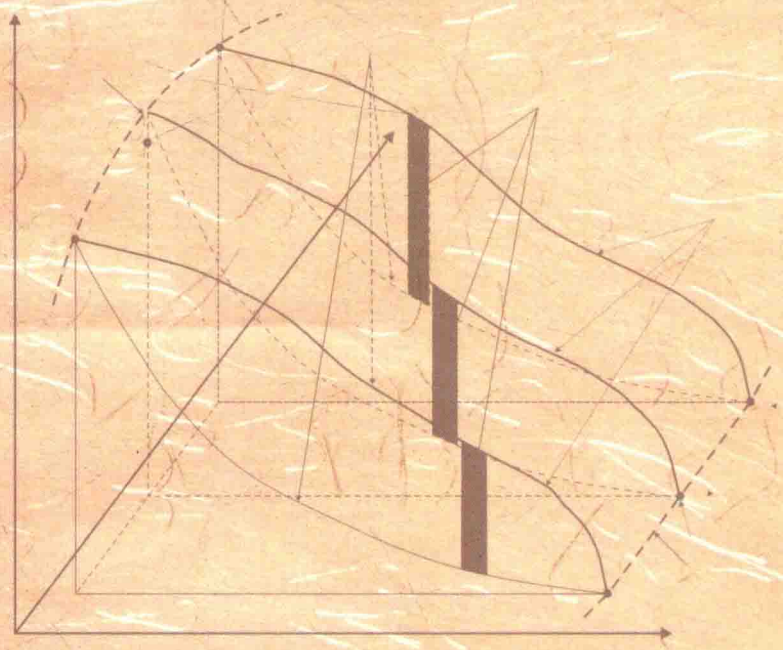
水科学博士文库

GIS-Supported Reservoir Bank Failure Prediction and Risk Assessment

GIS支持下的水库塌岸预测与风险评价

王小东　戴福初　孟令超　著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

非外借

需要全本请访问 www.ertongbook.com

水科学博士文库

GIS-Supported Reservoir Bank Failure Prediction and Risk Assessment

GIS 支持下的水库塌岸预测与风险评价

王小东　戴福初　孟令超　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书基于高分辨率DEM与DOM，研究在GIS技术支持下的塌岸宽度预测和体积预测的理论与方法。全书以金沙江溪洛渡水电工程为例，基于“两段法”，开发了进行塌岸宽度与体积预测的计算插件；基于极限平衡理论和剖面线扫描算法，引入安全系数分析和失效概率分析，实现了水库岸坡模型构建和稳定性计算一体化的程序插件，使得区域风险评价和单体风险评价通过GIS得到了较好的融合，提高了水库塌岸风险评价的定量化程度。

本书可供从事水库塌岸风险评价、边坡稳定性、区域稳定性以及GIS二次开发等方面研究的科研工作者参考，也可供相关专业高校师生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

GIS支持下的水库塌岸预测与风险评价 / 王小东，戴福初，孟令超著. -- 北京 : 中国水利水电出版社，2018.7

（水科学博士文库）

ISBN 978-7-5170-6502-9

Ⅰ. ①G… Ⅱ. ①王… ②戴… ③孟… Ⅲ. ①水库－塌岸－预测②水库－塌岸－风险评价 Ⅳ. ①TV697.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第124385号

书名	水科学博士文库 **GIS支持下的水库塌岸预测与风险评价** GIS ZHICHI XIA DE SHUIKU TA'AN YUCE YU FENGXIAN PINGJIA
作者	王小东 戴福初 孟令超 著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排版	中国水利水电出版社微机排版中心
印刷	天津嘉恒印务有限公司
规格	170mm×240mm 16开本 8.5印张 162千字
版次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印数	0001—1000册
定价	**48.00**元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

QIANYAN

河流在天然状态下，丰水期水位上涨，枯水期水位下降，逐渐形成较为稳定的河流岸坡。但由于水库的建造和蓄水后，对库岸已存在的不稳定地质体和原有的滑坡、崩塌体会产生浸润和浮托作用，且在水电站运行中，库水位的涨落、风浪作用、库水动力作用等都将对河流岸坡的稳定性产生不利影响，必然产生松散堆积层岸坡的库岸再造。

水库塌岸威胁着水库沿岸城镇、道路、农田和人民生命财产安全，形成的大量土石淤积于库中，减少了水库的有效库容，并改变了河流形态，影响港口、航道的正常运行，易引发安全事故。

本书以金沙江溪洛渡水电工程为例，研究水库蓄水后的水库塌岸预测与风险评价问题，在详细的野外调查和室内分析的基础上，基于高分辨率数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）和航空影像，以地理信息系统（Geographic Information System，GIS）组件开发模式，将塌岸预测方法、边坡极限平衡方法以及概率分析方法嵌入GIS软件平台，开展水库涉水岸坡的塌岸范围预测与稳定性评价，并利用GIS空间分析功能将塌岸稳定性评价成果应用于塌岸风险评价之中，以满足不同层次的风险表达，主要研究成果如下：

（1）基于DEM和数字正射影像（Digtal Orthophoto Map，DOM）的水库塌岸预测参数获取。水上及水下稳定坡角是进行水库塌岸预测的关键指标，单纯依靠野外测量的方法难以满足要求。本书利用高分辨率影像获取地貌信息，基于高分辨率DEM获取地形信息，实现了大范围内水上及水下稳定坡角的批量获取。

（2）基于DEM的水库塌岸范围预测插件开发与应用。针对侵蚀型塌岸，基于GIS组件进行插件开发，将山区河道型水库塌岸预测的“两段法”从二维空间拓展到三维空间，将二维的塌岸宽度预测

拓展到三维的塌岸体积预测和塌岸后的岸坡形态预测。

(3) 基于 DEM 的潜在塌岸体三维稳定性计算。针对滑移型塌岸，通过二维毕肖普法，搜索得到主剖面位置处对应的临界圆弧滑动面，以该临界圆弧滑动面的圆心和半径构造三维球形滑动面；结合潜在塌岸体 DEM 构建潜在塌岸体的三维地质模型，引入三维毕肖普法，实现三维安全系数的计算。

(4) 基于 DEM 的剖面线扫描算法的岸坡稳定性评价。以极限平衡法为基础，对可能发生滑移型塌岸的区域，以 DEM 构造剖面线进行扫描的方式，实现多个二维剖面空间的安全系数计算；以多个安全系数表达岸坡的稳定状态，并引入概率分析的方法，对岸坡的稳定性进行可靠度分析。

(5) 基于 GIS 的水库塌岸风险评价。借助 GIS 这一桥梁，将单体塌岸风险评价与区域塌岸风险评价相结合，提高了区域塌岸风险评价的定量化程度。

全书共 6 章，包括：绪论，溪洛渡库区地质环境与塌岸条件，基于 GIS 的侵蚀型塌岸预测研究，基于 GIS 的滑移型塌岸预测研究，水库塌岸风险评价，结论与展望。本书的出版得到了 NSFC-河南联合基金项目（U1704243）、河南省科技攻关项目(152102210111)、河南省科技创新人才计划（154100510006）、华北水利水电大学高层次人才科研启动项目（201402）、华北水利水电大学青年科技人才创新计划（70461）的联合资助。

本书所涉及的研究工作尚有不足之处，需要继续深入探讨。限于作者水平，书中不免存在疏漏，敬请广大读者批评指正。

作者

2018 年 3 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目录

MULU

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　研究背景和意义 …… 1

1.2　国内外研究现状及存在的问题 …… 2

1.3　研究方法与技术路线 …… 10

1.4　研究内容与创新点 …… 11

第 2 章　溪洛渡库区地质环境与塌岸条件 …… 14

2.1　区域地质环境 …… 14

2.2　塌岸发生条件分析 …… 19

2.3　塌岸类型预测 …… 27

第 3 章　基于 GIS 的侵蚀型塌岸预测研究 …… 37

3.1　侵蚀型塌岸预测方法 …… 37

3.2　侵蚀型塌岸预测参数获取 …… 39

3.3　基于 GIS 的侵蚀型塌岸预测 …… 54

第 4 章　基于 GIS 的滑移型塌岸预测研究 …… 65

4.1　基于 DEM 的滑移型塌岸安全系数计算与应用 …… 65

4.2　基于 DEM 的剖面线扫描算法计算塌岸安全系数 …… 82

4.3　基于 GIS 的滑移型塌岸可靠度分析 …… 96

第 5 章　水库塌岸风险评价 …… 108

5.1　水库塌岸风险评价内容与方法 …… 108

5.2　水库塌岸风险评价的实施流程 …… 110

第 6 章　结论与展望 …… 115

6.1　结论 …… 115

6.2　展望 …… 116

参考文献 …… 117

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

河流在多年的运行中，丰水期水位上涨，枯水期水位下降，逐渐形成较为稳定的河流岸坡。但由于水库的建造，库区地质环境和水文条件较之前发生了前所未有的改变，特别是水库蓄水之后，库岸边坡在风浪和水位变化等因素的作用下，原有的平衡条件被打破，发生坍塌，以各种各样的库岸再造方式，使库岸达到新的平衡状态。水库塌岸威胁着水库沿岸城镇、道路、农田和人民生命财产安全，塌岸形成的大量土石淤积于库中，减少了水库的有效库容，并能改变河流形态，影响港口、航道的正常运行，易引发安全事故（缪吉伦等，2003；何良德等，2007；尚敏，2007）。

溪洛渡水电站是金沙江水电基地下游四个巨型水电站中最大的一个，控制流域面积45.4万km^2，多年平均年径流量为1436亿m^3；最大坝高为278m，水库正常蓄水位为600m，死水位为540m，水库总库容为126.7亿m^3，调节库容为64.6亿m^3，可进行不完全年调节；左、右两岸布置地下厂房，各安装9台77万kW的水轮发电机组，电站总装机1386万kW，多年平均年发电量为571.2亿kW·h，是中国第二、世界第三大水电站。溪洛渡水电站于2003年年底开始筹建，2005年底正式开工，2007年实现截流，2013年首批机组发电，2015年工程完工。

随着溪洛渡水电站的开工建设，开展库岸稳定性研究已成为紧迫性任务。水库在蓄水后，对库岸已存在的不稳定地质体和原有的滑坡、崩塌体会产生浸润和浮托作用，且在水电站运行中，库水位的涨落、风浪作用、库水动力作用等将对河流岸坡稳定性产生不利影响，必然产生松散堆积层岸坡的库岸再造。同时，研究区内松散堆积类型众多，不仅有河流相堆积，而且有广泛分布的崩塌堆积物、滑坡堆积物等，因此库岸再造的形式必然呈现出多样化的特点。

在中国长江三峡集团公司委托的“金沙江溪洛渡水电站库岸稳定性综合研究”项目的支持下，笔者所在研究团队对溪洛渡库区进行了详细的野外调查，对可能引发水库塌岸的崩塌堆积体、滑坡堆积物等第四系松散堆积体开展了细致的工作，本书以单一塌岸体发生范围和稳定性分析为切入点，将传统的二维

塌岸宽度预测拓展到三维体积预测和形态预测，融合 GIS 空间分析功能和应用开发技术，使水库塌岸范围预测实现参数化、立体化和自动化；引入安全系数分析和失效概率分析，对滑移型塌岸的稳定性进行定量评价，并将这一成果应用于区域塌岸风险评价之中，丰富了传统水库塌岸风险评价的内容，为有效规避塌岸风险提供了更具针对性的信息，对水库的安全运营、防灾减灾、移民安置和地质环境保护等具有重要意义。

1.2 国内外研究现状及存在的问题

1.2.1 国外研究现状

水库塌岸问题首先是苏联科学院院士萨瓦连斯基于 1935 年提出。他指出，水库塌岸是由于河道蓄水后，水位抬高，吃水线与基岩岸坡相接触，岸坡的天然平衡条件遭到破坏而引起的。他明确指出，波浪是水库塌岸的主要因素之一。

什利亚莫夫于 1937 年开始研究水库塌岸问题。他认为水库塌岸的特征及因素决定于水文因素、地质地貌因素及其他因素。水文因素包括流速、击岸浪的波高、水库动态；地质地貌因素包含被冲刷岩层的产状、岩土体的物理力学性质、被冲刷岩土体的均匀性、岸坡形态；其他因素主要是指现状岸坡的植被保护、岸坡的切割程度及天气因素等。其中前两种因素决定最终塌岸的级别，第三种因素仅对岸坡的发展特征及塌岸速度有影响。前两种因素中，以水库动态和组成冲刷坡的岩土体性质为主要因素。他还指出水上岸坡形态主要决定于风化作用，其坡角与相同地质特点的天然斜坡坡角相同。什利亚莫夫注意到波浪对水库塌岸所起的作用，于 1938 年提出了预测塌岸的方法，并提出了计算浅滩宽度的公式：

$$L=(H+2h+h_b)\cot\alpha \tag{1.1}$$

式中：L 为浅滩宽度，m；H 为水位变幅，m；h_b 为波浪爬升高度，m；h 为波高，m；α 为浅滩坡角，(°)，它和岩石性质及波高有关。

什利亚莫夫并没有提出确定浅滩位置的方法，也没有提出确定水上岸坡及塌岸速度的方法，用式 (1.1) 所求得的浅滩宽度不能作为塌岸的宽度。

之后苏联学者卡丘金认为，水库塌岸作用主要和库区的波浪因素有关。波浪作用范围，除了水位消落带外，其上界位于高水位以上波浪爬升带，下界位于最低水位下波浪作用影响深度处。卡丘金于 1949 年提出了计算塌岸宽度的计算公式：

$$S=N[(A+h_p+h_b)\cot\alpha+(h_s-h_b-h_1)\cot\beta-(A+h_p)\cot\gamma] \tag{1.2}$$

其中

$$h_b = 3.2kh\tan\alpha$$

$$h_2 = h_s - h_b - h_1$$

式中：S 为最终塌岸宽度；N 为与土颗粒成分有关的系数，土石颗粒越粗，就越易于形成水下堆积岸坡，所以按卡丘金提供的经验数据，砂土的 N 值为 0.5，亚黏土为 0.6，黏土为 1.0，当原始岸坡较陡、库水水深较大时，难以形成水下堆积阶地，此时 N 实际应等于 1；A 为水位变化幅度，即设计高水位与设计低水位差值；h_p 为波浪影响深度，设计低水位以下波浪影响深度一般取 1～2倍浪高，如果浪高取 0.5m 时，浪高影响深度取 1m；h_b 为浪爬高度；k 为被冲蚀的岸坡表面糙度系数，一般砂质岸坡取 0.55～0.75，砾石质岸坡 0.85～0.9，混凝土取 1，抛石取 0.775；坡度 α 可参照河谷边岸平水位处河滨浅滩坡角值，当已知作用于该岸坡地带波浪波高和组成岸坡土石颗粒成分时，也可根据各种颗粒成分沉积物的水下岸坡坡度和浪高的关系图解确定；h 为波浪波高；h_s 为设计高水位以上岸坡的高度；h_2 为浪爬高度以上斜坡高度；h_1 为黏性土斜坡上部的垂直陡坎坎高，根据土力学计算确定，实际工作中可采用被调查岸坡浪爬高度以上至岸坡陡缓交界点的高差值；α 为水库水位变动带和波浪影响范围内，形成均一的浅滩冲磨蚀坡角；β 为水上岸坡的稳定坡角；γ 为原始岸坡坡角。

卡丘金计算塌岸预测图解如图 1.1 所示。

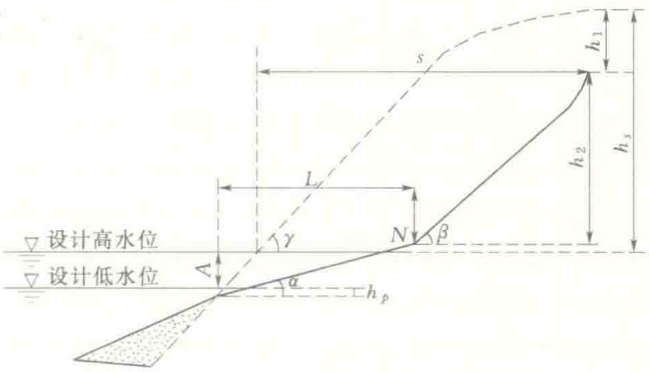


图 1.1 卡丘金图解塌岸预测原理

该经验公式在相当长一段时期内得到了广泛的应用。卡丘金的方法考虑了塌岸后形成的浅滩并非全部是磨蚀的，其中一部分是由未被波浪搬运走的岸壁破坏产物中粗颗粒堆积物形成，因此卡丘金的方法较以前的传统方法前进了一大步。卡丘金通过对大量初期资料的研究，特别是对塌岸中的速度与波高、岩性及岸坡高度关系研究，提出了与波能、岩性及时间有关的岸坡塌岸速度计算经验公式。

苏联专家卓洛塔廖夫对水库塌岸问题做过很多研究。他将影响水库塌岸范

围及速度的因素分为三组，并详细分析了各因素的作用。他按水库的水文特点，将水库分为上游及下游两部分：上游部分水面狭窄，小波浪和洪水时形成的水流将是库岸的主要破坏力；下游部分水面宽广，波高很大，波浪是库岸破坏的主要因素。波浪作用范围的上界至波浪爬升高程，下界至波浪作用影响深度处，在此以下的物质将不受波浪作用影响，波浪作用影响深度是随着水库运用年限增多而减小。卓洛塔廖夫合理地将在波浪作用下塌岸后形成的剖面外形结构分为水上岸坡、波浪爬升带斜坡、磨蚀浅滩、堆积浅滩斜坡和浅滩外缘斜坡五个带，并推荐了各带坡角的确定方法及资料，他根据库岸堆积浅滩是由岸壁破坏物质中较粗颗粒所形成的概念，建议利用在堆积浅滩中保留下来的粗粒部分占破坏物质总数的百分含量来作为堆积系数，以便确定塌岸后稳定剖面的位置，再量取塌岸的宽度。为了预测塌岸速度，卓洛塔廖夫建议将水库塌岸分为两个阶段，即水库运行 10 年阶段及最终塌岸阶段。这两个阶段所形成的浅滩各带坡角及浅滩眉峰水深是不同的，并推荐了预测各个阶段塌岸宽度所需要的浅滩坡角及浅滩眉峰水深的资料，如图 1.2 所示。

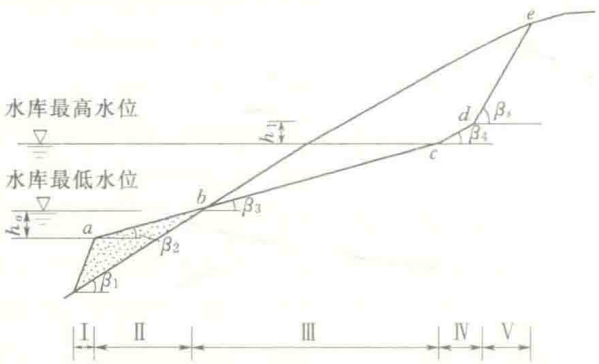


图 1.2　卓洛塔廖夫法塌岸图解原理

1954 年培什金发表了《水库库岸动力作用问题》一文，强调了水库中库岸动力作用的基本因素为波浪及水库中水位的变化，它很大程度上决定着塌岸的宽度。此外，原始岸坡的坡形特征、切割程度及植被保护等亦对塌岸宽度及方式有影响，培什金认为，当水库水位消落时，波间距及水深相应减小，在一定风力作用下所形成的波高亦相应减小，即对库岸的作用亦随水位消落而逐渐减小；塌岸后形成的稳定浅滩坡角将随水位高程降低而增大。因此，培什金建议根据水位不同所形成的击波间距及水深来计算波高，以相应的波高及岩土体所具有的浅滩坡角来绘制塌岸后所形成的库岸稳定剖面。然后，假定所形成的浅滩全部为磨蚀导致，以便确定塌岸后剖面位置，以岸坡的眉峰线后退距离作为塌岸最大宽度 S_M，将其乘上卡丘金的系数 N 即为塌岸宽度 S_B：

$$S_B = NS_M \tag{1.3}$$

培什金方法对于水面狭窄、水深不大的中小型水库效果较好，对于水面极宽、水深很大、岸坡较陡的大型水库效果较差。培什金提出了用数学分析法预测水库塌岸速度，即预测水库蓄水后不同时间的塌岸速度方法。他认为水库蓄水初期的塌岸速度是非常快的，然后逐渐减慢，水库蓄水后任一年的塌岸速度变化可用式（1.4）表示。经过大量实践的检验及监测，由培什金提出的塌岸速度关系式是合理的。

$$v_t = v_m e^{-x} \tag{1.4}$$

式中：v_t 为水库蓄水后任一时间的塌岸速度，m/a；v_m 为蓄水初年的塌岸速度，m/a；$-x$ 为与波能、时间、岸坡地质条件及植被保护相关的函数。

康德拉捷夫在1953年提出了一种塌岸宽度计算的分析方法，他认为浅滩表面的外形轮廓线不是直线和折线形，而是抛物线形，这种方法一般适用于岩性条件单一、由砂土和亚砂土等非黏性土组成的非滑动斜坡，且均不考虑泥沙纵向移动的情况。他建议用下面的公式计算任一时间的塌岸宽度和塌岸量 W_t：

$$l = L(1 - e^{-\frac{v_0 t}{L}}) \tag{1.5}$$

$$W_t = W_0(1 - e^{Kt}) \tag{1.6}$$

其中

$$K = \frac{1}{t}\ln\left(1 - \frac{W_1}{W_0}\right) \tag{1.7}$$

式中：l 为水库蓄水任意时期的塌岸宽度，m；L 为水库塌岸最终宽度，m；W_0 为水库塌岸体积，m^3；v_0 为水库蓄水初年塌岸速度，m/a；t 为计算年限，a；W_t 为水库蓄水年 t_1 时的塌岸体积，m^3；

康德拉捷夫方法包括四个塌岸因素：波浪作用、水位变化、组成岸壁的岩土体性质和原始岸坡外形。

综上所述，在以苏联学者为主的水库塌岸预测研究中，主要预测方法可以分为两派：一派是以卓洛塔廖夫为代表的条件类比法；另一派则为康德拉捷夫为代表的数学分析法。两派的研究均以计算塌岸宽度为最终目的，在此过程中，对影响塌岸发生的参数进行了较深入的研究（维·尼·诺沃日洛夫，1956；B.Д. 洛姆塔泽，1985；张倬元，2003，汤明高，2007；阙金声，2007）。

与苏联学者的研究不同，西方学者着重从塌岸机理方面进行研究。以Amiri（2003）为代表的一些学者对塌岸的过程进行了深入研究，主要从河流侵蚀的角度出发研究其岸坡物质流失与河道地形变化的关系，提出了一些模型和方法用于计算侵蚀量以及预测达到平衡状态时的岸坡形态（Duan 等，2005；Istanbulluoglu，2005；Constantine，2009；Ercan 和 Younis，2009；Taghavi-Jelodar，2009；Vilmundardóttir，2010），并在洪水位以及模拟水位试验时，监测河岸侵蚀的变化情况，对岸坡的形态变化做出分析和考量，以便于水利部门对岸坡物质流失等的管理（Lawler，2001；Diane Saint 等，2001；Carroll

需要全本请访问 www.ertongbook.com

等，2004；Piégay 等，2005）。

以 Osman 等（1998）为代表的一些学者从岸坡的物理模型出发，以评价岸坡稳定性为目标，从河床冲深与河岸冲刷两个方面来分析黏性岸坡的不稳定性，认为塌岸最常见的原因是河床冲深与河岸冲刷引起的，河岸侧向冲刷过程使河道宽度增加，导致岸坡变陡，降低了河岸稳定性；河床下切增加河岸高度，也降低了河岸稳定性。然而，引起河床冲深与河岸冲刷的先决条件是水流条件，水流作用越强，其塌岸发生的可能性及强度就越大。因此，塌岸发生的原因主要取决于水流条件。河床冲深与河岸冲刷的相对数量是河岸物质组成的性质、河岸几何形态、河床物质组成类型及水流特性的函数。同时认为，岸坡因土体过重而引起的失稳与土壤性质和河岸几何形态密切相关（Thorne，1981；Darby，1994，1996，2000，2007），并考虑岸坡土体的物质组成和属性，将岸坡在竖直方向上按土体性质进行分层，且考虑水位变化、渗流等因素对岸坡稳定性的影响（Howard 等，1988；Mark，2004；Hubble，2004；Chu-Agor 等，2008；Újvári，2009）。

Millar 等（2000）在 Huang（1997）与 White（1982）等学者研究砂砾石河流河岸稳定性模型的基础上，考虑了中粒径物质对河岸稳定性的影响，并根据具体情况对河岸泥沙摩擦角进行修正，着重分析了河流岸坡不同的植被情况时，其摩擦角的值相差较大，对河岸的稳定性产生较大影响，并认为植被较好河岸的稳定性约为植被较差河岸的 3 倍，其他一些学者针对植被对岸坡稳定的影响做了类似的研究（Wiel 和 Darby，2007；Pizzuto，2010）。

美国学者 Simon 等认为影响河岸侵蚀的主要因素有水力参数、河床与河岸物质组成的特性、河岸的特性、风浪影响、气候影响、生物影响、人类活动的影响等。虽然引起塌岸的因素很多，但在众多因素中，大多数学者认为：塌岸的发生离不开水流及边界这两个基本条件，其中水流条件起着决定性的作用，是塌岸发生发展的主导因素，其他的因素也是通过对水流与边界的改变来影响塌岸的强度（Simon，Collison，2002；Simon 等，2003；Simon，2005；Parker 等，2008；Pollen，2007）。

日本京都大学的 Nagata 等（2000）推导出了计算河道变形及平面变化的二维河流动力学方程，运用数值模拟方法进行了库岸再造速率以及范围预测的尝试，但由于该方法只适用于较均质的砂质库岸，而一般塌岸的形成机制复杂，影响塌岸的水文动态都很难模拟，因此这方面的研究还处在试验阶段。

Langendoen（2000）开发了 CONCEPTS（CONservational Channel Evolution and Pollutant Transport System）系统，该系统模拟了河道中一维流场、分级泥沙传输、河道展宽、植被等对岸坡结构的影响等（Langendoen 等，1999；Simon 等，1999；Langendoen，2000）。

Simon 等基于 Excel 开发了 BSTEM 模型（Bank - Stability and Toe Erosion Model），通过选择剪切面、土层属性、孔隙水压力、水位线、植被状况以及岸坡趾部侵蚀算法等，对岸坡稳定性做出评价。增强的 BSTEM 模型使用户可在平面失稳模式和悬臂梁失稳模式之中进行选择（Wood，2001；Pollen，Simon，Langendoen，2007）。

本书融合了苏联学者和西方学者的研究思路和方法，在对研究区进行塌岸模式和机理研究的基础上，针对不同类型的塌岸，进行塌岸的范围预测和稳定性分析。

1.2.2 国内研究现状

我国水库塌岸预测最早应用于官厅水库。1954 年，修建在永定河上的水利工程——官厅水库发生了比较严重的水库塌岸问题，孙广忠（1958）对官厅水库的塌岸问题进行了详细的研究，参照已有的方法，特别是康德拉捷夫法，提出了一种水库下游区的塌岸预测方法，他认为浅滩外形具有指数曲线性质，预测时关键是要弄清楚在塌岸过程中库岸剖面外形的变化及堆积系数，确定库岸剖面为任一形状时的位置，从而可以求得塌岸的宽度及塌岸量，孙广忠提出的方法在官厅水库的塌岸预测中得到了很好的应用。

随着黄河上水利工程（如龙羊峡水库、三门峡水库等）的修建，我国学者对水库库岸稳定性、库岸变形监测预警、治理等进行了较为全面的探讨，形成了适用于黄土地区水库库岸稳定性判别、预测的实用方法。

红层构成的岸坡较由坚硬岩体构成的岸坡稳定性差，但又较由松散土体构成的岸坡稳定性好。因此，预测红层岸坡塌岸的方法不能照搬岩体或者松散土体的预测方法。徐瑞春（2003）在对四川盆地红层河谷边坡多年研究的基础上，考虑红层中普遍存在的层间剪切带、可溶性盐等问题，对红层边坡进行分类，根据经验对红层塌岸预测图解法进行了若干修正，该法属于经验图解法，其有效性有待进一步验证。

随着三峡水库的建设与分期蓄水策略的实施，三峡水库的塌岸问题成为近年来国内学者研究的热点。唐朝晖等（1999）运用稳态坡形法对巫山县城新址库岸再造进行了预测，即在系统分析库岸地质环境条件的基础上，根据现代长江河谷岸坡形态参数类推水库蓄水后相应水位作用带的最终稳定坡角来获得最终库岸再造带及其平面展布。刘红星等（2002）对长江中下游岸坡的破坏形式与影响岸坡稳定性的因素进行了分析，提出大致影响岸坡稳定性的因素可划分为地质、河流及水动力学、气象水文等自然因素以及人类活动因素等。唐辉明（2003）在对三峡水库塌岸机理与模式研究的基础上，提出相应的工程治理方案。徐永辉等（2006）从蓄水后库区地貌的演化过程，探讨三峡水库蓄水对岸

坡稳定性的影响。阙金声（2007）对三峡库区涪陵区水库塌岸地质条件进行了详细调研，对塌岸的影响因素、预测参数及取值、预测方法及其适宜性进行系统分析，认为传统的方法并不完全适用于山区河道型水库塌岸预测，提出采用粗糙集理论、BP 神经网络和可拓学理论三者相结合的非线性塌岸预测方法。

目前，进行水库塌岸预测的方法主要有计算法、图解法、工程地质类比法、模拟试验法和水动力预测法等。在实际工作中，以图解法与计算法应用最广。在国内已建水库的塌岸预测中，采用较多的是卡丘金的计算公式（最终预测）和卓洛塔廖夫的图解法（10 年和最终预测）。王跃敏等（2000）通过对福建水口水库塌岸的长期观测研究，提出了适合我国南方山区峡谷型水库的预测方法——“两段法”，并给出其适用范围，“两段法”预测的塌岸宽度比较接近实际。马淑芝、贾洪彪等（2002）在张咸恭等（1983）提出的稳定坡形、坡角地质类比法的基础上，提出了稳态坡形类比法，根据工程地质类比法的原则，对不同工程性质的岸坡选择不同的稳态坡形，充分考虑了岸坡岩土体工程性质的差异，使预测结果更趋于合理、准确，稳态坡形类比法在三峡库区移民迁建城镇库岸再造预测中得到了较好的应用。

近年来，国内许多专家学者在水库塌岸传统预测方法基础上，提出一些新的水库塌岸预测方法，为水库岸坡塌岸和稳定性预测评价提供了许多参考。汤明高等（2006）、许强等（2007）通过对三峡水库塌岸机理与模式的研究，提出了三种塌岸预测方法：岸坡结构法、三段法和多元回归分析法，形成了滑移型塌岸、崩塌型塌岸和流土型塌岸的预测方法。

综上所述，国内在重视机理研究的基础上，对塌岸的预测方法研究较多，特别是针对三峡水库的塌岸研究取得了丰富的成果。

1.2.3　塌岸研究中的 GIS 应用现状

GIS 技术的发展，为水库塌岸预测提供了新的思路和方法。国外学者在对河流岸坡稳定性研究中较早地应用了 GIS 技术。Downward 等（1994）基于 GIS 矢量分析方法，对岸坡在平面上的变化进行了展示；Kelley 等（2000）在进行缅因州海岸的稳定性制图中采用了 GIS 技术；Winterbottom 等（2000）在河岸侵蚀概率分析中引入了 GIS 方法，使其能够在地图上直观地进行表达；Zimmer 等（2004）利用间隔 13 年的两期不同的遥感影像获取湖岸的变化状况，以 GIS 矢量格式数据展示这一变化，并分析影响岸坡侵蚀的因素，预测未来的变化趋势；Bhakal 等（2005）通过卫星数据对过去 30 年间雅鲁藏布江的河道变迁进行研究，并探讨河道变迁和河岸侵蚀之间的关系；Buckingham 等（2007）为了研究城市化进程对内华达州拉斯维加斯市水文系统的影响状况，通过 24 年间 3 个时段的影像，基于 GIS 空间分析，对河道变化与侵蚀进

行评价；Stone 等（2010）基于 ArcGIS 平台开发了河道稳定性评价的工具，通过将野外调查获得的参数（包括河岸坡度、河岸植被等）输入系统，进行河道稳定性评价。

我国在地质灾害的研究与评价中，较早地引入了 GIS 技术，比较有代表性的有：唐川等（1998）利用 GIS 的叠加分析功能编制了云南省地震诱发滑坡危险性预测图；何政伟等（2004）构建了基于 GIS 的库区塌岸空间信息管理系统；向喜琼等（2000）提出了基于 GIS 的地质灾害风险评价、管理的总体思路和具体步骤；殷坤龙等（2007）基于信息量模型将多个单因子图层加权叠加进行滑坡危险性评价。

就目前而言，GIS 在地质灾害研究领域的应用已经十分普及，GIS 在塌岸研究领域的应用也是如此，但大多是将 GIS 作为数据处理、结果展示的工具，其强大的空间分析功能没有进一步开发出来，应用深度还有待进一步加强。

1.2.4 国内外研究中存在的问题

通过对国内外塌岸研究现状的分析可知，塌岸研究主要体现在塌岸范围预测、塌岸机理研究和塌岸预测参数研究三个方面，取得了丰硕的成果，但同样存在以下一些不尽如人意的地方。

（1）以单体塌岸预测为主。单体塌岸预测需建立在对库岸边坡详细调查与分析的基础上，才能获得塌岸预测参数，但针对大区域塌岸研究而言，这一过程耗时长，因此，结合摄影测量或遥感进行区域上的塌岸调查与预测参数的提取，不失为一种提高效率的方法。

（2）以二维的塌岸宽度预测为主。目前塌岸预测以获得岸坡最终稳定状态时的塌岸宽度为主，较少涉及塌岸的体积预测和形态预测。

（3）以定性的塌岸预测为主。塌岸预测所给出的塌岸宽度，均为水库运行稳定之后的预测结果，而这一过程往往要经历一段很长的时间，因此，预测的结果难以对岸坡现今的稳定状态做出定量化评价。

（4）GIS 应用于塌岸研究的程度尚浅。GIS 作为一个有效处理空间数据的工具被广泛应用于塌岸的分析与评价，但应用的程度较低，GIS 在塌岸研究中的应用停留在数据处理、数据存储和成果表达的层次上，没有将空间分析深层次地应用于塌岸研究中。

（5）塌岸风险评价的研究程度尚浅。塌岸风险评价多沿用地质灾害风险评价的模式，采用图层叠加的方式实现，与单体的定量化计算岸坡稳定的安全系数和失效概率等参数相互孤立，导致单体塌岸稳定性计算的成果没有很好地在区域风险评价中得到体现。

1.3 研究方法与技术路线

1.3.1 研究方法

本书以金沙江下游溪洛渡水电站库区为研究区，采取从坝址区沿江向上游回水区终点进行野外调查的方法，获取金沙江沿江600m蓄水位高程附近松散堆积体的分布状况，通过室内试验，获取堆积体的物质组成、原位密度；然后采用地理信息系统空间分析方法，由点到面，通过模型构建和参数选取，对回水区典型岸坡进行稳定性评价；基于地理信息系统组件开发方式，开发独立应用系统或独立应用插件，进行水库塌岸的范围预测与稳定性评价，主要研究方法如下：

(1) 野外调查与室内试验。通过野外调查对研究区松散堆积体分布状况有较深入的认识和了解，并对典型堆积体取样开展室内土工试验，获取松散堆积物的粒度组成与原位密度，为单体塌岸模型构建、塌岸预测与稳定性分析提供基础数据。

(2) 影像解译与GIS空间分析。通过对研究区0.5m×0.5m航空影像的解译，获取河流中心线、枯水位线、洪水位线、河漫滩等信息，结合2.5m×2.5m DEM，通过GIS空间分析和二次开发等方式进行数据挖掘，提取塌岸预测所需参数，并与野外实测或综合计算的参数进行对比分析，为塌岸预测模型所需参数的获取提供新的途径。

(3) 基于高分辨率DEM的极限平衡法的应用。在岸坡稳定性分析中，极限平衡分析法是最常用的方法，其应用的前提是首先构建二维或三维的地质模型，高分辨率DEM为地质模型的构建提供了方便，因此，将极限平衡方法与高分辨率DEM数据相结合，可在GIS平台下应用。

(4) GIS组件开发方法的应用。地理信息系统桌面平台如ESRI公司的ArcGIS Desktop平台，以实现通用的GIS功能为主，但针对某一行业而言，则具有更多专业化应用的需求，GIS组件开发模式使这一需求得以实现，即在地理信息系统基本功能的基础上，开发更具专业化和适用性的模块，主要有两种方式：一是通过GIS二次开发组件进行应用程序的开发，即脱离宿主平台，在可视化开发平台中，嵌入GIS组件，最终完成独立应用系统的开发；二是开发专业应用程序插件，添加到现有宿主桌面平台中进行应用，或将其应用于独立应用开发程序中。插件开发适用于多个宿主程序，更加灵活，例如，将基于ArcGIS Engine（以下简称AE）组件开发的插件嵌入ArcGIS Desktop平台后，能够同时利用该软件的其他功能。

1.3.2 技术路线

针对目前水库塌岸的研究现状与存在的问题，本书以 GIS 为技术手段，对水库塌岸预测与风险评价的流程、方法和实现进行了系统的研究，采用的技术路线如图 1.3 所示。

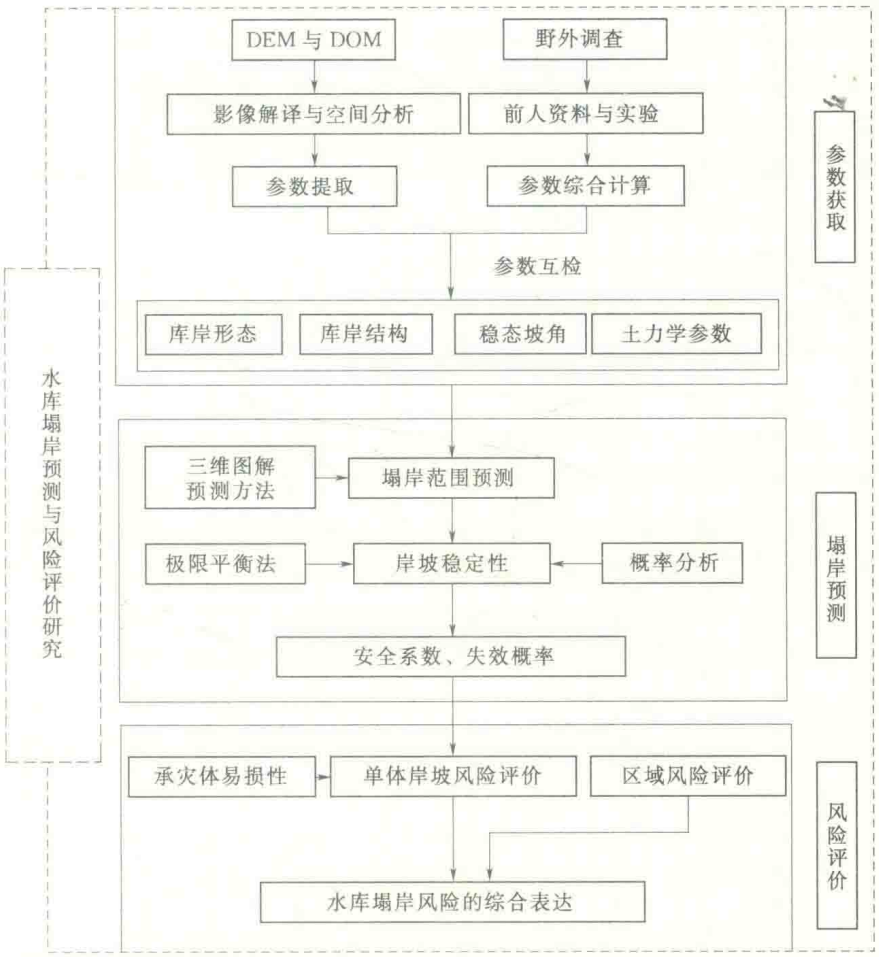


图 1.3 技术路线图

1.4 研究内容与创新点

1.4.1 研究内容

以金沙江溪洛渡库区为例，着重进行了以下五个方面的研究：

(1) 水库塌岸预测参数自动提取方法研究。在水库塌岸预测中，水上和水

需要全本请访问 www.ertongbook.com