

塌岸淤床动力过程

舒安平 张科利 余明辉 刘海飞 吴保生 / 著



科学出版社

塌岸淤床动力过程

舒安平 张科利 余明辉 刘海飞 吴保生 / 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以黄河上游宁蒙河段为研究对象,通过采用野外调查、典型观测、实测资料分析、理论研究、概化模型实验和数学模型等研究方法,系统分析黄河上游典型塌岸河段河岸物质组成、塌岸的分类及时空分布特征,并基于河岸崩塌侵蚀强度特性,提出了塌岸风险评价模型,揭示塌岸引起河道横向演变机制、塌岸淤床动力过程及其与河床冲淤交互作用机理。在此基础上,提出了河岸崩塌量估算模型和塌岸河段水动力学与泥沙输移数学模型,估算了黄河上游宁蒙河段塌岸入黄泥沙数量。对探明黄河上游泥沙主要来源、减缓黄河上游“悬河”形成进程及洪凌灾害、合理开发黄河上游水能资源及丰富河流动力学学科内容具有重要意义。

本书可供河流动力学、河道演变地貌学、河道整治规划与设计、防洪减灾、水土保持及河流生态修复等领域研究和管理科技人员、高等院校有关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

塌岸淤床动力过程 / 舒安平等著. —北京: 科学出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-03-045981-7

I. 塌… II. ①舒… III. ①塌岸-动力学-研究 IV. P624. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 238164 号

责任编辑: 王 倩 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 14 1/2 插页: 2

字数: 300 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

黄河是一条闻名于世的多沙河流，泥沙问题研究一直是黄河治理中最重要的基础性课题之一，受到了学术界和工程界的高度关注。作为黄河上游泥沙来源及水沙变化最复杂、河道演变最剧烈的典型河段，黄河上游沙漠宽谷河段（又称为宁蒙河段）泥沙来源包括河岸崩塌、风沙入黄和十大孔兑支流高含沙水流等。区域气候敏感、生态脆弱、沙漠和河流过程交织、风沙和水沙过程复合，是沙漠、河流交互演化过程的典型区域，具有独特沙漠河流地貌特征。根据水利部第二次水土流失遥感普查结果，沿半干旱气候带形成自东北向西南分布的风水复合侵蚀带面积约为 26 万 km^2 ，是我国当前土壤侵蚀防治和荒漠化治理的重点和难点所在。20 世纪 60 年代以来，由于区域气候变化、沙漠扩大化及人类剧烈活动的影响，黄河水沙变异加剧、河槽萎缩发展，特别是岸坡的崩塌导致大量良田和耕地丧失的同时，也进一步改变了黄河上游河道水沙的搭配关系，造成大量塌岸泥沙入黄、淤积河床等动力过程的改变，从而加速形成黄河上游 268km 长的“新悬河”，直接影响黄河下游的“悬河”安全，已引起人们的普遍关注。

塌岸反映了河道水流动力作用下河岸土体的失稳过程，河岸土体的结构与土质组成的物理特性决定了河岸的抗冲、抗淘能力。世界上几乎所有江河海沙质岸坡均存在不同程度的崩岸现象，如美国密西西比河下游、欧洲莱茵河历史上都多次发生崩岸，我国七大江河也普遍存在崩岸现象。崩岸可能造成的主要危害包括威胁江河大堤的安全、威胁岸边建筑物及农田的安全、增加河道泥沙来量、影响河床冲淤演变和船舶航行等。开展塌岸淤床动力过程系统研究为治黄工程实践所急需，紧迫而重要。

塌岸研究的科学意义在于：其一，促进沙漠河流泥沙动力学的发展。河流穿越沙漠，沙漠是河流的重要粗沙沙源，河流是沙漠前移的屏障，也是沙漠粗沙的天然输送通道。河流侧蚀沙漠的塌岸淤床过程对沙漠河流迁徙、河道萎缩、决口改道、壅水倒流、悬河发育等灾害有突出影响，对其研究将会极大地推动沙漠学与河流学的交叉发展，丰富河流动力学研究内容。其二，丰富和完善流域管理学的理论和方法。近年来黄河上游“新悬河”与河槽萎缩伴生，洪涝灾害频发。

沙漠粗沙通过风力搬运或滩岸坍塌直接入黄，或者以风-洪输移方式通过十大孔兑等支流入黄，因此，黄河流域泥沙科学管理至关重要。其三，为土壤侵蚀科学发展做贡献。黄河上游宁蒙河段塌岸严重，沿岸农田受到严重侵蚀。塌岸的研究可以丰富土壤侵蚀学的研究理论，对水土保持工作具有实际指导意义。

鉴于此，科学技术部于2011年把“黄河上游沙漠宽谷段风沙水沙过程与调控机理（No 2011CB403300-G）”列为国家重点基础研究发展计划（973计划）项目。本书汇集了该项目课题4——塌岸淤床过程与河道冲淤演变规律（No 2011CB403304）中子题1（塌岸形成机理及入黄泥沙量预测模型）和子题2（塌岸与河床冲淤的交互作用过程及机理）的主要研究成果，通过采用野外调查、典型观测、实测资料分析、理论研究、概化实验及数值模拟等研究方法，结合河流动力学、土力学、地学、水土保持学等多学科知识理论，从黄河上游典型河段水动力作用下河岸崩塌侵蚀过程入手，探索黄河上游塌岸对黄河泥沙来量的贡献率，阐明塌岸与河床冲淤的交互作用机理，揭示塌岸淤床动力过程及河道演变机制，对探明黄河上游泥沙主要来源、减缓黄河上游“悬河”形成进程及洪凌灾害、合理开发黄河上游水能资源及丰富河流动力学学科内容具有重要意义。

本书共13章内容，其中第3章GPS观测部分和第6章塌岸侵蚀风险评估模型由张科利、王静主笔，第9章模拟实验及第10~12章与实验相关内容由余明辉、陈曦主笔，第13章数学模型由刘海飞主笔，其他章节由舒安平主笔并统稿全书，吴保生教授对本书编写提出了宝贵的意见。参加课题研究的主要人员包括段国胜、李芳华、周星、田露、高静、张欣、杨凯、黄莉、王澍、孙江涛、王梦瑶、陈浩等。另外在本书编写过程中，还得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所拓万全研究员和黄河水利科学研究院姚文艺教授级高级工程师、张晓华教授级高级工程师的悉心指导与大力支持，在此一并致谢。

限于作者的水平，本书疏漏之处在所难免，特别是有一些塌岸现场观测数据尚未来得及仔细校准和推敲，敬请读者批评指正。

作者

2016年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 黄河上游宁蒙河段概况	1
1.2 任务由来及研究内容	2
1.3 河岸崩塌的研究进展	3
第 2 章 沿河自然环境及塌岸分布特征	23
2.1 自然环境概况	23
2.2 水利工程概况	25
2.3 沿河塌岸空间分布特征	27
第 3 章 典型塌岸河段的现场观测	30
3.1 典型塌岸观测河段的选取	30
3.2 现场观测方法及数据分析	35
3.3 河岸塌岸量的估算方法	42
3.4 差分 GPS 观测结果	45
3.5 2011 ~ 2015 年典型塌岸河段现场观测	52
第 4 章 塌岸的分类及其河道横向演变特征	59
4.1 黄河上游塌岸的分类	59
4.2 塌岸河段河岸颗粒粒径分布特点	62
4.3 塌岸引起河道横向演变特征	67
第 5 章 塌岸指标体系及遴选分析	71
5.1 塌岸指标体系的构建	71
5.2 基于多元回归法塌岸因子遴选分析	75
5.3 塌岸因子遴选与程度分级	77
第 6 章 塌岸侵蚀风险评估模型	80
6.1 黄河上游塌岸遥感图解译分析	80
6.2 塌岸风险评估指标体系	85
6.3 塌岸侵蚀风险评估模型	89

6.4	宁蒙河段塌岸侵蚀风险评估结果	92
第7章	河岸崩塌量估算模型	97
7.1	非黏性河岸塌岸量估算模型	97
7.2	黏性河岸塌岸量估算模型	103
7.3	模型验证	109
第8章	塌岸入黄泥沙量观测与估算分析	113
8.1	典型塌岸河段塌岸入黄量观测结果	113
8.2	2011 ~ 2015 年宁蒙河段塌岸入黄泥沙量的估算	114
8.3	宁蒙河段塌岸入黄泥沙量的对比分析	118
第9章	塌岸动力过程模拟实验	119
9.1	实验装置及测量仪器	119
9.2	实验条件及组次	124
9.3	实验用沙	126
9.4	实验水沙因子与断面形态的概化	130
第10章	塌岸淤床过程水动力学特征	132
10.1	流速分布	132
10.2	动能与紊动能分布	136
10.3	横向环流	138
10.4	壁面切应力	139
第11章	水动力作用下岸坡稳定性与崩塌体输移特性	142
11.1	水动力作用下河岸稳定性	142
11.2	崩塌体输移特性	145
第12章	塌岸与河床冲淤交互作用机理	151
12.1	非黏性岸坡塌岸河段	151
12.2	黏性岸坡塌岸河段	159
12.3	近岸河床组成对岸坡崩塌的影响分析	165
第13章	塌岸河段水动力学与泥沙输移数学模型	172
13.1	模型现状概述	172
13.2	基于 Boltzmann 方法的水动力学模型	175
13.3	塌岸河段泥沙输移模型	193
13.4	模型验证	195
参考文献		207
附图		219

第1章 绪 论

1.1 黄河上游宁蒙河段概况

黄河上游宁蒙河段（又称黄河上游沙漠宽谷河段）位于黄河上游的下段，上起宁夏中卫市、下迄内蒙古托克托县，穿越 25 个市、县（旗、区），总长约 1000km，平均比降为 0.25‰，属于典型的冲积河流。沿河共分布有下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口、昭君坟、头道拐 7 个水文站，如图 1-1 所示。该河段属于黄河上游二级阶地，黄河出青铜峡后，沿鄂尔多斯高原的西北边界流动，穿越腾格里沙漠、河东沙地、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠四大沙漠，以

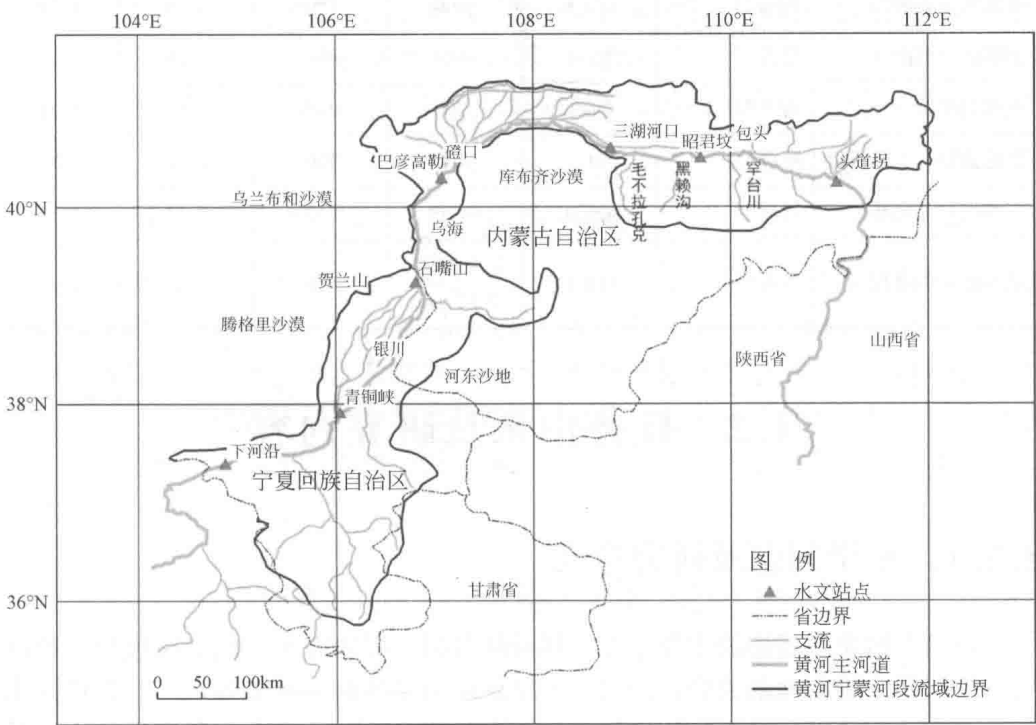


图 1-1 研究区地理位置图

及宁夏平原、河套平原两大平原，同时流经中卫盆地、中宁盆地、银川盆地和河套盆地等大型的断陷盆地，形成了沙漠包围河流的独特地貌景观，沙漠和河流过程交织、风蚀和水蚀过程交错、风沙和水沙过程复合，是我国乃至世界上地表风水复合侵蚀强度最大的区域。

受两岸地形、物质组成及气候条件的影响，黄河上游宁蒙河段河型多样，在宁夏境内沿程有卵石质辫状河段，在经过青铜峡库区后变为砂砾质辫状河段，然后变为砂质辫状河段，在内蒙古境内沿程由辫状河段变为弯曲河段，在末段变为顺直河段。除了较短的峡谷段及三湖河口以下弯曲窄深河段外，其余河道表现出淤型游荡河道的特点，其沿程基本特性见表 1-1。

表 1-1 黄河上游宁蒙河段河道基本特性

河段	河型	河长/km	平均河宽/m	主槽宽/m	比降/‰	弯曲率
南长滩—下河沿	峡谷型	62.7	200	200	0.87	1.8
下河沿—白马	非稳定分汊区	82.6	915	520	0.8	1.16
青铜峡库区	库区	40.9	—	—	—	—
青铜峡—石嘴山	游荡型	194.6	3000	650	0.18	1.23
石嘴山—旧磴口	峡谷型	86.4	400	400	0.56	1.5
三盛公库区	过渡型	54.2	2000	1000	0.15	1.31
巴彦高勒—三湖河口	游荡型	221.1	3500	750	0.17	1.28
三湖河口—昭君坟	过渡型	126.4	4000	710	0.12	1.45
昭君坟—头道拐	弯曲型	184.1	上段 3000/ 下段 2000	600	0.1	1.42

1.2 任务由来及研究内容

1.2.1 塌岸问题及研究意义

黄河上游岸坡崩塌的主要危害包括威胁黄河大堤的安全、威胁岸边建筑物的安全，以及大量耕地的流失；同时，崩岸是河道泥沙的主要来源之一，造成河床演变的变化。20 世纪 60 年代以来，由于黄河流域区域气候变化、沙漠扩大化及人类剧烈活动的影响，黄河上游水沙变异加剧、河槽萎缩发展；特别是岸坡的崩塌导致大量良田和耕地丧失的同时，也进一步改变了黄河上游河道水沙搭配关

系,造成大量塌岸泥沙入黄、淤积河床等动力过程的发生,从而加速了形成黄河上游 268km 长的“新悬河”,直接影响黄河下游的“悬河”安全,已引起人们的普遍关注。因此,开展黄河上游塌岸动力过程及机理的研究意义重大。

1.2.2 研究内容

本书汇集了国家 973 计划项目“黄河上游沙漠宽谷段风沙水沙过程与调控机理 (No 2011CB403300-G)”课题 4——塌岸淤床过程与河道冲淤演变规律 (No 2011CB403304) 中子题 1 (塌岸形成机理及入黄泥沙量预测模型) 和子题 2 (塌岸与河床冲淤的交互作用过程及机理) 的主要研究成果,主要研究内容如下:

(1) 塌岸形成机理及入黄泥沙量预测模型

通过野外调查、资料分析、遥感影像解译及全球定位系统 (global positioning system, GPS) 定位测量,对黄河上游塌岸类型和规模进行识别,分析塌岸时空变化与分布特征,提出塌岸风险评估方法,确定重点、典型塌岸河段;通过典型塌岸野外观测及资料分析,研究黄河上游沙漠宽谷河道典型塌岸的形态特征、理化力学特性、塌岸影响因子及侵蚀抗蚀特点,揭示水动力作用下塌岸形成机理;通过河岸稳定性分析及相关理论研究,建立塌岸入黄泥沙模型,估算塌岸入黄泥沙量。

(2) 塌岸与河床冲淤的交互作用过程及机理

采用现场调查、观测和实测资料分析方法,研究黄河上游沙漠宽谷河道塌岸与河床冲淤演变的动态关系;通过概化模型实验和理论分析,研究顺直型、弯曲型河道塌岸影响因子和水沙关键因子的不同组合条件下塌岸侵蚀动力过程、河道水沙运动及河床冲淤之间相互作用的机理;在塌岸淤床过程观测资料对比分析基础上,通过塌岸入黄泥沙模型与河道冲淤模型的耦合,构建塌岸与河床冲淤交互作用的模式,分析塌岸淤积床作用。

1.3 河岸崩塌的研究进展

1.3.1 塌岸现场观测方法

国外对于河岸侵蚀的研究起源于 19 世纪中后期, Fergusson (1863) 利用历

史资料、泥沙生物等资料信息推求河流横向变化。20 世纪 50 年代末, 河岸侵蚀及其河势演变逐渐成为交叉领域学者研究的重点, 并开始采用野外实测数据进行研究。研究内容主要关注河岸侵蚀的发生发展及其发生原因的复杂性, 之后的研究也表明河岸侵蚀过程及机理非常复杂多变。据美国相关部门统计, 每年由于河岸侵蚀造成的损失高达 2 亿 7 千万美元, 河岸侵蚀的严重危害使得关于河岸侵蚀的研究迅速发展。自 20 世纪 70 年代起, 研究者开始关注河流横向变迁与游荡型河流演变、河漫滩消长及流域泥沙来源的动态相关关系。Hooke (1979) 定性地对河岸侵蚀过程进行讨论并分析影响河岸侵蚀的因子, 并在此基础上建了概念模型。英国学者 Thorne (1982) 将河岸侵蚀的原因分为两大类: 一类是水流的作用, 另一类是外界条件造成的土体强度减弱和风化。在天然条件下, 两者往往是同时存在的。其中水流对于河岸的作用分为直接作用和间接作用。前者直接作用于河岸, 冲刷河岸上的泥沙颗粒并将其带走; 后者是水流冲刷、掏空坡脚, 使岸坡的高度或角度增加, 从而导致上部的岸壁因重力作用而下落。外界条件包括土质及土体含水量等影响因素。随着计算机技术及河岸侵蚀机理研究的进一步发展, 数值模型模拟河岸侵蚀过程逐渐成为河流塌岸研究的重心之一。学者着重研究了河岸稳定程度、河岸安全系数, 以及考虑渗流、不同植被覆盖、受冻融作用等影响的河岸侵蚀, 但此时关注的河岸多由单层、黏性组成物质构成。

进入 20 世纪 90 年代, 结合 80 年代末期形成的河岸稳定性理论, 学者开始对不同级别、不同时空领域的河岸侵蚀进行研究。与此同时, 野外观测技术的提高也促进了河岸侵蚀研究, 大量高科技产品被广泛应用到河岸侵蚀研究中。光电感应侵蚀针、机载激光雷达系统、三维激光扫描仪等技术开始应用于河岸侵蚀监测, 并使用高分辨率遥感影像分析大尺度空间区域及时间跨度的河岸侵蚀量动态变化情况等。此外, 多层组成物质、非黏性粗颗粒及混合土质等复杂河岸的崩塌侵蚀研究也逐渐得到了发展。

与国外相比, 我国关于河岸侵蚀的理论研究起步较晚。20 世纪 70 年代末, 中国科学院地理研究所 (1978) 出版了关于长江九江至河口段河床边界条件及其与崩岸的关系的研究论著。随后, 尹国康 (1981)、陈引川和彭海鹰 (1985) 从河道岸坡变形和河流动力学的角度分析了河岸侵蚀的发生条件, 但这些研究多局限在经验分析, 研究对象也主要集中在长江中下游地区。到 20 世纪 90 年代, 我国的河岸侵蚀研究取得了一系列研究成果, 主要集中在以下几个方面: ①通过实地调查、野外采样分析、水文泥沙资料分析等对河岸侵蚀的类型、原因及机理进行研究; ②对河岸侵蚀进行室内实验模拟及数值模型研究; ③通过水沙、地形资料研究崩岸与河道演变的关系; ④通过水库运行前后固定断面水文泥沙资料分析

上游水库调节对崩岸的影响；⑤河岸侵蚀治理研究。研究的关注点从集中于长江中下游干流扩大至黄河、黑龙江等其他河流。

国内外对河岸侵蚀的研究主要有四个方面：河岸侵蚀过程机理研究、河岸侵蚀影响因素研究、河岸侵蚀观测研究和河岸侵蚀的模拟与建模研究。其中河岸侵蚀观测是进行河岸侵蚀机理研究和模拟的基础，在河岸侵蚀研究中具有重要地位。

(1) 河岸崩塌几何形态监测

对于大时间尺度的研究，传统的河岸侵蚀监测方法有沉积物特征证据、植物学证据及历史数据资料。Strrkel 和 Thornes (1981) 指出需要依据现存的河流沉积序列来建立某一河段的沉积序列，然后利用沉积学证据推算河岸侵蚀量。另有学者用此方法研究了苏格兰和新南威尔士地区的河流塌岸。而对于利用植物学证据研究河岸侵蚀，其研究时间尺度则在 50 ~ 1000 年，最初生物学家用该方法来研究河道的横向变化以用来解释冲积平原上的原始森林变化。Eardley (1938) 首先用树轮年代来研究河流的变化速度。经后人的努力该方法得到了进一步发展。研究者多倾向于用连续的历史资料来研究河道的演变，此方法的时间尺度为 150 年左右，而且适用于大规模的河流运动，后来此方法多用于河流横向演变过程的研究。对于中时间尺度的研究，传统观测方法主要包括平面测量法 [图 1-2 (a)]、横断面测量法 [图 1-2 (b)]。其中平面测量法的方式有很多，如平板仪、基线测量、准距仪及电子距离测量技术 (electronic distance measuring, EDM)。Dryer 和 Davis (1910) 首次使用该技术研究河道变化，对比分析了 1897 年和 1910 年前后两次的测量结果，得出该河岸 13 年共后退 12.2m。但平面测量中仅能测出河岸后退的平面距离，为计算河岸侵蚀的三维变化，研究者提出通过建立一系列固定的标志进行断面测量。对于短时间尺度的观测，学者多采用简单易行的侵蚀针测量法 [图 1-2 (c)] 进行河岸侵蚀观测。Ireland 等 (1939) 首次使用该方法，1959 年经 Wolman 改进后，该方法一直应用于河岸侵蚀研究 (Wolman, 1959)。1989 年 Lawler 将侵蚀针测量法进一步发展为光电子侵蚀针测量法 (Lawler, 1989)，该方法大大减少了野外现场观测的次数，节省了人力物力，使得河岸侵蚀测量方法更加完善，测量结果更加精确。

黑龙江是我国河岸侵蚀研究的发源地，相关研究主要集中在黑龙江河岸的侵蚀特征和分布规律，并且对河流坍塌形态进行了分类，分为土质河岸塌岸形态和岩质河岸塌岸形态，又根据塌岸中的土体形态或者作用机制不同，将土质河岸塌岸形态分为块塌、条塌和窝塌，将岩质河岸塌岸形态分为滑动错动塌岸和重力崩落塌岸。随后，针对河北怀来官厅水库一直以来严重的塌岸问题，宋岳和段世委

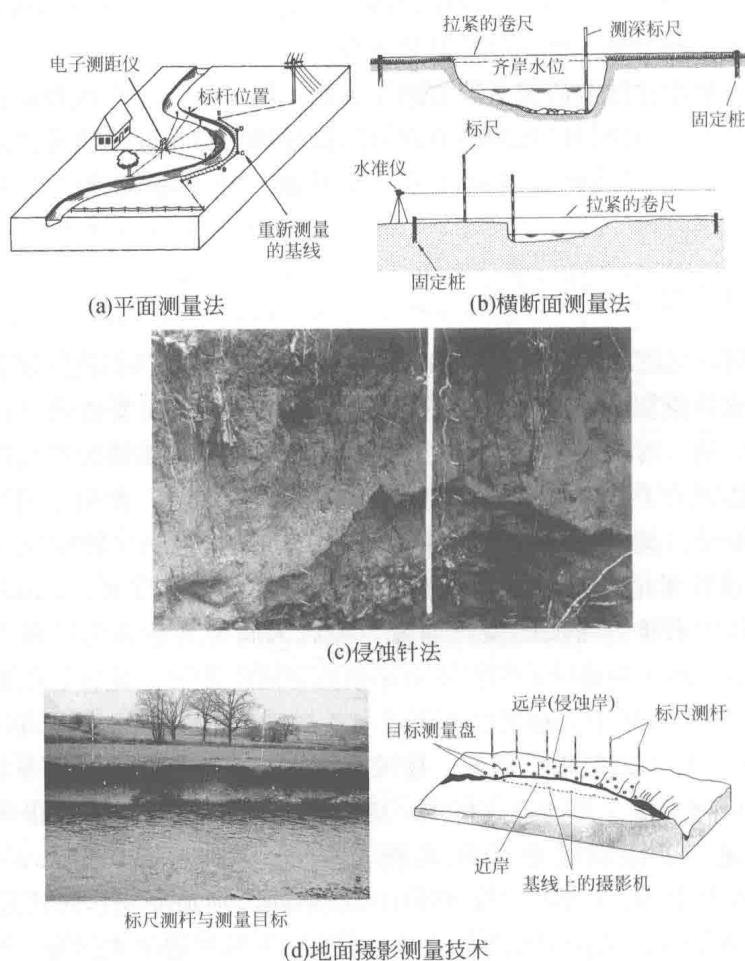


图 1-2 四种河岸侵蚀量测量

(2004) 介绍了水库塌岸的历史和现状，对水库塌岸进行了严重程度分级和长期塌岸宽度预测。此时的研究仅处于定性描述阶段，但却大大推动了我国对河流塌岸侵蚀问题的研究。

三峡水库修建完成后，国土资源部出资设立专项资助项目用来对三峡库区的塌岸问题进行预测，其中吉林大学和成都理工大学作出了很大的贡献。吉林大学分别在三峡工程中的涪陵区、长寿区和丰都县提出了适合研究区域的塌岸预测方法。阙金声 (2007) 研究表明传统监测方法不适宜山区河道型水库塌岸预测，应建立非线性塌岸预测模型体系。并首次提出采用粗糙集理论、BP (back propagation, 逆向传播) 神经网络和可拓学理论三者相结合的非线性塌岸预测新方法。王征亮 (2005) 针对三峡库区长寿区进行了塌岸预测的可拓学研究，分别

用了传统算法和可拓学法对塌岸进行了预测,通过对比分析结果确定了岸坡的塌岸宽度、影响高程和塌岸强烈程度。后来,张文春等(2010)基于人工神经网络方法研究了三峡库区丰都县,旨在建立一个适合于三峡库区的塌岸预测方法体系。研究通过训练、学习和仿真,获得预测正确率为97.2%的具有7-32-14网络结构的BP神经网络模型。结果表明:基于人工神经网络的塌岸预测宽度与实际监测数据很接近,偏差在5m以内;公式法计算结果与监测值平均偏差为15.9m。成都理工大学在三峡库区的塌岸预测方法中也发挥着自己积极的作用。刘天翔和许强(2006)在分析三峡库区塌岸类型和传统塌岸预测方法的基础上,提出塌岸预测应根据不同的塌岸类型,建立合适的塌岸预测模型。并突破性地提出,对于冲(磨)蚀型和坍(崩)塌型的塌岸预测都可以采用岸坡结构法;而推移型的塌岸预测,应该以极限平衡搜索预测法和FLAC3D数值模拟预测法为依据。

虽然侵蚀针测量法在国外河岸侵蚀研究中有广泛的应用,但是该方法并不适合我国河流的实际状况,而且我国关于河岸侵蚀研究大多集中于水库。因此,需要发展新的测量技术以便进行河岸侵蚀研究。

(2) 遥感、GPS 和摄影测量技术

随着3S^①技术和摄影测量技术的发展,河岸侵蚀测量技术发生日新月异的变化。Emmanuel(1998)对加利福尼亚州的旧金山湾进行研究时,利用侵蚀针测量法对河岸进行了短期监测及河岸侵蚀量计算;同时提出了用航片进行长期的河岸变化研究,从而估算河岸侵蚀量。Matti Kummur 等(2008)更是直接利用遥感影像监测技术对湄公河沿岸的河岸变化进行调查。Praveen 等(2012)也运用遥感技术和GIS相结合研究恒河流域的河岸侵蚀危害。遥感影像可以用来监测大时空尺度河岸的变化,具有周期短、分辨率高、节省人力物力等优点,从而使得遥感技术成为河岸侵蚀研究常用的方法。在国内,学者利用遥感影像进行河岸侵蚀现状调查,并对河岸稳定性进行了评价;同时通过对河岸侵蚀和淤积的分析,计算河岸侵蚀量。杨根生等(1988)通过对比不同时期航片,估算了黄河河岸崩塌产生的入黄泥沙量。Yao 等(2011)使用不同时期的地形图、影像资料,研究了1958~2008年黄河上游沙漠宽谷段的河岸侵蚀和堆积情况。该方法促进了我国有关河岸侵蚀的研究。

摄影测量技术最初在地形地貌研究方面应用较多,之后成为了河岸侵蚀监测常用的技术。Rachel 等(1997)明确提出了用地面摄影测量技术监测和测量河岸

① 3S 即 RS (remote sensing, 遥感)、GIS (geographic information system, 地理信息系统) 和 GPS。

侵蚀。随后发展的数字摄影测量技术也应用到河岸侵蚀监测研究中。通过摄影测量技术得到的高分辨率地面高程模型可以用来描述河流形态的短暂变化,从而计算河岸侵蚀量。最新发展的三维激光扫描技术在变形监测方面炙手可热,被认为是测绘领域继 GPS 测量技术之后的一次科技革命。它能够提供扫描物体表面的三维点云数据,因此可以用于获取高精度高分辨率的数字地形模型 [图 1-2 (d)]。张鹏等 (2008) 对比分析了高精度 GPS、三维激光扫描和测针板三种测量技术在监测沟蚀方面的应用,通过对比分析三种方法测量的细沟侵蚀量,发现三维激光扫描对细沟侵蚀量估算精度较高,误差仅为 4.5%。摄影测量技术获取的数据精度高、范围大,适合大尺度的河流演变规律研究,但该方法费用高,阻碍了该技术在河岸侵蚀监测中的应用。

另外, GPS 测量技术也逐渐应用到河岸侵蚀研究中。GPS 测量技术最先应用于道路、矿山、建筑施工等领域,之后逐渐被应用到土壤侵蚀研究领域中。在国外, GPS 测量技术在河岸侵蚀研究中已有广泛应用。Brasington 等 (2000) 在基于高分辨率 GPS 测量技术和构建辫状砾石层河流的形态学变化的研究中就明确提到 GPS 测量技术可以对河流形态学的测量达到三维的高度,从而为河流的塌岸变化提供更加精准的数据。Gyula Mentes 等 (2009) 则用精准的 GPS 测量技术定量测量出了多瑙河每年的河岸侵蚀量,并研究了河岸崩塌对该河的影响。但是,在国内虽然 GPS 测量技术在土壤侵蚀细沟测量中有成熟应用,但鲜有学者将 GPS 测量技术应用到河岸侵蚀的监测中,目前仅在国家 973 计划项目“黄河上游沙漠宽谷段风沙水沙过程及调控机理”中有相关的研究。

1.3.2 塌岸风险评价

(1) 塌岸影响因子

对河流的塌岸风险性进行评价必须明确影响河岸侵蚀的因素,综观各国有关塌岸影响因素的研究,主要包括水流条件和河岸条件两大方面,具体体现在水文、土壤、河流、气象、岸坡、植物等方面。

水流条件是河岸侵蚀的动力因子,包括流量、流速、洪峰流量、水位等因素。Hooke (1979) 通过侵蚀针测量河岸侵蚀量发现,洪峰流量是河岸侵蚀的主要贡献因素,并分析了其他水文条件对河岸侵蚀的影响。Knighton (1973)、Walling (1974) 等更是进一步讨论了洪峰流量、洪水上升速率、流速等水流因素对河岸侵蚀的影响; Julian 和 Torres (2006) 研究了洪峰强度对河岸侵蚀过程影响的水动力学机制。Luppi 等 (2009)、Pizzuto (2009) 则在试图量化河流侵

蚀的过程中,提出流水侵蚀量占到河岸侵蚀量的85%以上。

河岸条件的不同会影响水流形态的变化,从而对河岸侵蚀产生影响。Hack 和 Goodlett (1960) 将河岸侵蚀分为滑落 (slide)、掩蔽 (cover)、突出 (nose) 三种形态,并讨论了河型和河岸侵蚀之间的关系。Hupp 和 Simon (1991) 研究讨论了不同结构的顺直型河岸的侵蚀状况。岸高和岸坡脚等河岸形态因素对河岸侵蚀也有重要作用。Simon 和 Hupp (1987) 在调查田纳西州西部流域时发现,不稳定河岸岸高在 3~15m,不稳定河岸坡脚在 40°~90°变化。除了河岸本身形态特征会对河岸的受侵蚀程度产生影响外,河岸组成物质的不同也影响着河岸崩塌的可能性。

植被对河岸的影响作用比较复杂,不同的研究产生了不同的结果。Simon 等 (1999) 提出土壤抗压能力强、抗拉能力弱,而植被根系恰好抗压能力弱、抗拉能力强,因此两者结合能够加强河岸的稳定性;但 Greenway (1987) 通过研究却发现,河岸坡地植被能够通过增加河岸的载重进而加剧河岸崩塌。另外,植物根系扎根于河岸土壤,还有可能破坏河岸土体的完整性,进而形成裂隙加剧河岸的不稳定性。

另外还有学者研究降雨过程、冻融作用等其他因素对塌岸的影响。Hooke (1979)、Casagli 等 (1999)、Simon 等 (1999) 认为土壤含水量在河岸侵蚀过程中起到了重要作用,含水量较高的土壤会增加土壤强度。针对土壤中的水分条件,Gregory 和 Walling (1973) 提出了几种指标来定量化土壤湿度对塌岸的影响,其中前期降雨指数 (antecedent precipitation index, API) 应用最广泛。冻融作用也是需要关心的因素,特别是针对路面的风化过程。冻融作用会促进土层深度开裂,从而导致崩岸现象的频发。Lawler (1986) 在南威尔士两条弯曲河段运用侵蚀针测量河岸侵蚀量时也发现,季节性的塌岸现象十分明显,大部分的塌岸发生在 12 月至次年 2 月,冻融作用引起的河流塌岸明显。

国内对塌岸影响因素的讨论和定量化研究始于长江流域、黄河流域等大尺度河流,研究的内容主要集中在水流泥沙条件和河岸形态。王永 (1999) 提出水流因素是造成长江安徽段崩岸的主要外在条件,体现在主流顶冲、弯道环流动力及高低水文突变等方面。马振兴等 (2002) 在分析长江马湖大堤崩岸时,主要从地学角度分析了发生崩岸的原因,认为大堤底部为流相和湖泊相沉积,相变明显,为不良工程地质体,其是致使马湖堤段抗冲刷能力弱、大堤失稳、发生崩岸的主要因素。夏军强和王光谦 (2002) 以三门峡水库为例,讨论了滩岸侵蚀发生机理及其主要影响因素;并且河岸冲刷机理分为受冲积作用控制和不受冲积作用控制两类,前者主要体现河岸侵蚀的动力 (水流作用和重力作用),后者则主要是河岸边界条件 (河岸土体特征、河岸植被、河道水位变化、冻融作用等)。余文畴

(2008) 用长江中下游来家铺弯道的河道断面、流速等资料, 分析了影响河道崩岸的两类自然因素——水流泥沙运动条件和河床边界条件。王延贵和匡尚富(2005) 借助水流泥沙运动理论、水流动力学理论和水流涡流理论分析探讨了弯曲河道的淘刷机理, 指出弯道进出口的凸岸、弯道进出口的凹岸都具有高剪切力, 河岸淘刷作用强烈, 其中凹岸岸脚所受剪切力最大, 淘刷最严重。谢立全等(2008) 将岸坡渗流作为江河崩岸的主要诱因和主要研究内容, 并对岸坡底下水流运动规律与江河水流之间的关系进行了定量研究。

综上关于河流塌岸侵蚀的影响因素主要包括外界条件和内部条件, 外界条件主要有水流动力条件、河床边界条件、河道形态等, 内部条件为河岸几何形态及物质组成特性等。明确影响河流塌岸的因素对河流侵蚀机理研究和河岸侵蚀模型的建立具有重要意义。

(2) 塌岸风险评估模型

河流塌岸的风险评估是在地质灾害风险评估的基础上发展的, 河流塌岸的风险评估模型主要包括定性评估和定量评估两大类。定性评估方法是根据实际的调查情况对其风险性进行主观性的描述, 包括绘制灾害危险性的地貌图, 根据经验知识对风险性进行分区等。定量评估方法主要是将风险评估的机理与数理统计的原理相结合, 以定量的指标来反映灾害的风险等级。随着 GIS 空间技术的发展, 该技术和数理统计模型相结合进行风险性评估, 并对评估过程中的不确定性进行讨论, 进一步发展了风险评估的方法。

在河岸侵蚀过程的复杂性、影响因子的多样性方面, 国内外关于塌岸风险性评估模型的研究较少。国外用于河流塌岸风险评估的模型主要有两个: 一个是岸坡稳定与坡脚侵蚀模型 (bank stability and toe erosion model, BSTEM), 该模型基于河岸崩塌的机理来预测河岸的稳定性及坡脚的侵蚀速率; 另一个是经典的河岸非点源泥沙岸坡评估模型 (bank assessment of nonpoint source consequences of sediment, BANCS), 该模型根据河流冲刷机理将影响河岸稳定性的因素划分为河岸特性和近岸水流特性, 对其中的子因子按一定的标准进行等级划分, 从而建立风险评估表, 该模型包含河岸侵蚀危害指数 (bank erosion hazard index, BEHI) 和近岸压力 (near bank stress, NBS) 两个子模型, 主要用来预测河岸崩塌的风险性。

目前国内关于河流塌岸风险性还没有定量化的模型, 大部分是运用已知的影响因素根据一定的理论方法建立塌岸风险预测模型, 其中比较常见的有集对分析理论、专家知识、模糊综合理论和信息量方法等; 模型中各因子间权重的确定也有多种方法, 如层次分析 (analytic hierarchy process, AHP) 法和灰色关联分析