

# 三峡库区水沙运动及环境灾害变化特点初步分析

尹小玲<sup>1</sup>, 刘青泉<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640; 2. 中国科学院力学研究所环境力学实验室, 北京 100080)

**摘要:** 三峡水库自 2003 年蓄水以来, 积累了大量实际观测资料, 为研究库区水沙运动特性及环境问题提供了有利条件。本文基于水库实际运用情况, 对水库蓄水后的洪水波传播、悬移质泥沙运动、库区富营养化以及库岸滑坡灾害等的主要变化进行了初步分析, 表明三峡水库蓄水运用后, 这些方面发生了较大的改变, 并呈现出新的特点, 对三峡工程的长期运行有一定影响, 其中反映的重要问题值得深入研究, 并在今后的工程运用中应给予足够的重视。同时分析结果也为今后这些问题的研究提出了一些探讨性的方向和途径。

**关键词:** 水环境; 三峡库区; 洪水传播; 泥沙输移; 富营养化; 库岸滑坡

中图分类号: X143

文献标识码: A

## Preliminary analysis on characteristics of water and sediment movement and environmental disasters changes in the Three Gorges reservoir area

YIN Xiaoling<sup>1</sup>, LIU Qingquan<sup>2</sup>

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** Since Three Gorges reservoir impounded water in 2003, extensive field observation data has been obtained, which provide favorable conditions to study the water and sediment movement and the environment in the reservoir area. Based on the actual operation of the reservoir, the main changes of flood propagation, suspended sediment movement, eutrophication in the reservoir water as well as disasters such as landslides along the bank after water storage are analysed preliminarily in this paper. It is showed herein that there are much differences between before and after impounding. The new features in these processes are likely to cause impacts on long-term running of the Three Gorges project. The issues which are discussed are considered to be important and worthy of further research and need to be paid more attention in the future operation of the project. The results of the analysis in the paper indicate some exploratory directions or ways for future study.

**Key words:** water environment; Three Gorges reservoir area; flood propagation; sediment transport; eutrophication; reservoir landslide

## 0 引言

三峡工程是治理、开发长江的主体工程, 有着巨大的社会和经济效益, 但也不可避免地自然河流和环境产生深远的影响。三峡工程建成后在很大程度上改变了河流过去的自然状态, 引起河道水流与环境系统的结构、功能变化, 涉及到多方面问题。就库区而言, 水深显著增加, 流速明显减缓, 水位变幅很大, 都会对库区的水流泥沙运动、水体环境乃至边坡安全产生很大影响。这些问题过去在三峡工程论证中已作了广泛讨论, 基本满足了工程建设可行性论证的宏观要求<sup>[1]</sup>。

三峡水库的运行有两个最基本的特点, 一是上游水位显著抬高, 水深明显增大(水库平均水深约 70m, 坝前最

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772204)

作者简介: 尹小玲(1967—), 女, 讲师. E-mail: arxlyin@scut.edu.cn

大水深 170m 左右);二是水库采取“蓄清排浑”的季节性调节运用方式,水位年内变幅很大(年内变幅达 30m)。库水位的显著抬高,打破了水流、泥沙及河床之间长期形成的相互适应的动态平衡关系,也带来水沙运动的新问题;库区水位年内调节为 175m - 155m - 145m 方案(即汛后正常蓄水位 175m,汛前削落水位 155m,汛期限制水位 145m),使得库区岸坡渗流场反复变化,将可能对库区岸坡稳定产生不利影响,当然这种大幅度的水位变化,也为库区水流交换和保持良好水质提供了可充分利用的水动力条件。随着工程的建成运行,尤其是水库蓄水以来,已积累了许多实际观测资料,为进一步细致地分析和认识库区水沙运动、环境变化以及潜在灾害的新特点提供了有利条件,及时深入研究和探讨三峡水库运行带来的新问题和变化十分必要,具有重要的科学意义和应用价值。

因此,本文旨在对三峡工程运行后引起的库区水沙运动和环境灾害变化的主要方面进行简要分析和概括,并对今后工作中需要重点深入研究的关键问题作进一步的讨论,从而说明对于三峡水库这样一个特大型综合水利枢纽工程,细致地评价其对长库区水沙运动及环境灾害的影响,仍需要加强对一些重要问题和过程的深入研究和预测。

## 1 库区水沙运动新特点

三峡水库为多峡口的河道型水库,河段自然水位落差达 130m,平均比降超过 0.00015。建库蓄水后,库区水面平均宽度约 1 100m,比天然情况仅增加一倍左右;而库区平均水深约 70m,坝前最大水深 170m 左右,比建库前水深显著增大。窄深的过流断面使库区仍然保持狭长的山区条带河道形状,这种大水深河道将会对库区的水流和泥沙运动产生很大的影响。

三峡库区从上游寸滩站至坝下黄陵庙站河段长约 620km,根据水文观测资料,建库前天然情况下洪水传播时间约为 3 天,悬沙输移时间与洪水传播基本同步。对中国水利水电科学研究院提供的实测数据的分析显示,水库建成蓄水运行后,库区的洪水波传播和悬移质泥沙输移过程均发生了变化,图 1 和图 2 分别为水库蓄水后 2007 年实际寸滩站与黄陵庙站逐日流量过程和悬移质含沙量过程的比较。可以看出,其中黄陵庙站的洪峰流量时间比寸滩站滞后平均不到 1 天,即两站间的洪水传播时间比天然情况缩短了 2 天左右。而比较两站的含沙量变化过程,总体上,黄陵庙站的含沙量变化更为平缓,一般峰值时间较寸滩站滞后 4 天左右,比天然情况有所增加。也就是说,蓄水后两站间的悬沙输移时间和洪水传播时间已明显不同,前者比后者增加大约 3 天,与天然情况有较大差别。至于 7 月 28 日较为一致的沙峰过程很可能为水库排浑运用导致的库区冲刷所致。

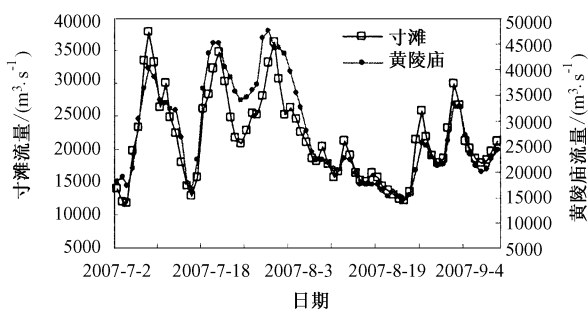


图 1 寸滩与黄陵庙洪水过程对比

Fig. 1 Comparison of flood hydrograph between Cuntan and Huanglingmiao

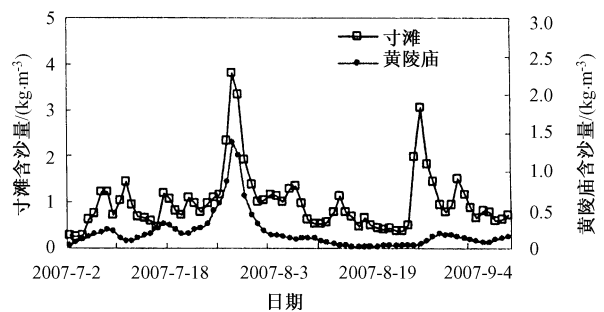


图 2 寸滩与黄陵庙悬移质含沙量过程对比

Fig. 2 Comparison of suspended load concentration graph between Cuntan and Huanglingmiao

可见,三峡水库蓄水运行后,由于库水位抬高,水深显著增大,洪水以重力波形式传播作用明显,加速了库区洪水的传播速度。相反,悬移质泥沙的传播速度因流速减小反而减缓,即使在大流量时,悬移质泥沙的运移也较洪水波传播滞后 3 天左右,加剧了水沙两相的传播滞后效应。这一特点在今后的研究中应给予足够的重视,以期更好地分析和预测库区的水沙运动过程。

## 2 库区泥沙的絮凝现象

三峡水库的细颗粒泥沙所占比例较大,约占悬移质泥沙的 1/3 以上,因此,细颗粒泥沙入库后的运动状态对水库的泥沙输移和淤积量影响很大。就一般情况而言,细颗粒泥沙由于粒径小,沉降速度小,水流对其输运能力很强,大多数细颗粒泥沙都能够排出水库。然而,自三峡水库蓄水运行以来,实测资料表明,三峡水库的细颗粒泥

沙淤积严重。表 1 是 2006 和 2007 年观测的三峡库区细颗粒泥沙在库区的淤积比,结果显示 3 组细颗粒泥沙在库区的淤积比都较大,并表现出几个特点,一是非汛期淤积比很大,均超过 90%,且不同粒径组差别很小;二是汛期小水年(2006 年)淤积比较大,其中粒径较小的两组泥沙的淤积比差别很小。

表 1 三峡库区细颗粒泥沙淤积比/(%)  
Table 1 Ratio of fine particles sedimentation in the Three Gorges reservoir (unit: %)

| 年份    |          | 2006 年  |               |               | 2007 年  |               |               |
|-------|----------|---------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|
| 粒径/mm |          | < 0.004 | 0.004 ~ 0.008 | 0.008 ~ 0.016 | < 0.004 | 0.004 ~ 0.008 | 0.008 ~ 0.016 |
| 时段    | 汛期(6~9月) | 87      | 84            | 94            | 60      | 71            | 81            |
|       | 非汛期      | 95      | 95            | 97            | 91      | 95            | 97            |

显然,三峡库区细颗粒泥沙的这种大比例、小差别淤积不符合一般的水流输沙规律。就水流输沙的一般规律而言,越细的颗粒沉降越慢,淤积比越小,在一定程度上淤积比可体现水流对粒径的分选作用。表中所列 3 组泥沙的颗粒沉速相差超过了 10 倍,而表中反映出来的 3 组泥沙的淤积比在非汛期基本没有差别,甚至在小水年汛期,最细组泥沙的淤积比还略大于次细组。如取非汛期库区平均流速 0.1m/s,平均水深 70m,库区长 600km,按照泥沙输移理论估算,即使第 3 组较粗颗粒泥沙其淤积比也不超过 30%,而实际观测淤积比却超过 90%,相差很大。这一事实说明存在其他因素影响三峡库区细颗粒泥沙的输移过程,在可能的影响因素中,絮凝应是主要的。

一般来讲,造成泥沙絮凝的因素主要有粒径、水体盐度、含沙量和流速等。实验室研究结果表明<sup>[2]</sup>,在流速小于或等于 30cm/s 时,泥沙絮凝随流速的减小逐渐增强,流速大于 40cm/s 时,基本不发生絮凝沉降。三峡水库正常蓄水运行时,库区水流速度很小,小流量时泥沙从入库至出库有 10 多天时间。而且,研究显示三峡水库水体中存在重金属等阳离子和有机物<sup>[3]</sup>,因此,库区细颗粒泥沙很可能发生絮凝。当然,三峡库区的泥沙絮凝不会象河口盐度引起的快速絮凝,应属于一种缓慢的絮凝现象。过去针对三峡库区这种可能出现的缓慢絮凝现象还没有专门研究,缺乏足够的基本认识和深入探讨。随着三峡水库的长期运用以及沿岸工农业经济的发展,各种污染物不断排放入库,这将是今后三峡库区泥沙问题研究的重要课题之一,将直接关系到对三峡库区泥沙淤积的合理预测。

### 3 库区部分水域富营养化

三峡水库蓄水后,尤其在枯季高水位蓄水,水流流速明显减小。表 2 列出了不同流量及不同蓄水位时三峡库区的流速分布情况<sup>[4]</sup>,可以看出,在水库蓄水到 175m 时,库区水流已明显减缓。特别是库区的一些支流,由于入库水位的壅高,导致支流入口附近形成流速很小的滞留库湾。这些水流特性一方面导致吸附污染物的细颗粒泥沙大量沉积,另一方面使得水体中如毒性阳离子、氮、磷等污染质的迁移速度降低,水体稀释自净能力下降,尤其在一些入库支流库湾,形成污染物逐步聚集、积累的态势,甚至重度富营养化,并在营养物质充裕、光度合适等条件下,可能暴发藻类水华<sup>[5]</sup>。

表 2 不同流量及不同蓄水位时库区沿程各站流速/(m s<sup>-1</sup>)  
Table 2 Flow velocity distribution under different flow rate and impounded level (unit: (m s<sup>-1</sup>))

| 站名  | 距坝址/km | $Q = 5\ 683\text{m}^3/\text{s}$ | $Q = 11\ 890\text{m}^3/\text{s}$ | $Q = 25\ 640\text{m}^3/\text{s}$ | $Q = 52\ 150\text{m}^3/\text{s}$ |
|-----|--------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|     |        | 坝前水位 175m                       | 坝前水位 145m                        | 坝前水位 145m                        | 坝前水位 145m                        |
| 寸滩  | 595.47 | 1.26                            | 2.10                             | 2.46                             | 2.71                             |
| 长寿  | 529.08 | 0.62                            | 1.83                             | 2.24                             | 2.27                             |
| 涪陵  | 482.77 | 0.49                            | 1.50                             | 1.91                             | 2.38                             |
| 丰都  | 432.34 | 0.38                            | 1.27                             | 1.58                             | 2.02                             |
| 忠县  | 370.07 | 0.44                            | 1.03                             | 1.64                             | 2.30                             |
| 万县  | 288.00 | 0.45                            | 0.84                             | 1.51                             | 2.40                             |
| 奉节  | 161.99 | 0.24                            | 0.37                             | 0.71                             | 1.20                             |
| 巴东  | 66.63  | 0.27                            | 0.41                             | 0.91                             | 1.37                             |
| 三斗坪 | 0.00   | 0.13                            | 0.15                             | 0.32                             | 0.57                             |

实际观测表明,三峡水库自 2003 年蓄水以来,大部分入库支流的库湾已经出现富营养化,有些甚至重富营养

化,并在春季暴发了数次藻类水华现象<sup>[6]</sup>。2009年三峡水库即将以175m方案运行,对库区支流入口的水位壅高作用将更加突出,滞留库湾范围不可避免地将进一步扩大。同时,正如前文中的分析,库区细颗粒泥沙在水库底部大量淤积,随着水库的长期运行,积累在底泥中的有机污染物会不断释放;另一方面,沿岸地区的经济快速发展和城市化进程的加快,必然导致污染物排放量迅速增加。因此,尽管有研究显示,近期三峡水库的整体水质并没有明显恶化,甚至泥沙的吸附作用有助于改善库区水质,然而,长远地来看,如不采取有效措施,库区水体污染将有不断累积增加的倾向,特别是一些滞留库湾和缓流区,水体出现富营养化甚至重富营养化乃至藻类水华暴发的概率和范围可能会不断增加和扩展,对长江上游水质安全构成严重威胁。因此,需要针对三峡库区水体富营养化及其控制和防治措施开展深入细致的研究。

学术界对于湖泊、河口以及海洋环境藻类水华现象进行了比较丰富的研究,从定性到定量的角度研究了藻类水华的形成与时空演化规律。然而,水库的水动力学条件不同于湖泊、河口与海洋环境,一个最显著的特点是库区水动力学条件(水深、流速等)在丰水和枯水季节交替变化显著,并且可以通过水库调度得到控制。另外,库区底泥的冲淤交替对营养物质的贡献也迥异于湖泊、河口与海洋环境。这一特征预示已有关于湖泊、河口以及海洋的研究成果难以简单地移植于水库水华问题。近年国内外对河流及水库水华的影响因素和基本特性等进行了一定的研究,但迄今为止,水库水华的复杂水动力学与生态学耦合作用机制远未清楚,还没有可靠的量化方法或模型预测其发生的临界条件、演化过程以及对未来环境变化的响应规律。事实上,从表2可以看出,水库运行通过调节水位和流量,可以大大改变库区的水流条件。三峡水库采用蓄清排浑的运行方案,对通过水库控制调节库区水流结构提供了十分有利的条件,而过去针对水库蓄水位变化、水库调度方式改变等对藻类水华形成与演化的调控作用尚无研究报道。因此,针对三峡水库,在细致研究相关优势藻类生长规律的同时,重点加强藻类水华的水动力学与生态学耦合机理和预报模型研究,揭示藻类水华形成的临界水动力学与生态学条件及其时间、空间演化规律,探讨通过水库运行调节控制水库藻类水华的有效途径将是今后需加关注和解决的重要科学问题。

#### 4 库区山体滑坡灾害

经普查,三峡库区共发现滑坡体1700多个,且64%为堆积层滑坡。堆积层滑坡体结构松散,孔隙大、透水性强,且下伏基岩面一般为隔水边界,其上聚集的降雨或渗流补给的大量地下水常常是导致边坡失稳的主要原因。三峡工程建成蓄水以后,水位抬升至175m高程,致使两岸许多堆积层边坡浸入水下,同时,三峡库区水位每年将在145~175m之间变动,不断改变边坡体内的水分运移。这些都将对库区边坡的稳定性产生重要影响,有可能诱发新的地质滑坡灾害。

水在滑坡中的作用主要表现在通过改变边坡体内渗流场和含水量分布,使土体容重和渗透压力增加,同时造成土体软化、潜蚀岩土和增加孔隙水压力等,进而降低土体抗剪强度,所以降雨渗流尤其是库水位的上升或下降容易诱发库岸滑坡的发生。Jones等调查了Roosevelt湖附近地区1941-1953年发生的一些滑坡,结果发现,有49%发生在1941-1942年的蓄水初期,30%发生在水位骤降10~20m的情况下;在日本,大约60%的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余40%发生在水位上升时期<sup>[7]</sup>。在水对滑坡稳定性影响的各种因素中,土体软化导致抗剪强度( $c, \phi$ 值)减小和大范围孔隙压力增大是最主要的,它显著地导致边坡安全系数下降<sup>[8]</sup>。三峡水库蓄水后,部分岸坡浸没水下并受水流作用,同时两岸边坡地下水位明显抬高,土体含水量增大,引起土体强度( $c, \phi$ 值)降低,特别是三峡水库调控运行的水位季节变幅很大,在水位涨落变化过程中,渗流场的急剧变化容易引起边坡内孔隙压力的显著变化。所以,三峡水库的蓄水调控运行对库区滑坡的触发作用十分突出。

采用饱和-非饱和二维渗流计算与极限平衡法稳定性分析计算建立边坡渗流与稳定性耦合分析数学模型,对三峡库区一些典型滑坡在库水位变化时的稳定性做初步研究,其中图3、图4分别是三峡水库在蓄水阶段水位缓慢升高,以及水库175m-155m-145m方案运行时,重庆万州区长江岸边花园滑坡体安全系数的模拟结果<sup>[9]</sup>,显示在库水位缓慢增长情况下,滑坡体的安全系数先迅速减小,在160m处达到一个最小值后又缓慢增加;而在水库运行水位涨落变化较快过程中,滑坡体稳定性变化复杂,安全系数随水位升降而起伏。可见,三峡水库蓄水和运行使库区滑坡体的稳定性发生改变,主要是降低了边坡的稳定性,并与水位升降速度有关,有可能诱发滑坡体失稳而产生严重地质灾害。其他一些研究分析也表明,库水位的变化速度尤其是下降速度对滑坡体稳定性影响很大,水位下降越快,越容易导致滑坡体失稳,同时,在库水位下降过程中存在一个最危险水位,在该水位坡体稳定性最差,其位置一般处于坡体的下1/3处<sup>[10]</sup>。

尽管人们越来越认识到水渗流在滑坡体稳定性中的重要作用,也进行了不少相关研究,但总的来讲,由于山

体介质复杂,水体来源不同,对地质体渗流场的描述并不成熟,尤其是水渗流与滑坡体稳定性耦合分析研究还比较缺乏,深入探讨不同形式水渗流诱导滑坡,特别是库水位涨落作用下的滑坡失稳机理是当前滑坡灾害研究中的一个重要课题。三峡水库的建成运行为这方面的基础研究提供了有利条件,同时,有针对性地探讨三峡库区由于水库运行可能诱导的滑坡地质灾害以及防治措施,对水库安全长期运行和库区减灾防灾十分重要,也是今后值得深入研究的科学问题及实际问题。

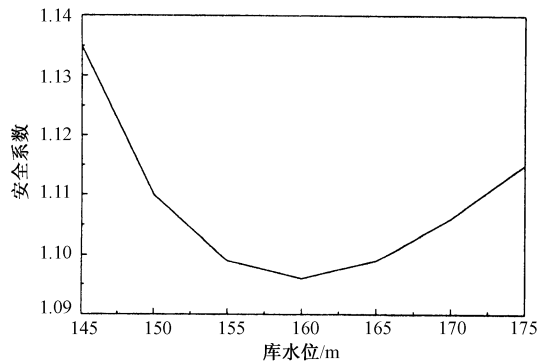


图3 库水位缓慢升高时滑坡体安全系数变化情况

Fig. 3 Variation of sliding mass safety coefficient in time of slow reservoir level-up

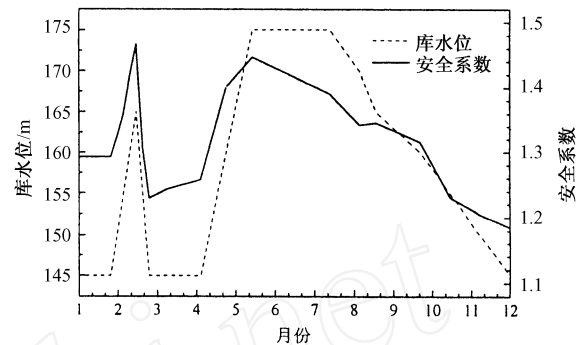


图4 水库运行条件下滑坡体安全系数变化情况

Fig. 4 Variation of sliding mass safety coefficient in annual operation of the reservoir

## 5 结论

三峡水库建成运行后,蓄水位高,水位涨落变幅大,导致库区水沙运动特性发生改变,同时,库区水质环境和岸坡地质也受到一定影响,本文通过初步分析得到如下结论:

1. 库区水深明显增大,洪水波以深水重力波形式运动,加快了洪水波的传播速度,但水流流速的减小相反地延缓了库区悬移质泥沙的运移,在防洪及库区泥沙运动研究中值得引起注意。
2. 库区细颗粒泥沙有可能产生絮凝现象,使得细颗粒悬移质的运动特点不同于天然情况,预测库区泥沙输移和淤积时需要加以考虑。
3. 正常蓄水情况下,库区水流流速显著减小,同时,由于库区污染物不断积累和排放增多,在一些支流入口处流速十分缓慢的滞留区容易形成水体富营养化,甚至出现水华灾害,应对此进行深入研究,尤其有必要探讨利用水库运行措施减轻和防止水华的发生。
4. 三峡水库高水位蓄水引起库岸地下水位升高,将导致库区地质滑坡灾害有增加趋势。同时,由于水库运行中水位变幅大、变化快,容易造成边坡渗流场和孔隙压力场的急剧改变,十分不利于边坡稳定。加强对库区边坡渗流场与边坡稳定性的耦合分析,为库区地质滑坡灾害防治提供科学依据,具有十分重要的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 潘家铮. 三峡工程重新论证的主要结论[J]. 水力发电, 1991, (5): 6~16.  
PAN Jiazhen. The main conclusions of verification of Three Gorges Project[J]. Water Power, 1991, (5): 6~16. (in Chinese)
- [2] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 51~57.  
JIANG Guojun, YAO Yanming, TANG Ziwen. The analysis for influencing factors of fine sediment flocculation in Changjiang estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 51~57. (in Chinese)
- [3] 唐将. 三峡库区镉等重金属元素迁移富集及转化规律[D]. 成都: 成都理工大学博士学位论文, 2005: 47.  
TANG Jiang. Study on the regularity of move, enrichment, and translation of cadmium and other heavy metals in the district of Three Gorges reservoir[D]. Chengdu: Doctoral Degree Thesis of Chengdu University of Technology, 2005: 47. (in Chinese)
- [4] 三峡工程论证泥沙专家工作组. 长江三峡工程泥沙研究文集[M]. 北京: 科技出版社, 1990: 56~72.  
Working group of experts for sediment study in scientific verification of Three Gorges Project. Sediment Study Collection of Three Gorges project on Yangtze River[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1990: 56~72. (in Chinese)
- [5] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 7~12.  
ZHANG Sheng, LI Chongming, FU Yongchuan, et al. Trophic states and nutrient output of tributaries bay in Three Gorges reservoir after impoundment[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 7~12. (in Chinese)

- [ 6 ] Ye L , et al . , Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of Three Gorges reservoir[J] . Environmental Monitoring and Assessment , 2007 , 127(1 - 3) : 135 ~ 145 .
- [ 7 ] 中村浩之.论水库滑坡[J].水土保持通报.1990,10(1):53~64.  
Nakamura H , On the reservoir landslide[J] . Bulletin of Soil and Water Conservation , 1990 , 10(1) :53 ~ 64 . (in Chinese)
- [ 8 ] 孙建平,刘青泉,李家春,安翼.降雨入渗对深层滑坡稳定性影响研究[J].中国科学 G辑,2008,38(8):945~954.  
SUN Jianping , LIU Qingquan , LI Jiachun , et al . Influences of rainfall infiltration on the stability of deep-seated landslide[J] . Science in China(Series G) , 2008 , 38(8) : 945 ~ 954 . (in Chinese)
- [ 9 ] 孙建平.降雨入渗及库水涨落对边坡稳定性影响的研究[D].北京:中科院力学所博士论文,2009:87.  
SUN Jianping , Influences of rainfall infiltration and fluctuation of reservoir water on the stability of deep-seated landslide [D] . Beijing : Doctoral Degree Thesis of Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , 2009:87 . (in Chinese)
- [10] 时卫民,郑颖人.库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J].水利学报:2004,(3):76~80.  
SHI Weimin , ZHENG Yinren . Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown[J] . Journal of Hydraulic Engineering , 2004 , (3) :76 ~ 80 . (in Chinese)

(上接第 81 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] 丁灼仪.三峡工程泄洪深孔体型及水力特性的试验研究[J].长江科学院院报,1991,12:73~79.  
DING Zhuoyi . Experiment studies on configurations and hydraulic characteristics of deep outlets for Three Gorges Project [J] . Journal of Yangtze river scientific research institute . 1991 ,12:73 ~ 79 . (in Chinese)
- [ 2 ] 廖仁强,吴效红,等.三峡工程深孔明流段体型选择[J].水力发电,1997,12:42~45.  
LIAO Renqiang , WU Xiaohong , et al . Scheme selection for deep outlets open channel of TGP[J] . Hydraulic Power , 1997 ,12:42 ~ 45 . (in Chinese)
- [ 3 ] 金峰,周赤,等.突扩跌坎型门座的水力问题研究[J].人民长江,2001,11:37~39.  
JIN Feng , ZHOU Chi , et al . Hydraulics study of sudden enlargement and vertical drop gate seat [J] . Yangtze River , 2001 ,11 :37 ~ 39 . (in Chinese)
- [ 4 ] 廖仁强.三峡大坝泄洪深孔长、短管方案比选[J].人民长江,1999,8:1~3.  
LIAO Renqiang . Scheme selection for bottom release outlets of TGP dam[J] . Yangtze River ,1999 ,8:1 ~ 3 . (in Chinese)
- [ 5 ] 周赤,韩继斌,等.三峡工程泄洪深孔跌坎掺气型模型试验研究[J].长江科学院院报,2000,10:5~8.  
ZHOU Chi , HAN Jibin , et al . Model study on aerator of Three Gorges Project 's deep outlets[J] . Journal of Yangtze river scientific research institute , 2000 ,10:5 ~ 8 . (in Chinese)
- [ 6 ] 周胜.长江三峡水利枢纽水力学问题研究[M].北京:中国水利水电出版社,2006:52~54.  
ZHOU Sheng . Hydraulics study of TGP[M] . Beijing :China Waterpower Press . 2006 :52 ~ 54 . (in Chinese)