引文格式：孙聪,张彦波,陈晏涛,等. 一种险段水下岸坡的自动分析方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 18-21. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.005

一种险段水下岸坡的自动分析方法

孙　聪[1]，张彦波[1]，陈晏涛[1]，王伍龙[1]，李　刚[2*]
（1. 武汉生态环境设计研究院有限公司，湖北 武汉 430050；2. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：崩岸灾害对沿江经济建设和人民群众的生命财产安全构成严重威胁。针对目前武汉市长江、汉江险段水下岸坡分析方法效率低、工作量大的问题，提出了一种险段水下岸坡自动分析方法。首先在河道纵断面内自动计算岸坡坡比和陡坡，并采用一种各纵断面的陡坡自动合并算法提取陡岸；再分析不同年份之间险段陡岸长度由整体到局部的变化。结果表明，该方法能快速完成单个险段的处理，大幅提升水下岸坡的提取效率，并能提供更加直观和全面的分析结果服务于基于经验的崩岸评估方法。

关键词：崩岸；岸坡坡比；陡坡；变化分析
中图分类号：P234.2　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0018-04

Automatic Analysis Method of Underwater Bank Slope in Dangerous Section

SUN Cong[1], ZHANG Yanbo[1], CHEN Yantao[1], WANG Wulong[1], LI Gang[2]
(1. Wuhan Ecological Environment Design Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The disaster of bank collapse poses a serious threat to the economic construction and the safety of people's life and property along the river. Aiming at the problems of low efficiency and heavy workload of the current analysis method of underwater bank slope in Yangtze River and Han River sections, we proposed an automatic analysis method. We calculated the bank slope ratio and steep slope automatically in the longitudinal section of river, and used an automatic merging algorithm to extract the steep bank at first. Then, we analyzed the whole and local changes of steep bank lengths in different years. The result shows that the proposed method can quickly complete the processing of a section, greatly improve the extraction efficiency of underwater bank slope, and provide intuitive and comprehensive analysis results to serve the empirical assessment method of bank collapse.

Key words: bank collapse, bank slope ratio, steep slope, change analysis

崩岸是河床演变过程中水流对堤岸冲刷、侵蚀、发展积累产生的突发事件[1]。受局部强降雨和上游水库清水下泄的影响，长江和汉江河道岸滩和河槽遭受持续冲刷[2]，崩岸险情时有发生，对沿江堤防安全构成威胁，严重影响沿江经济建设和人民群众的生命财产安全[3]。堤防险段是受地理条件限制和水流严重冲刷可能发生崩岸危险或历史上多次发生崩岸险情的堤防区段。武汉市长江、汉江堤防历史险段有24处，加上近年来实施过河道治理或护岸工程的部分堤段，共有险段40余处。为了解汛期前后武汉市险段水下冲刷对堤防安全的影响，武汉市每年需对这些险段进行水下地形测量，并对水下岸坡开展崩岸评估，采取维护措施预防险情。险段监测有助于确保堤防安全和避免崩岸灾害造成的损失[4]，常用方法大体可分为4类[5]：①基于专业人员的经验，结合近岸水下地形测量和定期巡查获得的岸坡坡比、近岸河床的冲淤变化情况来判断岸坡发生崩岸的可能性[6-7]；②通过分析岸坡变形过程中力的平衡关系提出的岸坡稳定计算方法[8-9]；③结合河道冲淤演变模型和断面崩岸模型的数值模拟方法[10-12]；④通过岸坡坡比、河势变化、地质和堤岸边界条件、水沙动力、水文气象等不同崩岸影响因子来判断岸坡稳定性[3,13-15]。传统的水下岸坡分析方法通过手动计算岸坡坡比和陡岸长度，效率低、工作量大、自动化程度低，已无法满足日常管理需求。本文以武汉市长江、汉江流域的险段为研究对象，提出了一种险段水下岸坡的自动分析方法。首先实现了岸坡纵断面内坡比的自动计算，并设计了一种多个纵断面的陡坡自动合并算法来提取陡岸；其次提出了一种由整体到局部的陡岸长度变化分析方法，通过分段统计陡岸长度的变化情况，弥补整体比较险段陡岸

第一作者简介：孙聪（1989—），博士，正高级工程师，从事工程建设领域勘测、设计等方法与技术工作，E-mail：492780150@qq.com。
通信作者：李刚（1995—），在读博士，研究方向为地理信息工程、三维重建，E-mail：liggis@whu.edn.cn。

长度的不足；最后获得了水下岸坡分析结果，可辅助基于经验性的险段监测方法，大幅提高工作效率。

1　区域概况

武汉市是水利部确定的防洪重点城市，防洪形势十分复杂。长江穿城而过，从西北而来的汉江自汉口龙王庙注入长江，形成独具特色的三镇鼎立地域格局。本文选取汉江武汉河段和长江武汉段的杨树湾永固堤、下黄金口、杨吕、水口、余周家口、武青堤、尹魏、新沟、吊尾、邓家口10个险段的水下地形测量数据作为实验数据，险段长度和险段高程极差值见表1。险段水下地形测量采用横断面法采集高程点，断面间距在测量比例尺为1∶1 000的险段为20 m，在测量比例尺为1∶2 000的险段为40 m。采用GPS实时差分定位方式测定水面的平面位置，并利用超声波测深仪施测水深。

表1　险段属性表

险段名称	险段岸坡长度/km	险段高程差值/m
下黄金口	1.5	12.36
杨树湾永固堤	2.4	24.63
余周家口	1.9	21.71
水口	2.4	19.13
新沟	5.1	50.86
邓家口	5.0	47.75
吊尾	5.5	19.94
杨吕	4.0	26.48
尹魏	4.1	26.48
武青堤	4.7	28.58

2　水下岸坡自动分析方法

2.1　陡岸提取

通常岸坡坡比不小于1∶2的岸坡区域称为陡岸。陡岸提取是险段监测和预防崩岸的关键，首先沿河道中心线等距离采样，获取河道纵断面的集合和各纵断面对应的桩号，然后在单个纵断面内计算岸坡坡比，得到坡比不小于1∶2的陡坡，合并相交的陡坡；最后对不同纵断面的岸坡进行合并，得到陡岸的长度和最陡的岸坡坡比，以便对水下岸坡进行分析。

1）陡坡计算。为确保岸坡坡比计算的密度，反映水下岸坡的真实情况，通常岸坡坡比的高程采样间隔为1 m，高差限差为3 m，这样可避免较小高差限差的陡坡对险段崩岸预警判断的误导。岸坡坡比计算以纵断面和险段边界的交点为高程采样的起点，间隔1 m高程采样坡比计算范围的始点，并对每个始点以高差3 m计算坡比计算范围的终点，进而得到坡比计算范围的水平距离，坡比即为3与水平距离的比值。

在单个纵断面中通过间隔1 m采样多个坡比计算范围，并保留坡比不小于1∶2的陡坡。图1中红色、绿色和黄色折线分别表示相邻3个坡比计算，由于岸坡坡比采样间隔小于坡比计算的高差限差，纵断面内不同陡坡可能存在相互交叉的区域，此时根据陡坡在水平方向上的投影线段是否相交来判断是否合并纵断面内相交的陡坡。

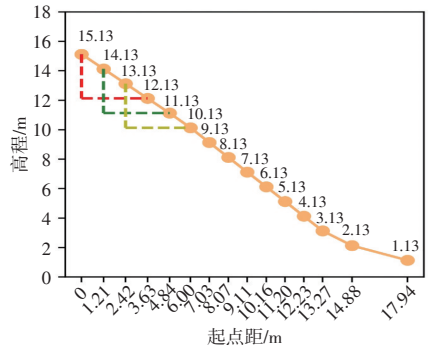


图1　岸坡坡比计算的示意图

2）陡岸提取。在险段采样一定数量的纵断面，并分别计算每个纵断面的陡坡，进而提取整个险段的陡岸。由于纵断面内的陡坡是一条线段，而实际中的陡坡是一个面状区域，因此本文设计了一种各纵断面陡坡自动合并算法来提取陡岸。基于区域生长算法[16]，以一个陡坡为种子生长点，按照一定的生长准则，将相邻纵断面内的陡坡合并起来构成同一区域。作为算法核心的种子点生长准则是判断相邻纵断面内的陡坡在当前纵断面内的投影是否与当前纵断面内的陡坡相交，图2中 C_tD_t 为陡坡 CD 在陡坡 AB 方向上的投影，判断 C_tD_t 与 AB 是否相交，若相交，则该相邻纵断面内的陡坡可与当前纵断面内的陡坡合并；否则，不能合并。通过纵断面之间陡坡合并来提取陡岸的步骤为：①获取各纵断面的所有陡坡，并随机选取其中一个未被访问的陡坡作为种子生长点；②将种子点和相邻纵断面中未被访问的陡坡进行比较，判断相邻陡坡是否满足陡坡合并的准则，若满足，则将该陡坡作为新的种子点和标记成已访问过，并与种子点合并成陡岸，重复上述步骤直至没有新的陡坡加入为止，若不满足，则继续选择另一个未被访问的相邻陡坡，直到没有未被访问的相邻陡坡为止；③继续选择一个未被访问的陡坡作为种子生长点，执行步骤②，直至不存在未被访问的陡坡为止。通过上述方法可以得到险段中的所有陡岸，并根据陡岸两端的纵断面对应桩号，获取陡岸沿险段区域河岸的长度。图2中红色实线为陡坡，橙色区域为陡坡合并后的陡岸。

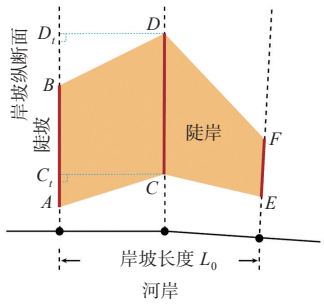


图2　陡坡合并示意图

2.2　陡岸的变化分析

专业人员一般通过分析比较不同年份险段的陡岸总长度来评估岸坡崩岸预警的等级，但陡岸总长度是对险段整体的统计量，缺乏对险段陡岸数据更细致的挖掘分析，如存在险段陡岸总长度变化不大，而陡岸位置分布发生较大变化的情况。因此，本文沿着险段区域内的河岸对不同年份的陡岸进行分段，进而从局部分析陡岸的变化情况。首先在险段中沿着河岸间隔选取岸坡长度为 L 的岸坡区间，再统计分布在该岸坡区间中的陡岸长度之和 $l_1+l_2+l_3$，作为该岸坡区间的陡岸长度（图3）。分段比较陡岸变化信息，不仅能得到陡岸更全面的变化分析结果，而且便于专业人员将险段岸坡存在的问题直接定位到岸坡区间，大幅缩小了险段监测范围，降低了人员排查问题的工作量，提高了工作效率。

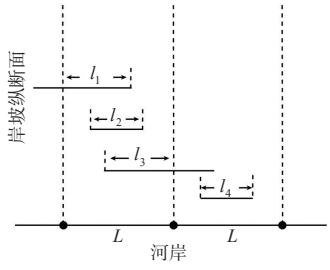


图3　陡岸分布密度的计算示意图

3　实验结果与分析

3.1　陡岸提取结果

根据桩号范围，对提取的各段陡岸在河岸上标记地理位置、长度和最陡岸坡坡比等属性，图4中红色直线为坡比1∶1，即陡岸和危岸的分界线，坡比超过红色直线则认定为危岸。危岸是存在较大崩岸可能性的岸坡区域，一般需要专业人员对危岸进行核查甚至进行实地巡查。在陡岸提取的基础上，本文统计了不同险段中的最陡岸坡坡比和陡岸的总长度（图5），可以看出，下黄金口、杨树湾永固堤、邓家口和武青堤等险段存在危岸，是需要重点关注的险段；余周家口险段和吊尾险段的陡岸长度较短，存在崩岸的可能性较低。

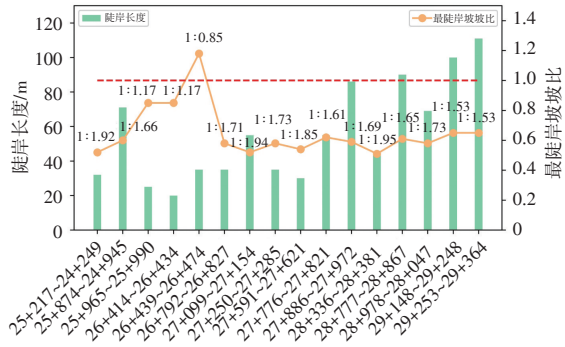


图4　武青堤险段岸坡分析结果

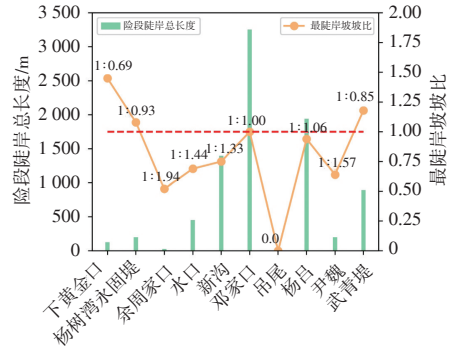


图5　不同险段的岸坡分析结果

3.2　陡岸提取效率

本文程序全部采用Java编写，在一台CPU为Intel (R) Core(TM) i7-8700 @ 3.20 GHz，内存为16 GB，操作系统为64位Windows10的电脑上运行，各险段上陡岸提取的原始运行时间普遍在0~2 min（图6），相较于传统计算方法，大幅提升了工作效率，有效降低了人工成本；本文利用多线程并行加速可将陡岸提取时间进一步压缩到20 s以内，平均加速比为5.04。采用本文方法可在十几分钟内完成以前需要多人协同耗时数天的工作。陡岸提取的运行时间理论上与险段长度和险段高程极差有关。险段长度决定了纵断面数量，险段高程极差决定了纵断面内岸坡坡比的计算次数。由图6可知，陡岸提取的原始运行时间和险段高程极差的总体变化趋势基本相同，而在吊尾、杨吕等险段与险段长度的变化趋势存在较大差异，说明险段高程

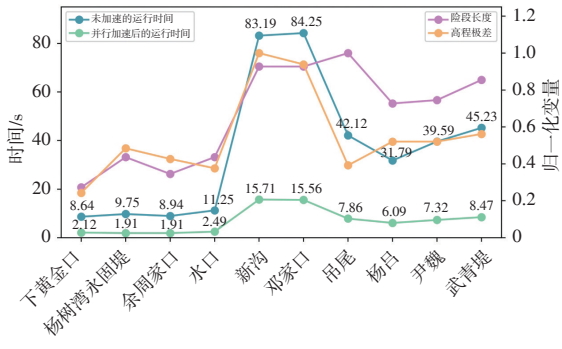


图6　岸坡分析时间

极差是影响陡岸计算时间的主要因素。当险段高程极差相近时，陡岸计算时间受险段长度的影响，如吊尾险段高程极差比杨吕险段小，但具有更大的险段长度，导致总的陡岸计算时间更长。

3.3　陡岸的变化分析

本文以武青堤和水口险段为例分析陡岸的变化情况，结果表明，武清堤险段的陡岸总长度在2023年10月（884 m）较2021年10月（704 m）有较大增加，最陡岸坡坡比由1∶1.28增至1∶0.85，说明武清堤险段水下岸坡变化较大，存在一定的崩岸可能性，需要重点关注；2023年10月水口险段的陡岸总长度（450 m）较2021年（570 m）、2022年（683 m）有所减少，且岸坡坡比由2021年（1∶1.19）、2022年（1∶1.21）降至1∶1.44，说明水口险段崩岸的可能性较低。

本文设置岸坡区间 L =400 m，如图7所示，武青堤险段在绝大多数岸坡区间的陡岸长度有所增加，岸坡坡比增大，区间内岸坡被冲刷，而在部分区间内岸坡被冲淤，其中在桩号28+700~29+100范围内的岸坡冲刷最大，而在桩号28+300~28+700范围内的岸坡冲淤最大；相较于2022年10月，2023年10月水口险段所有岸坡区间的陡岸长度均减少，险段岸坡整体被冲淤，相较于2021年10月，仅在桩号62+900~63+300范围内的陡岸长度有所增加，险段岸坡整体仍以冲淤为主。通过在险段中分段比较不同年份之间陡岸长度的差值，能将险段整体的陡岸长度变化细分到各岸坡区间，得到陡岸更全面的变化分析结果，还便于专业人员以岸坡区间为基本单位进行崩岸评估，提升工作效率。

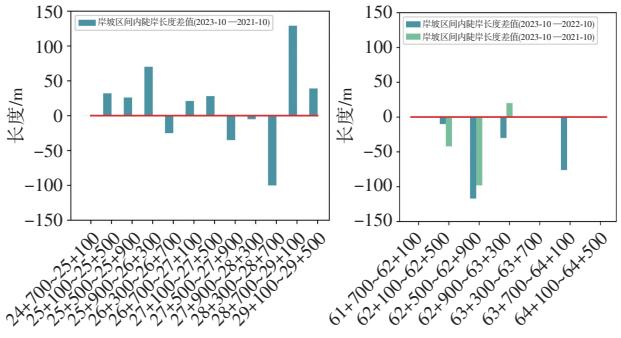


图7　不同年份陡岸分布的变化

4　结　论

针对武汉市长江、汉江流域的险段，本文提出了一种险段水下岸坡的自动分析方法，实现了陡岸的自动计算和不同年份间陡岸由整体到局部的变化分析。实验结果证明，本文方法能在20 s内处理单个险段，直观展示险段陡岸的提取结果，并能从整体和局部两个方面分析不同年份之间险段陡岸的变化情况。相较于传统手工计算方法，本文方法大幅提升了险段水下岸坡分析的处理效率，降低了工作成本。以图表的形式直观表示分析结果可以更好地辅助专业人员基于经验来进行岸坡崩岸预警。本文方法仍需要专业人员基于经验知识来评估岸坡，因此后续可考虑根据专业人员的崩岸评估经验构建知识图谱，以便于根据数据处理结果直接得到岸坡评估结果。

参考文献

[1] 夏军强,邓珊珊. 冲积河流崩岸机理、数值模拟及预警技术研究进展[J]. 长江科学院院报,2021,38(11):1-10

[2] Zheng S. Reflections on the Three Gorges Project Since Its Operation[J]. Engineering,2016,2(4):389-397

[3] 李诺,夏军强,邓珊珊,等. 长江中游荆江河段典型断面崩岸预警方法及应用[J]. 人民长江,2023,54(3):9-15

[4] 刘世振,冯国正,张亭,等. 一种基于水—雨—工情的新型堤防崩岸综合监测技术应用及探讨[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(增刊1):107-110

[5] 李享,邓彩云,李凌云. 河道崩岸评估方法研究进展[J]. 水利建设与管理,2023,43(8):10-17

[6] 李洁,夏军强,张晓雷,等. 黄河下游准平衡状态下平滩流量及面积与水沙条件的关系[J]. 泥沙研究,2015,40(5):37-43

[7] 李义天,唐金武,朱玲玲,等. 长江中下游河道演变与航道整治[M]. 北京:科学出版社,2012

[8] 沈婷,李国英,张幸农. 水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学,2005,26(增刊1):260-263

[9] 王延贵,陈吟,陈康. 冲积河流岸滩崩退模式与崩退速率[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):14-20

[10] 假冬冬,杨俊,陈长英,等. 中国北方季节性冰冻河流岸滩崩塌数值模拟:以松花江为例[J]. 水科学进展,2021,32(5):717-726

[11] 王英珍,夏军强,邓珊珊,等. 黄河下游游荡段断面滩岸崩退过程概化模拟[J]. 水力发电学报,2021,40(3):39-49

[12] 夏军强,邓珊珊,周美蓉,等. 长江中游河道床面冲淤及河岸崩退数学模型研究及其应用[J]. 科学通报,2019,64(7):725-740

[13] 王延贵,齐梅兰,金亚昆. 河道岸滩稳定性综合评价方法[J]. 水利水电科技进展,2016,36(5):55-59

[14] 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

[15] 张帆一,闻云呈,王晓俊,等. 长江下游崩岸预警模型水动力指标阈值研究[J]. 水力发电学报,2023,42(6):53-64

[16] Chang Y L, Li X. Adaptive Image Region-growing[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society,1994,36:868-872