Surf Process Landf* 2017;42(3):503–15.
- [6] Xia J, Zong Q, Deng S, Xu Q, Lu J. Seasonal variations in composite riverbank stability in the Lower Jingjiang Reach China. *J Hydrol* 2014;519:3664–73.
- [7] Konsoer KM, Rhoads BL, Langendoen EJ, Best JL, Ursic ME, Abad JD, et al. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. *Geomorphology* 2016;252:80–97.
- [8] Gilvear DJ, Davies JR, Winterbottom SJ. Mechanisms of floodbank failure during large flood events on the rivers Tay and Earn, Scotland. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 1994;27(4):319–32.
- [9] Kumm M, Lu XX, Rasphone A, Sarkkula J, Koponen J. Riverbank changes along the Mekong River: remote sensing detection in the Vientiane–Nong Khai area. *Quat Int* 2008;186(1):100–12.
- [10] Sarkar A, Garg RD, Sharma N. RS-GIS based assessment of river dynamics of Brahmaputra River in India. *J Water Resource Prot* 2012;04(02):63–72.
- [11] Winterbottom SJ, Gilvear DJ. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated River Tummel, Scotland. *Regul Rivers Res Manage* 2000;16(2):127–40.
- [12] Bandyopadhyay S, Ghosh K, De SK. A proposed method of bank erosion

- vulnerability zonation and its application on the River Haora, Tripura, India. *Geomorphology* 2014;224:111–21.
- [13] Midgley TL, Fox GA, Heeren DM. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology* 2012;145–146:107–14.
- [14] Deng S, Xia J, Zhou M, Lin F. Coupled modeling of bed deformation and bank erosion in the Jingjiang Reach of the middle Yangtze River. *J Hydrol* 2019;568:221–33.
- [15] Hackney C, Best J, Leyland J, Darby SE, Parsons D, Aalto R, 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. *Geophys Res Lett* 2015;42(24):10663–70.
- [16] Jugie M, Gob F, Vermoux C, Brunstein D, Tamisier V, Le Coeur C, et al. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using structure-from-motion Photogrammetry and erosion pins. *J Hydrol* 2018;563:418–34.
- [17] Twichell DC, Chaytor JD, ten Brink US, Buczkowski B. Morphology of late Quaternary submarine landslides along the US Atlantic continental margin. *Mar Geol* 2009;264(1–2):4–15.
- [18] Puga-Bernabéu Á, Webster JM, Beaman RJ, Guilbaud V. Morphology and controls on the evolution of a mixed carbonate–siliciclastic submarine canyon system, Great Barrier Reef margin, north-eastern Australia. *Mar Geol* 2011;289(1–4):100–16.
- [19] McAdoo BG, Pratson LF, Orange DL. Submarine landslide geomorphology, US continental slope. *Mar Geol* 2000;169(1–2):103–36.
- [20] Green A, Uken R. Submarine landsliding and canyon evolution on the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean. *Mar Geol* 2008;254(3–4):152–70.
- [21] Wood J. The geomorphological characterisation of digital elevation models [dissertation]. Leicester: University of Leicester; 1996.
- [22] MacMillan RA, Pettapiece WW, Nolan SC, Goddard TW. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst* 2000;113(1):81–109.
- [23] Adediran AO, Parcharidis I, Poscolieri M, Pavlopoulos K. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology* 2004;58(1–4):357–70.
- [24] Schmidt J, Hewitt A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma* 2004;121(3–4):243–56.
- [25] Drăgut L, Blaschke T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 2006;81(3–4):330–44.
- [26] Jasiewicz J, Stepinski TF. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology* 2013;182:147–56.
- [27] Cui X, Xing Z, Yang F, Fan M, Ma Y, Sun Yi. A method for multibeam seafloor terrain classification based on self-adaptive geographic classification unit. *Appl Acoust* 2020;157:107029.
- [28] Di Stefano M, Mayer LA. An automatic procedure for the quantitative characterization of submarine bedforms. *Geosciences* 2018;8(1):28.
- [29] Debese N, Jacq JJ, Garland T. Extraction of sandy bedforms features through geodesic morphometry. *Geomorphology* 2016;268:82–97.
- [30] Libohova Z, Winzeler HE, Lee B, Schoeneberger PJ, Datta J, Owens PR. Geomorphons: landform and property predictions in a glacial moraine in Indiana landscapes. *Catena* 2016;142:66–76.
- [31] Campos Pinto L, de Mello CR, Norton LD, Owens PR, Curi N. Spatial prediction of soil-water transmissivity based on fuzzy logic in a Brazilian headwater watershed. *Catena* 2016;143:26–34.
- [32] Kramm T, Hoffmeister D, Curdt C, Maleki S, Khormali F, Kehl M. Accuracy assessment of landform classification approaches on different spatial scales for the Iranian loess plateau. *ISPRS Int J Geoinf* 2017;6(11):366.
- [33] Luo W, Liu CC. Innovative landslide susceptibility mapping supported by geomorphon and geographical detector methods. *Landslides* 2018;15(3):465–74.
- [34] Chea H, Sharma M. Residential segregation in hillside areas of Seoul, South Korea: a novel approach of geomorphons classification. *Appl Geogr* 2019;108:9–21.
- [35] Flynn T, Rozanov A, de Clercq W, Warr B, Clarke C. Semi-automatic disaggregation of a national resource inventory into a farm-scale soil depth class map. *Geoderma* 2019;337:1136–45.
- [36] Duan J, Duan W, Zhu J. Analysis of riverbank sloughing and stability. *Eng J Wuhan Univ* 2004;37(6):17–21. Chinese.
- [37] Zhang X, Jiang C, Chen Q, Ying Q. Types and features of riverbank collapse. *Adv Sci Technol Water Resour* 2008;28(5):66–70.
- [38] Xu Y, Liang Z, Wang X, Li W, Du Y. Analysis on bank failure and river channel changes. *J Sediment Res* 2001;4:41–6.
- [39] Jin L, Wang N, Fu Q. Analysis of topography of bank-slides and its affecting factors in Mahu reach of the Yangtze River. *J Sediment Res* 1998;2:67–71.
- [40] Peng Y, Xiong C, Yang C. Analysis of relationship between fluvial process and bank caving in the Jingjiang Reach of Yangtze River. *J China Hydrol* 2010;30(6):29–36.
- [41] Liao WH. Region description using extended local ternary patterns. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition*; 2010 Aug 23–26; Istanbul, Turkey; New York City: IEEE; 2010.
- [42] Yokoyama R, Shirasawa M, Pike RJ. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. *Photogramm Eng Remote Sensing* 2002;68(3):257–66.
- [43] Tang J, Deng J, You X, Wang F. Forecast method for bank collapse in middle and lower Yangtze River. *J Sichuan Univ* 2012;44(1):75–81.
- [44] Wang YG, Kuang SF. Study on types and collapse modes of bank failures. *J Sediment Res* 2014;1:13–20.
- [45] Zheng S, Cheng H, Wu S, Liu G, Lu X, Xu W. Discovery and implications of catenary-bead subaqueous dunes. *Sci China Earth Sci* 2016;59(3):495–502.
- [46] Zheng S, Cheng H, Wu S, Shi S, Xu W, Zhou Q, et al. Morphology and mechanism of the very large dunes in the tidal reach of the Yangtze River. *China. Cont Shelf Res* 2017;139:54–61.
- [47] Zheng S, Cheng H, Shi S, Xu W, Zhou Q, Jiang Y, et al. Impact of anthropogenic drivers on subaqueous topographical change in the Datong to Xuliujing Reach of the Yangtze River. *Sci China Earth Sci* 2018;61(7):940–50.
- [48] Cheng HQ, Kostaschuk R, Shi Z. Tidal currents, bed sediments, and bedforms at the South Branch and the South Channel of the Changjiang (Yangtze) estuary, China: implications for the ripple-dune transition. *Estuaries* 2004;27(5):861–6.
- [49] Cheng H, Li J, Yin D, Li M, Wang B. Nearshore bedform instability in the eastern entrance to the Qiongzhou Strait, South China Sea. *Front Earth Sci China* 2008;2(3):283–91.
- [50] Cheng H, Teng L, Chen W. Dune dynamics in coarse silt, sand and gravel along the main channel from the estuarine front of the Yangtze River to the Three Gorges Dam. In: *Proceedings of the Marine and River Dune Dynamics*; 2019 Apr 1–2; Bremen, Germany; 2019.