

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.02.007

水电站漂浮物堆积形态模拟方法探讨

吴时强^{1 2}, 童中山¹, 周 辉¹, 吴修锋^{1 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要 :针对漂浮物运动特性与堆积形态模拟存在无法同时满足的问题,在分析漂浮物随水流运动特性的基础上,提出漂浮物模拟的相似条件。根据研究重点的不同,可以采用正态模型或小变率的变态模型来模拟漂浮物的堆积形态。从不同模拟材料的试验结果分析,原体漂浮物的运动与堆积采用木条作为模拟材料时,堆积形态更接近实际情况。

关键词 :水电站;漂浮物;堆积形态;模拟方法;相似理论

中图分类号 :TV131.3 ;O242.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)02-0024-05

Simulation methods for accumulation patterns floating debris in hydropower stations//WU Shi-qiang^{1 2}, TONG Zhong-shan¹, ZHOU Hui¹, WU Xiu-feng^{1 2} (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*)

Abstract :With regard to the situation of unable simultaneous satisfaction in the simulation of the movement characteristics and accumulation patterns of floating debris, the similarities for the simulation of the floating debris were proposed based on the analysis of the movement characteristics of floating debris with flows in a reservoir. According to various research objects, normal models or abnormal models with small variability could be employed to simulate the accumulation patterns of floating debris. The test results from different model materials show that if the wood is employed for the simulation of the movement and accumulation of the original floating debris, the accumulation pattern is much closer to the actual situation.

Key words :hydropower station; floating debris; accumulation pattern; simulation method; similarity theory

我国大多数河床式径流水电站进口拦污栅前都堆积着大量的漂浮物,这些漂浮物的存在增加了电站进口的水头损失,严重干扰机组的正常运行,影响其发电效率。特别是在水量丰沛的洪水期,机组因污物堵塞而不能满负荷工作,经济损失巨大。如沙溪口水电站因污物造成的年电能损耗就达 $2.4 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。此外,大量漂浮物囤积在电站进口,加大了拦污栅承受的荷载,对拦污栅的安全运行构成较大的威胁,同时也影响库区环境美观,造成库区水域水质恶化。因此水电站漂浮物综合治理是河床式径流电站所面临的一个难题。

目前水电站进水口处污物的处置方法主要有手工或机械清理、水电站调度运行、通过泄水建筑物排向下流、设置导漂系统(如拦污排)等,这些方法各有其适用范围和缺陷,无法十分有效地解决水电站漂浮物带来的问题^[1-2]。

库区漂浮物运动及其堆积形态往往会影响其处

置方式选择及其效果,因此通常利用水工模型试验来预测库区漂浮物的堆积形态,比选处置方式,评价漂浮物处置效果。但由于库区漂浮物种类复杂、形态各异、大小不一,其运动状况千差万别,漂浮物运动、堆积及其相互作用机理尚难以准确描述,要完整地模拟漂浮物堆积形态非常困难^[3]。因此在模拟库区漂浮物堆积形态时,只能抓住漂浮物的主要特征加以模拟。本文结合沙溪口水电站,探讨漂浮物的运动规律和堆积形态模拟方法,提出相应的模型相似准则。

1 水电站漂浮物运动特性分析

漂浮物运动与水库内水流运动特别是表层水流运动状态紧密相连。但由于漂浮物种类和形状各异,漂浮物运动与水流运动不可能完全一致,因此这里仅就代表性的漂浮物运动特征进行说明。观察表明,在河流及水库中漂浮物输送呈明显的带状分布,

漂浮物运动方向与水流的主流方向较为一致,大多数漂浮物沿水流主流方向运动。

主要的漂浮物随主流运动可从理论上加以解释。从明渠水流运动特性分布可知,受边界阻力影响,水流在平面上分布一般是中部流速大、两侧流速较小。图1为漂浮物随水流运动位置示意图。当漂浮物B面的水流速度大于A面的水流速度($u_B > u_A$)时,流速较小的漂浮物A面水流压力大于流速较大的B面水流压力,漂浮物在向前运动过程中,A、B2个面之间存在一个压力差,该压力差将漂浮物推向主流一边,即漂浮物随水流运动一段时间后,逐渐会随主流一起运动。

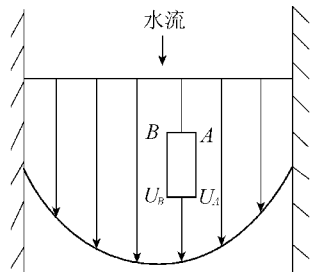


图1 漂浮物随水流运动示意图

由于漂浮物有随主流一起运动的趋势,所以在模型试验时,只要水流流态能够得到正确的模拟,基本上就可模拟漂浮物的运动特性。

单个漂浮物运动受到浮力、水流拖曳力、惯性力、阻力和撞击力的综合作用。根据牛顿运动基本定律,可列出基本方程:

垂直方向

$$F_{\text{上}} + G_{\text{重力}} = ma_{\text{上}} \quad (1)$$

水平方向

$$F_{\text{水}} = ma_{\text{水}} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{上}}$ 为漂浮物所受的浮力; $G_{\text{重力}}$ 为漂浮物所受重力; m 为漂浮物质量; $a_{\text{上}}$ 为漂浮物垂向加速度; $a_{\text{水}}$ 为漂浮物水平加速度。

在垂直方向,漂浮物仅受水流作用而上下波动;在水平方向,漂浮物运动较为复杂。图2为漂浮物运动受力分析示意图。如图2所示,漂浮物运动特性关键受漂浮物水平方向合力控制,漂浮物受到的水流力与水流速度及方向有关。在复杂的水库水流运动中,主流常发生随机变化,可导致漂浮物受力的改变,从而影响其运动轨迹的变化。

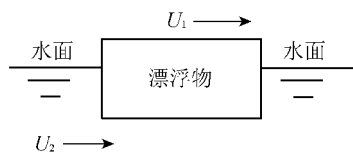


图2 漂浮物运动受力分析示意图

当漂浮物运动速度为零时,即漂浮物固定,此时水流以流速为 U_2 的速度从漂浮物周围绕过,漂浮物对水流产生阻力,假定漂浮物综合阻力系数为 C_d ,则漂浮物受到的水流力为

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A U_2^2 \quad (3)$$

式中: A 为漂浮物水下与水流方向垂直的面积; ρ 为水的密度。

当漂浮物运动速度为 U_1 时,漂浮物受到的水流力为

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A (U_2 - U_1)^2 \quad (4)$$

漂浮物受到的水流力与速度差($U_2 - U_1$)有关,如果水流速度大于漂浮物运动速度,即 $U_2 - U_1 > 0$,则水流对漂浮物产生推力,使得漂浮物运动速度增加;如果 $U_2 - U_1 < 0$,则产生方向相反的阻力,使得漂浮物运动速度降低;如果 $U_2 - U_1 = 0$,则漂浮物跟随水流一起运动。总体上,漂浮物运动速度应与水流的运动速度基本一致,也就是说漂浮物运动具有较好的水流跟随性^[2]。

2 漂浮物模拟相似性分析

有关漂浮污染物在库区运动特性及坝前堆积形态方面的研究成果至今尚不多见^[3-5],采用水工模型模拟漂浮物运动特性时,缺乏漂浮物运动模拟的相似准则^[6-7]。为此,这里定性分析漂浮物模型试验的相似律问题。

2.1 水流运动相似

库区内漂浮物随水流运动,水流是漂浮物运动的载体,因此模型设计首先要满足水流运动相似要求。对于按重力相似和阻力相似设计的正态水工模型,一般都能够满足水流运动相似要求。

2.2 漂浮物运动相似

漂浮物模拟通常是水流模拟的延伸,主要集中在2个过程:①漂浮物流动和堆积形态;②漂浮物堆积引起的结构荷载。

除了与水流相关的力以外,漂浮物运动和堆积还涉及单个漂浮物和堆积漂浮物的质量和作用于漂浮物上的水动力。对于宽阔水体,如湖泊、水库和大河流,应该考虑风作用在漂浮物和水面上的力。漂浮物堆积的承受力和变形特性对于堆积厚度是重要的,在一些情况下,单个漂浮物的承受力和变形特性也是重要的,因此要完全模拟漂浮物运动是难以达到的。从前面分析可见,漂浮物具有很好的水流跟随性,基于此来推导其相似准则。

库区漂浮物的种类繁多,漂浮物密度及漂浮程

度不尽相同,有的密度较小,几乎完全浮在水面,例如泡沫塑料制品等,有的半沉半浮,例如长期受水浸泡的木材,漂浮物的尺度相差也很大,形态各异,大小不一,运动形态也不相同,有的单独运动,如大一点的木材,有的一片一片地集聚而行,如杂草、水浮莲等。坝前漂浮物种类及数量的随机性较强,目前尚缺乏完整的原体观测统计资料。所以要真实地模拟漂浮物运动十分困难,只能选择一些比较典型的漂浮物加以模拟,其相似性主要考虑以下4个方面。

2.2.1 几何相似

模型中漂浮物运动与原体相似,要求模型中漂浮物的大小和形状满足几何相似。

2.2.2 漂浮度相似

漂浮度取决于重力与浮力,与流体的密度有关,只要保证原体与模型的密度相同,即模型与原体选用同样的材料,同时满足漂浮物几何相似,就能保证漂浮物的漂浮度相似。

浮力可通过一个密度 Fr_D 数来计及,定义 Fr_D 为漂浮物惯性力与浮力之比:

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{\rho - \rho_d}{\rho}\right)gL}} \quad (5)$$

式中: U 为漂浮物漂浮速度(对于表面漂浮物,可认为与水流速度相同); ρ_d 为漂浮物密度; g 为重力加速度; L 为漂浮物特征长度。

漂浮物运动的相似准则为

$$(Fr_D)_r = 1 = \frac{U_r}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)L_r}} \quad (6)$$

式中 $(Fr_D)_r$ 为 Fr 数比尺; U_r 为流速比尺; $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_r$ 为密度差比尺; $\Delta\rho = \rho - \rho_d$; L_r 为长度比尺。

2.2.3 漂送强度相似

设 ΔT 时间内漂浮物的总量为 ΔW ,漂送强度为 N 件/s,每件体积为 V ,密度为 ρ_s ,则 ΔT 时间内漂浮物的总量为

$$\Delta W = N\Delta TV\rho_s g \quad (7)$$

$$N_r = \frac{1}{t_r} = \sqrt{\frac{1}{L_r}} \quad (8)$$

式中: N_r 为漂送强度比尺; t_r 为时间比尺; L_r 为长度比尺。

式(8)表明,模型中单位时间投放的漂浮物件数应为原体件数的 $\sqrt{L_r}$ 倍。

2.2.4 水流拖曳力和表面张力等的模拟

为了模拟作用于单个漂浮物上的水流拖曳力、表面张力和惯性力,需要原型和模型有相同的拖曳力、表面张力和附加质量的水动力系数,而这些系数

的相似性在一个模型中不可能完全满足。但如果关注的是漂浮物整体流动特性及堆积形态,则没有必要要求所有系数都满足相似要求。例如,拖力的计算公式为

$$F_D = \frac{C_D \rho U^2 A}{2} \quad (9)$$

式中: C_D 为与 Re_D 、漂浮物的形状和粗糙度、流动紊动强度、相邻边界接近程度有关的拖力系数(Re_D 为与漂浮物周围水流相关的 Reynolds 数, $Re_D = \frac{(U - u_d)l}{\nu}$,其中 u_d 为漂浮物流动速度, l 为特征长度, ν 为动力黏性系数); A_U 为漂浮物在垂直于 U 方向上的投影面积。

水流举力(与拖力垂直方向的力)可导得类似的表达式。严格的相似准则为

$$(C_D)_r = 1 \quad (C_L)_r = 1 \quad (C_M)_r = 1 \quad (10)$$

式中: C_L 为举力系数; C_M 为增加质量系数。

用同一个模型比尺很难同时满足式(10),如果采用几何变态模型,要满足式(5)也是非常困难的。在大多数情况下,由于漂浮物尺度不一,形状不同,粗糙度变化大,这些困难可以得到缓解,因此 C_D 、 C_L 和 C_M 准确模拟也是不必要的。

在大尺度水域,风拖力是漂浮物流动和堆积的一个主要因素,它产生推动漂浮物的水流和波浪,直接拖动漂浮物。对风拖力和水流拖力给定同样的相似准则,就像模拟水流拖力一样,同样难以模拟风拖力。在模型中难以用气流来模拟风拖力,大多数风洞尺度太小,无法容纳常规的模型尺度,在模型中模拟恒定风速场也是十分困难的。

2.3 漂浮物堆积形态相似

漂浮物在随水流运动的过程中,其运动的动力来自于水流作用力,当水流流速较大时,一般认为漂浮物与水流运动基本一致,此时水流的推力是漂浮物运动的主要动力源。

漂浮物堆积形态可处理成单一整体或一个特殊的联结体,单个漂浮物与整个堆积体尺度相比很小。此时,作用于堆积体上的外力包括水流对堆积体的拖曳力,在堆积体形成过程之中,当堆积体之间内力小于外力时,堆积体就会失稳,出现组成堆积体的漂浮物之间相互挤压重叠,使得堆积体不断加厚,内力也不断增大,当内力增大到能抵抗外力时,堆积体的厚度不再增加,从而形成稳定的堆积体。漂浮物的相互挤压增加了堆积的厚度,也可使堆积形状发生变化。因此,堆积形状的模拟需要模拟堆积漂浮物的强度和变形特性参数,在许多情况下,只能近似估

算这些值。

单个漂浮物与堆积体相比尺寸很小,当堆积的漂浮物或多或少地作为连续体时,可以用摩擦内角 φ 来描述强度和变形,阻力内角描述了受压或剪切的漂浮物的连接和摩擦阻力,其相似准则是

$$\varphi_r = 1 \quad (11)$$

式(11)要求在进行漂浮物堆积形态试验时须选用同样的试验材料,并采用正态模型。

当漂浮物相对堆积体尺度较大时,单个漂浮物强度特性也必须考虑。对于线形漂浮物(如木头),弯曲强度是重要的。对于块状漂浮物(例如集聚的杂草),压缩强度是重要的,这些特性很难量化。

在一个大面积水域,模拟漂浮物堆积形态需要利用几何变态模型,垂向比尺变态应不会明显影响到漂浮物二维流动及水流流动特性。在给定的模型比尺条件下,漂浮物模拟需要进行概化处理,不能完全是原体漂浮物尺度和形状上的准确模拟,漂浮物允许垂向尺度的变形,但需要分析可接受的垂向变形限度。如果需要我们保证水流输运漂浮物三维特性,则要求正态模型或适度变率的变态模型。

堆积物力平衡分析^[3]描述了堆积厚度变形的效果,并显示假定一个强度指数,例如阻力内角,在原型和模型上近似一致,那么在适度变率的变态模型中可模拟等效的堆积厚度。从这一点看,漂浮物的堆积形态模拟是非常复杂的,与漂浮物的性质有关,在正态模型中堆积形态会有一定的失真。

2.4 模拟材料相似

库区漂浮物的种类繁多、形态各异、大小不一,其运动状况千差万别。模型试验中,按相似条件对各种漂浮物进行真实模拟非常困难。因此,在选择漂浮物模拟材料时,只能考虑其主要特性和影响因素。实际工程中,库区漂浮物大多由杂草、树枝、树叶、泡沫塑料等组成的,在模型中可以直接采用木材和泡沫塑料作为模拟材料,但要恰当选取单个试验材料的形状和大小,使其在水流中运动时具有良好的跟随性,并能避免表面张力的影响。

综合上述分析,可以知道漂浮物运动特性的模拟一般要求正态模型,而堆积形态的模拟需要适度变率的变态模型,但是由于漂浮物堆积受力条件极难准确模拟,因此漂浮物堆积形态模拟无法完全达到,目前漂浮物运动特性的模拟以及堆积形态的模拟采用正态模型较合适。

3 沙溪口水电站漂浮物运动模型设计

沙溪口水电站为河床径流式电站,以发电为主,电站装机容量为 4×75 MW,机组流量为 $1\,050 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

挡水建筑物采用混凝土重力坝形式,坝顶高程 93.0 m ,最大坝高 45.0 m ,坝顶长度 628.0 m ,溢流坝长 317.0 m ,河床中部共设有17个表孔溢流坝,表孔堰顶高程为 74.30 m ,弧形闸口控制流量,最大过流能力为 $26\,300.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

沙溪口水电站集水区水土保持及环境治理情况较差,每年汛期都有大量的漂浮物随流而下,汇集于坝前。发电过程中,这些漂浮物吸附在进水口拦污栅上,造成拦污栅严重堵塞,最严重时栅前、栅后水位差达 7 m ,大大超过 3 m 的安全水位差,不仅影响了机组的正常出力,还严重威胁着拦污栅及机组的安全运行,为此需建一个导漂装置来减少漂浮物堆积体。为了验证导漂装置拦截漂浮物的效果,需要进行物理模型试验。

根据沙溪口水电站库区水流及漂浮物实际情况,采用正态模型模拟,模型几何比尺 $L_r = 70$ 。漂浮物模拟材料采用密度与漂浮物相近的泡沫塑料和木条2种模型材料,比较不同模拟材料的运动特性及堆积形态的差异^[2]。

4 模型试验结果分析

为了检验漂浮物运动规律模拟的相似性,选择电站4台机满负荷发电、溢流坝不过流条件来分析漂浮物堆积形态。图3为模拟材料采用泡沫塑料时漂浮物在库区随水流运动及坝前堆积过程。从水流流场测量可知,由于只有发电水流,溢流坝前没有水流流动,主流在坝前 $1\,000 \text{ m}$ 处开始逐渐偏向右岸,左侧存在强度较低的大回流区。图3(a)、图3(b)显示漂浮物随主流一起运动,主流区漂浮物首先运动到大坝前沿;图3(c)显示漂浮物在坝前 100 m 处开始有明显的堆积,而后漂浮物越来越多,不断堆积;图3(i)显示由于模型中施放的漂浮物有限,流速较大的主流区域漂浮物已基本堆积到坝前,而流速较小的左侧区域漂浮物仍继续向前运动;图3(l)为最终堆积形态,此时漂浮物堆积在发电站进水口前 100 m 左右的水域,由于右侧存在一回流区,部分漂浮物随回流水一同运动。堆积过程显示漂浮物运动与水流运动相一致,这说明按重力相似准则设计模型模拟漂浮物运动规律是较为合理的。同时与原体漂浮物堆积形态相比(图4),可见模型与原体的堆积形态是相似的。但由于库区流态复杂,不同的模拟材料最终会产生不同的堆积形态,为此比较不同模拟材料对堆积形态的影响。

图5是模拟材料分别为泡沫塑料和木条时坝前最终的漂浮物堆积形态。表1为不同模拟材料堆积形态的试验结果。由表1可知,相同的试验工况下,

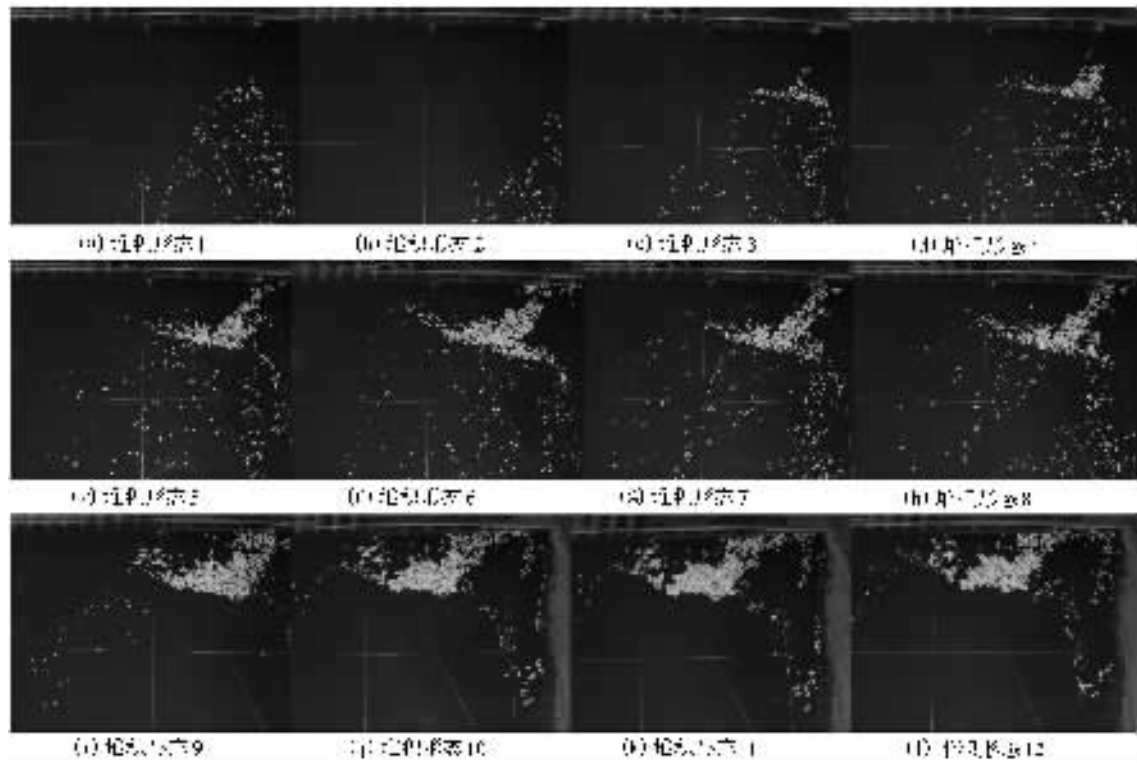


图3 库区漂浮物运动及堆积过程



图4 沙溪口水电站进水口前漂浮物堆积

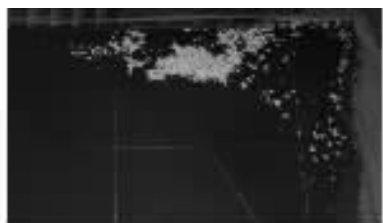


图5 漂浮物最终堆积形态



图5 漂浮物最终堆积形态

图5 漂浮物最终堆积形态

选择不同的模拟材料,漂浮物堆积形态有很大差异。由于木条密度在 0.8 t/m^3 左右,而泡沫塑料密度仅 0.05 t/m^3 ,木条的吃水深度远大于泡沫塑料的吃水深度。所以同样水流条件下,作用在木条上的水流

力远大于作用在泡沫塑料上的水流力,木条在水流作用下挤压重叠,通过内力的调整形成稳定的堆积形态,而泡沫塑料受到的水流力较小,不能有效地挤压密实,在水流条件稍有变化时,堆积形态随之发生变化。

表1 不同材料在相同试验工况时的堆积特性比较

试验材料	距坝前最远位置/m	形态描述	最终状态	抗干扰性
泡沫塑料	200	形态比较散乱,电站前沿约集中80%的漂浮物,右侧回流区有部分漂浮物	电站前方漂浮物几乎静止、右侧回流区内漂浮物与水流一同运动	加适当干扰,其形态会发生变化
木条	80	漂浮物完全集中	完全静止	形态稳定,抗干扰性强

模型试验观测表明,坝前的漂浮物一般都能运动到坝的前沿,当坝前的回流较弱时,漂浮物一般不能在回流区运动。泡沫塑料模拟的堆积体只要稍受水流作用即散漂离开大坝前沿,不能形成稳定的堆积体,主要原因是泡沫塑料密度较轻,水流跟随性较差,极易受表面张力的影响,而且泡沫塑料具有互斥性,不宜聚在一起。因此,与原体漂浮物的运动和堆积相比,采用木条作为模拟材料时,模型的漂浮物堆积形态更接近实际情况。

5 结 语

水电站漂浮物模拟技术尚未成熟,本文在分析论证漂浮物具有随水流运动特性的(下转第39页)

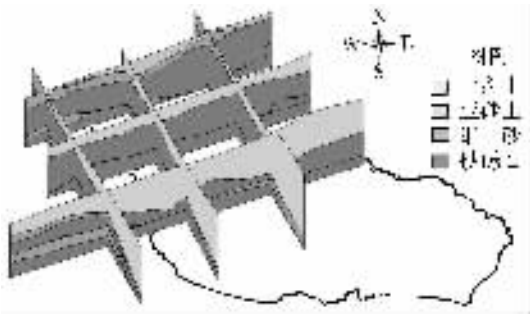


图5 GMS 三维地质实体模型切割剖面图

式中: V 为库容, m^3 ; μ_i 为第 i 个蓄水体的重力给水度; V_i^* 为第 i 个蓄水体的体积, m^3 ; n 为不同岩性的蓄水体个数。

总之,从含水层条件、地下水补给水源、地下水库调蓄空间、地下水开采条件等方面综合分析可知,建立地下水库从而进行水资源多年调节及开发利用是可行的。

3.4 情景模拟分析

根据含水层特征参数,以 2002~2006 年观测水位数据建立地下水数值模拟模型,利用 GWMS 软件进行参数识别、模型验证后,利用上述地表水与地下水联合开发的思路,设置不同的情景,模拟地表水与地下水联合利用的可行性及分析可能出现的问题。

以不同的开采规模为情景进行模拟分析,结果表明:以 $10 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的规模持续开发不会引起环境问题,开采稳定后形成约 6 km^2 的地下水位降落漏斗,漏斗中心水位埋深约 13 m ,若考虑为城市应急供水,分别以 $25 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、 $40 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、 $50 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 这 3 种开采规模模拟,其持续应急供水时间可分别达到 12 个月、6 个月及 4 个月。

4 结 语

a. 受气候、地形等因素综合影响,在北方小流域采用地表水与地下水联合开发的模式开发利用水资源具有较高的可行性。既能较充分地利用地表水资源,又能利用含水层的天然调蓄功能实现水资源的多年调节,对区域的稳定供水有较大的现实意义。

b. 地表水与地下水联合开发模式在沈阳市辽河支流长河-羊肠河流域内可行,可持续提供 $10 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的可供水量,在应急状态下可提供更为可观的供水量,能够保障当地城市的应急供水安全。

c. 北方小流域受污染情况较为严重,尤其是流域内地表水污染已经影响当地生态环境。人工湿地等水生态修复措施不仅对小流域生态环境改善具有重要意义,而且对地表水与地下水联合开发的水源水质提供保障。未来可加大利用生态修复对水质改善程度的实证研究。

参考文献:

- [1] 胡君春,郭纯青,徐海振.中国北方地区地下水库的若干问题的研究[J].水文,2009,29(1):69-72.
- [2] 盛海洋,孟秋立,朱殿华,等.我国地下水开发利用中的水环境问题及其对策[J].水土保持研究,2006,13(1):51-53.
- [3] 李砚阁.地下水库建设研究[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [4] 叶勇,迟宝明,施枫芝,等.物元可拓法在地下水环境质量评价中的应用[J].水土保持研究,2007,14(2):52-54.
- [5] 谢轶,苏小四,高淑琴.基于 GMS 支持下的大庆地下水库区水文地质结构可视化模型[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,31(1):51-54.
- [6] 李伟,束龙仓,李砚阁.济宁市地下水库特征参数分析[J].水科学进展,2007,18(2):282-285.
- [7] 戴长雷,迟宝明.饮马河中游地下水库可行性论证[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(1):78-84.
- [8] 束龙仓,李伟,李砚阁.地下水库库容不确定性分析[J].水文地质工程地质,2006,33(4):45-47.
- [9] 王宏,田廷山,华颜涛,等.新疆柴窝堡盆地地下水库调蓄能力的初步研究[J].水文地质工程地质,2006,33(4):48-51.

(收稿日期 2009-06-18 编辑:高建群)

(上接第 28 页)

基础上,提出漂浮物运动及堆积形态模拟的相似条件。由于漂浮物运动特性与堆积形态模拟存在无法同时满足的问题,因此根据研究重点的不同,可以采用正态模型或小变率的变态模型来模拟漂浮物堆积形态。从不同模拟材料的试验结果分析,对于原体漂浮物的运动与堆积,采用木条作为模拟材料时更接近实际情况。

参考文献:

- [1] 陈鸿丽.三峡工程漂浮物调查及治理措施[J].人民长江,2007,38(5):7-8.
- [2] 陈燕,赵新泽,邓晓龙.三峡库区漂浮物综合治理方案探讨[J].电力环境保护,2002,18(4):30-32.
- [3] 李学海,杨伟,文发清.三峡工程坝区漂污运移规律及治理措施初步研究[J].长江科学院院报,2000,17(2):5-8.
- [4] 吴时强,吴修锋,童中山,等.水电站漂浮物堆积形态的数值模拟[J].水利水运工程学报,2004(1):12-17.
- [5] 周辉,童中山,吴时强,等.沙溪口水电站导漂系统物理模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
- [6] ETTEMA R, ARNDT R, ROBERTS P, et al. Hydraulic modeling: concepts and practice[M]. VA: ASCE, 2000: 120-130.
- [7] ETTEMA R, CRISSMAN R, ANDRES D, et al. Physical modeling of ice accumulation at hydraulic structures[C]//In Proc IAHR Symposium on Ice. Banff, Canada: IAHR, 1992: 515-526.

(收稿日期 2009-05-20 编辑:方宇彤)