

# 三峡库区库岸公路路基安全风险评价

牛衍亮<sup>1</sup>, 黄如宝<sup>1</sup>, 周直<sup>2</sup>, 韩笑蕾<sup>3</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 重庆交通大学 管理学院, 重庆 400074; 3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 从风险分析角度, 展开对三峡库区库岸公路路基安全风险的研究. 构建了基于粗糙集理论的库岸公路路基安全风险单因素估计模型, 通过该模型可以针对特定路段的具体情况得出适合于本路段的各风险因素权重; 进而通过对库岸公路路基各安全风险因素的分析, 构建了安全风险模糊综合评价模型. 且以渝巴路云阳境内白水滩至南溪段库岸公路为背景, 根据该段公路的实际工程情况, 对库岸安全风险因素进行了分析研究, 运用已建立的数学模型对渝巴公路白南段路基进行了安全风险评价.

**关键词:** 库岸路基; 安全风险因素; 粗糙集模型; 模糊综合评价

**中图分类号:** F287.3

**文献标识码:** A

## Risk Assessment of Bank Roadbed Security Along Three Gorges

NIU Yanliang<sup>1</sup>, HUANG Rubao<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>2</sup>, HAN Xiaolei<sup>3</sup>

(1. College of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A research was conducted upon the risk assessment of bank roadbed security along Three Gorges. Based on the rough set theory, an evaluation model of risk factors was established. A feasible method was proposed to determine the weight of the factors on the basis of an analysis of the actual bank road situation. According to the fuzzy mathematics theory, a model of risk assessment of a combination of factors was established. The information of the section of Yuba bank road from Baishuitan to Nanxi in Yunyang County was collected, and the established models were adopted to assess the bank roadbed security of Bai-Nan section along Yu-Ba road.

**Key words:** bank roadbed; security risk factors; rough set

model; fuzzy assessment of a combination of factors

随着三峡大坝蓄水位达到设计水位, 三峡库区库岸公路路基安全风险问题不仅对公路设计、施工有重要的影响, 而且对已建公路的安全运营也有重大的影响. 但由于导致库区岸坡安全风险的影响因素多, 且影响关系复杂<sup>[1]</sup>, 至今尚未形成考虑多因素影响下的库岸公路路基安全风险管理体系. 建立和完善库岸公路路基安全风险预测及评价理论, 对库岸公路路基安全风险进行科学预测及评价, 实现对库岸公路的全面风险防范和管理, 不仅对保证库岸公路安全运营具有重要现实意义; 而且对今后库岸公路设计施工也具有参考价值; 对建立和完善库岸公路风险管理体系 also 具有重要的意义.

## 1 研究方法分析

针对安全风险问题的数学模型评价方法可以分为两类: 确定性分析方法和非确定性分析方法. 确定性分析评价方法主要以极限平衡法为主, 可参考有限元、有限差分、离散元等方法. 此类方法为从微观角度对某一断面进行评价, 可有效评价确定断面的库岸稳定系数, 然而不利于整个路段的宏观风险评价. 非确定性风险分析评价方法有: 因素综合评价法、模糊综合评价法、灰色理论分析法、神经网络分析法等.

### 1.1 采用非确定性风险分析方法的原因

库岸公路路基安全风险本身就是一个及其复杂的问题, 其中影响因素多表现不确定特性, 虽然利用确定性分析方法如极限平衡法可以有效评价库岸边坡的安全系数, 然而却难以以单一安全系数指标说明库岸公路的安全风险问题.

本文着手建立适合于多路段而非单一断面的库岸公路路基安全风险评价模型,研究对象为渝巴公路云阳境内白水滩至南溪长达 13 km 的一段公路,因此确定性分析方法不适于此类问题的研究。

## 1.2 基于粗糙集的库岸公路路基安全风险模糊综合评价方法分析

### 1.2.1 粗糙集本身的特点

粗糙集理论是一种研究不完整数据、模糊的和不确定性知识的表达、学习及归纳的数学工具,为研究不精确数据的分析、推理,挖掘数据间的关系,发现隐含的知识,揭示潜在的规律提供了行之有效的方法<sup>[2-3]</sup>。该理论的主要特点是:无需提供除问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,可以只根据观测数据,比较不完整知识的程度——粗糙度,删除冗余信息,分析属性间的依赖性与重要性,生成分类规则等,因而对问题的不确定性描述或处理是比较客观的<sup>[4-5]</sup>。在原始数据主要由专家判断得出的情况下,使用粗糙集理论的定权方法确定指标权重时,在保持解释性较强的优点的同时,还可增加评估的客观性。

### 1.2.2 由于风险评价因素的本身的模糊属性

库岸公路安全风险问题就其本身特征来说属于不确定性问题的一种,风险因素和风险后果指标具有一定的模糊性,利用模糊数学的原理将风险因素数字化,然后进行模糊综合评价符合安全风险评价定量分析的要求。而且影响库岸公路安全风险的因素多且复杂,可能某一安全风险因素同时隶属于多个稳定性级别,而隶属于各稳定性级别的隶属度不同,因此很难以统一标准的确定型数学模型进行度量。模糊数学方法能对大量的资料进行辨识,从中提取对岸坡稳定性贡献最大的影响因素,进行模糊综合评判,从而很好地解决安全风险分析这一模糊概念,是模拟人脑思维方式,提高认识库岸公路路基安全风险的一种有效方法。根据拟解决问题及工具的特点,故采用模糊综合评判方法。

### 1.2.3 适应风险管理的要求

风险管理包括风险识别、单因素风险估计、多因素综合风险评价、风险处理与控制四个部分,本文主要研究前三个环节,各风险因素的风险危害权重的确定既是单因素风险估计的内容又是多因素综合风险评价的重要环节;粗糙集理论是利用等价关系将研究空间的对象进行划分,通过分析评估指标观测数据间的关系特征来描述评估指标的权重,进而为安全风险模糊综合评价提供有力支撑。模糊综合评

价通过评估因素对各个风险等级的隶属度,结合粗糙集理论修正的因素风险权重,得出综合风险评价结果。两者具有互补效果,综合利用基于这两种理论的评估方法,对评估对象性质的刻画会更完整,更客观<sup>[3]</sup>。

## 2 三峡库区库岸公路路基安全风险因素识别

影响库岸公路路基安全风险因素众多,其中包括:社会因素,经济因素,军事因素,本文从工程风险管理角度研究库岸公路路基安全性问题。

由于各种安全风险因素对两类库岸公路路基的影响差异较大,因此需分类研究。通过大量的文献调查与理论研究分析,影响库岸公路路基安全风险因素大体可分为两类<sup>[6-12]</sup>。库岸公路路基安全风险因素如图 1~图 2 所示。

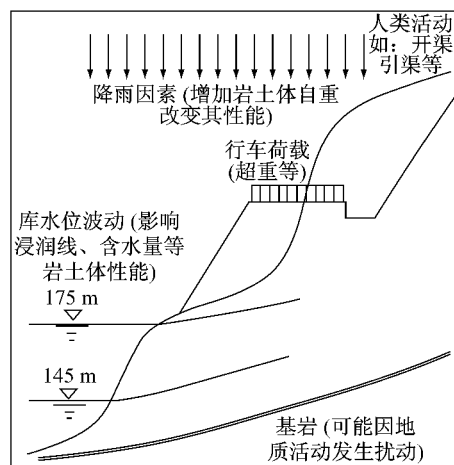


图1 库岸公路路基安全风险因素简图

Fig.1 Risk factors of bank roadbed security

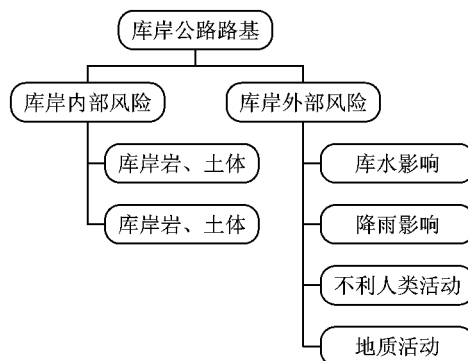


图2 库岸公路路基安全风险因素

Fig.2 Risk factors classification of bank roadbed security

### 3 渝巴公路云阳境内白南段库岸路基安全风险因素定权

#### 3.1 库岸岩、土体结构特征与坡型特征

由于岩质库岸和土质库岸的性能差别较大,对

渝巴路云阳境内白水滩至南溪段库岸路基安全风险的分析依然分为两种情况分析:岩质岸坡土质岸坡分别讨论. 根据渝巴公路白南段坡型特征,结合《库岸公路边坡稳定性风险分析》<sup>[6]</sup>、《库区公路边坡稳定性分析》<sup>[10]</sup>、《长江三峡工程库岸稳定性研究》<sup>[11]</sup>等研究,岩土体结构与坡型特征汇总如下:

表 1 库岸岩、土体坡型与结构特征分类汇总

Tab.1 The classification of the shapes and physical characters of bank roadbeds

公路里程	土质岸坡结构特征	坡高/m	坡度/°	公路里程	岩质岸坡结构特征	坡高/m	坡度/°
K39+960~ K40+770	残坡积土	60~80	35~50	K40+770~ K40+980	层状砂岩、 粘土岩	70~75	25~40
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
K49+930~ K50+060	人工堆积土	55~70	25~35	K50+990~ K53+330	层状碳酸盐岩	55~75	25~35

#### 3.2 基于粗糙集理论的渝巴路白南段库岸路基安全风险因素定权

进行安全风险因素定权有以下 3 个步骤:

##### (1) 确定知识表达体系

首先以风险因素评估指标体系中的指标组成属性集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_6\}$ , 即库岸公路路基安全风险的六个主要因素:岸坡结构特征、坡型、库水因素、降雨因素、地震因素及人类活动因素;分别以 10 段岩质库岸和 10 段土质库岸组成论域  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}$  分别评价各影响因素的重要性,构建关系表. 关系表中的行对应于对象  $x_i (i=1, 2, \dots, 10)$ , 列对应于  $x_i$  的属性  $a_j$ . 数值  $\pi_{ij}$  表示对应行所指要素  $x_i$  的属性  $a_j$  的取值,各因素的影响程度影响低、影响较低、影响较高和影响高按分值 1 到 4 赋值给  $\pi_{ij}$ .

##### (2) 确定等价集

以岩性岸坡为例,将知识体系中的因素分为两组  $A_1 = \{a_1, a_2\}$ ;  $A_2 = \{a_3, a_4, a_5, a_6\}$ , 分别求其等价类:

$$U/I_{nd}(A_1) = \{(x_1), (x_2), (x_3, x_5), (x_4), (x_6, x_7), (x_8), (x_9), (x_{10})\}$$

$$U/I_{nd}(A_1 - \{a_1\}) = \{(x_1, x_6, x_7, x_9), (x_2, x_3, x_5), (x_4), (x_8, x_{10})\}$$

$$U/I_{nd}(A_1 - \{a_2\}) = \{(x_1), (x_2, x_6, x_7), (x_3, x_4, x_5, x_9, x_{10}), (x_8)\}$$

$$U/I_{nd}(A_2) = \{(x_1), (x_2), (x_3), (x_4), (x_5), (x_6, x_7), (x_8), (x_9, x_{10})\}$$

$$U/I_{nd}(A_2 - \{a_3\}) = \{(x_1), (x_2, x_9, x_{10}), (x_3), (x_4), (x_5), (x_6, x_7), (x_8)\}$$

$$U/I_{nd}(A_2 - \{a_4\}) = \{(x_1), (x_2, x_6, x_7), (x_3), (x_4, x_5), (x_8), (x_9, x_{10})\}$$

$$U/I_{nd}(A_2 - \{a_5\}) = \{(x_1, x_6, x_7), (x_2), (x_3),$$

$$(x_4), (x_5), (x_8), (x_9, x_{10})\}$$

$$U/I_{nd}(A_2 - \{a_6\}) = \{(x_1), (x_2), (x_3, x_4), (x_5), (x_6, x_7), (x_8), (x_9, x_{10})\}$$

##### (3) 定权模型及其改进

给定信息系统  $S = (U, A, V, F)$ ,  $P \in A$ ,  $U/I_{nd}(P) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 则知识  $P$  的信息量定义为<sup>[13]</sup>

$$I(P) = \sum_{i=1}^n \frac{|X_i|}{|U|} \left(1 - \frac{|X_i|}{|U|}\right) = 1 - \frac{1}{|U|^2} \sum_{i=1}^n |X_i|^2 \quad (1)$$

其中,  $|X|$  表示集合  $X$  的基数,  $|X_i|/|U|$  表示等价类  $X_i$  在  $U$  中的概率.

给定信息系统  $S = (U, A, V, F)$ , 属性  $a \in A$  在  $A$  中的重要性定义为

$$S_{igA-(a)}(a) = I(A) - I(A - \{a\}) \quad (2)$$

当  $A = \{a\}$  时, 用  $S_{ig}(a)$  表示  $S_{ig\varphi}(a)$

$$S_{ig}(a) = S_{ig\varphi}(a) = I(A) - I(\{a\}) \quad (3)$$

其中,  $U/I_{nd}(\varphi) = \{U\}$ ,  $I(\varphi) = 0$ .

然而在本案例的计算过程中, 当  $A = \{a\}$ , 若依然按照式(3)计算, 则会将该子因素的信息量与母因素信息量比较从而得出其属性重要性; 然而当因素数量较少时, 根据此式计算则会夸大该因素的重要性. 因此笔者认为在本模型中应做出相应改进以适合库岸公路安全风险因素定权的研究. 当  $A = \{a\}$  时, 其数学涵义实际为: 通过粗糙度分析, 该影响因素对实际结果的影响基本为 0, 则此时可考虑从风险因素中剔除此项, 并根据新的因素集重新计算各因素的信息量.

由以上等价类集合, 利用式(1)、式(2)可分别求出  $A_1$ 、 $(A_1 - \{a_{11}\})$ 、 $(A_1 - \{a_{12}\})$ 、 $(A_1 - \{a_{13}\})$ 、 $(A_1$

— $\{a_{14}\}$ )等知识的信息量,属性  $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}$  的重要性,以及各属性对应指标的影响性. 根据大量统计资料研究,库岸内部因素影响权值与环境外部影响

因素权值分别为 0.6 和 0.4<sup>[6,9-11,14]</sup>,根据渝巴公路实际情况进行的粗糙集单因素重要性分析计算得出的结果可得因素权重综合计算体系,见表 2.

表 2 岩、土质库岸各评价因素权重  
Tab.2 The weight of all the factors

影响因素	权值	因素集	因素影响性(岩)	综合权重(岩) $K_1$	因素集	因素影响性(土)	综合权重(土) $K_2$
内部因素	0.6	结构特征	0.410	0.246	结构特征	0.39	0.234
		坡型因素	0.590	0.354	坡型因素	0.61	0.366
		库水因素	0.250	0.100	库水因素	0.42	0.168
外部因素	0.4	降雨因素	0.375	0.150	降雨因素	0.28	0.112
		地震因素	0.250	0.100	地震因素	0.14	0.056
		人类活动因素	0.125	0.050	人类活动因素	0.16	0.064

#### 4 渝巴公路云阳境内白南段库岸路基安全风险综合评价

模糊综合评价是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与评价事物相关的各因素,对其所做的综合评价. 在对研究区调查研究的基础上,根据评价指标体系,从中选出评价因素,建立评价因素集  $U = \{\text{库岸岩土体结构特征, 岸坡坡型特征, 库水影响, 降雨影响, 不利的人类活动影响, 地质活动影响}\}$ ; 综合评判集确定为岸坡路基安全评价等级集  $V = \{\text{安全风险低, 安全风险较低, 安全风险较高, 安全风险高}\}$ . 根据岩、土体类型, 按其评价集特征  $U$  中各因素

特征对库岸路基安全风险的影响分别隶属于不同评价等级的隶属度来确定综合评判集矩阵.

以  $K46+250 \sim K46+670$  段为例: 该路段为岩质岸坡, 其岸坡结构特性为坚硬厚层状砂岩, 其岸坡结构特性为坚硬厚层状砂岩, 坡度为  $40 \sim 45^\circ$ , 其岸坡人类活动评价为弱. 综合以上六类评价集对因素集的隶属度判定, 可得评判矩阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.26 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.34 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

该段为岩质库岸, 综合权重取  $K_1$ , 计算如下

$$R \times K_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.26 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.34 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.246 \\ 0.354 \\ 0.100 \\ 0.150 \\ 0.100 \\ 0.050 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3142 \\ 0.23624 \\ 0.24956 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

因此根据模糊综合评价最大隶属度原则  $K46+250 \sim K46+670$  段路基安全风险评价为: 安全风险低路段. 据此, 可应用模糊综合评价法对整个渝巴路

云阳境内白南段各路段路基进行安全风险评价, 评价结果见表 3.

表 3 渝巴路白南段库岸路基安全风险评价结果表  
Tab.3 The risk evaluation results of bank roadbed security

公路里程	K39+960~ K40+770	K41+630~ K42+100	K45+770~ K46+075	K46+670~ K46+930	K46+930~ K47+400	K47+950~ K48+700	K48+700~ K48+960	K48+960~ K49+300	K49+300~ K49+930	K49+930~ K50+060
土质岸坡 结果	安全风险 较低	安全风险 较高	安全风险 高	安全风险 低	安全风险 低	安全风险 高	安全风险 较低	安全风险 较高	安全风险 较低	安全风险 较低
公路里程	K40+770~ K40+980	K40+980~ K41+280	K41+280~ K41+630	K45+100~ K45+550	K46+075~ K46+250	K46+250~ K46+670	K47+400~ K47+760	K50+060~ K50+330	K50+330~ K50+990	K50+990~ K53+330
岩质岸坡 结果	安全风险 较高	安全风险 低	安全风险 较低	安全风险 较低	安全风险 较低	安全风险 低	安全风险 低	安全风险 较低	安全风险 较低	安全风险 低

## 5 结语

根据渝巴公路实际情况的分析数据结合粗糙集因素重要性数学计算,可以得知:渝巴公路云阳境内白南段岩质库岸和土质库岸的内部因素重要性比例大致均为:结构特征比坡型因素为4:6;而对岩质岸坡影响较大的外部因素为降雨因素,对土质岸坡影响较大的因素为库水因素。

通过对渝巴公路白南段进行库岸路基安全风险综合评价得出各段库岸公路的安全性。本文为库岸公路路基安全风险研究中各因素权重的确定提供了可针对特定路段的具体情况得出适合于本路段的各风险因素重要程度的可行的方法;为渝巴公路白南段库岸公路路基安全风险管理中进一步进行危险路段重点微观评价及其风险防范措施研究提供了有力支持;对保证库岸公路安全运营具有一定的现实意义;而且对今后库岸公路设计施工也具有参考价值;对建立和完善库岸公路风险管理体系,也具有一定的理论意义。

本文无时间轴坐标,没有考虑不同季节库岸公路路基安全风险因素的不同影响性,而动态的风险评价更加客观真实;此外,也没有考虑植被因素对库岸路基安全风险的影响,而对植被因素的研究可能是一项很好的问题分析解决途径和方法。仅进行了库岸公路路基安全风险第一阶段风险分析的研究,即风险因素识别与分析、单因素风险估计和风险综合评价,而未涉及风险管理第二阶段风险防范策略与经济评价的研究,因此,对于如何消除关键因素的危害、危险路段重点微观评价及其风险防范措施的选择有待于进一步分析研究。

## 参考文献:

- [1] 杨俊明,张经济,常占怀,等.中国公路的灾害类型的分析与研究[J].重庆大学学报:社会科学版,2005,11(3):17.  
YANG Junming, ZHANG Jingji, CHANG Zhanhuai, et al. Analysis and research on road disaster type of China[J]. Journal of Chongqing University: Social Sciences Edition, 2005, 11(3): 17.
- [2] 巩微,冯东辉. Rough 集理论及其应用发展[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2007,34(1):78.  
GONG Wei, FENG Donghui. Discussion on rough set theory and its application[J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2007, 34(1): 78.
- [3] 蒙清. 基于粗糙集的模糊综合评判[J]. 红河学院学报, 2006(4):32.  
MENG Qing. A method of assessment on environment quality based on rough set theory[J]. Journal of Honghe University, 2006(4):32.
- [4] 熊萍,程华斌,吴晓平. 基于粗糙集理论的一种综合定权法[J]. 海军工程大学学报,2003(2):53.  
XIONG Ping, CHENG Huabin, WU Xiaoping. A synthetic weighting method based on rough sets[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2003(2):53.
- [5] 钟波,肖智. 一种基于粗糙集理论的组合预测方法[J]. 统计研究,2002(11):37.  
ZHONG Bo, XIAO Zhi. A compound projection method based on coarse aggregate theory [J]. Statistical Research, 2002(11):37.
- [6] 冯文凯. 库岸公路边坡稳定性风险分析[D]. 成都:成都理工大学. 2005.  
FENG Wenkai. Risk analysis of stability of highway bank slopes [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [7] Malonw A W, 黄润秋. 香港的边坡安全管理与滑坡风险防范[J]. 山地学报,2000, 18(2):187.  
Malonw A W, HUANG Ruiqiu. Slope safety and landslides risk management[J]. Journal of Mountain Research, 2000, 18(2): 187.
- [8] 汪小平. 库岸区岩质边坡稳定性分析研究[J]. 铁道勘察,2007(6):5.  
WANG Xiaoping. Analysis on stability of rock slope at reservoir bank area [J]. Railway Investigation and Surveying, 2007(6):5.
- [9] 长江水利委员会. 三峡工程地质研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.  
Changjiang Water Resources Commission. Geological study of the Three Gorges Project [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997.
- [10] 陆封云. 库区公路边坡稳定性分析[D]. 西安:长安大学. 2006.  
GUI Fengyun. The highway slope stability analysis of reservoir area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [11] 地质矿产部编写组. 长江三峡工程库岸稳定性研究[M]. 北京:地质出版社,1988.  
Group of the Department of Geology and Mineral Resources. Stability of the Three Gorges Project Reservoir [M]. Beijing: Geological Press, 1988.
- [12] 冯文凯,石豫川,王学武,等. 库区公路岸坡稳定性风险评价基本理论体系[J]. 山地学报,2005(23):702.  
FENG Wenkai, SHI Yuchuan, WANG Xuewu, et al. Study on the basic theory system about the risk assessment of highway bank slope stability in reservoir area [J]. Journal of Mountain Research, 2005(23):702.
- [13] 张文修. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001.  
ZHANG Wenxiu. Rough set theory and methods [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [14] 冯长安,张建斌,杨五喜. 模糊评判在库岸边坡稳定性分析中的应用[J]. 西北水电, 2007(3):14.  
FENG Changan, ZHANG Jianbin, YANG Wuxi. Application of fuzzy evaluation in the analysis of reservoir slope stability [J]. Northwest Hydropower, 2007(3):14.