



S


$$\frac{U^3}{gR\omega}$$

武汉水利电力学院
河流泥沙工程学教研室编著

河流泥沙 工程学 下册

水利电力出版社

内 容 提 要

《河流泥沙工程学》是以《流体力学》及《河道整治》二书为基础，根据1978年高等学校水利电力类专业教学计划及教材编审规划座谈会的要求编写的。

全书由泥沙运动的基本规律、河道演变及整治、工程泥沙问题、河工模型试验等四篇组成，分上下册出版。本书是下册，共十一章，包括：水库淤积的现象和规律、水库冲淤计算、水库泥沙的防治、水利枢纽的防沙措施、水利枢纽下游的河床变形及其防治、灌溉工程引水口及渠系泥沙问题、桥渡附近的河床变形及整治、相似论基础、定床河工模型试验、动床河工模型试验、河工模型试验的其他问题。

作者除系统阐述基本理论之外，着重介绍我国河流泥沙工程的经验和成果，也注意适当吸收国外的先进经验。

本书可供河流泥沙工程、水文、水利、地理、桥涵、航道等专业师生阅读，也可供有关部门的泥沙工作者参考。

河流泥沙工程学 下册

武汉水利电力学院

河流泥沙工程学教研室编著

(根据水利出版社纸型重印)

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 17印张 387千字

1982年2月第一版

1983年11月新一版 1983年11月北京第一次印刷

印数0001—6660册 定价1.80元

书号 15143·5257

第一节	因次分析法则	167
第二节	相似现象的相似特征	173
第三节	关于相似指示数和相似准则的定理	176
第四节	相似条件	183
第二十章	定床河工模型试验	187
第一节	正态定床河工模型试验	187
第二节	变态定床河工模型试验	192
第三节	试验中的几个问题	202
第四节	定床河工模型试验设计实例	208
第二十一章	动床河工模型试验	211
第一节	悬移质动床河工模型试验	212
第二节	推移质动床河工模型试验	223
第三节	试验中的几个问题	230
第四节	动床河工模型试验设计实例	240
第五节	系列模型试验	246
第二十二章	河工模型试验的其他问题	254
第一节	模型试验的设备	254
第二节	模型制造	262
第三节	试验程序及资料的整理和分析	265
第四篇主要参考文献		267

第三篇 工程泥沙问题

第十二章 水库淤积的现象和规律

第一节 水库淤积的严重性

在河流上修建水库，将破坏天然河流水沙条件与河床形态的相对平衡状态，使水沙条件和河床形态重新调整。库区水位壅高，水深增大，水面比降减缓，流速减小，水流的推移力和挟沙能力显著降低，促使大量泥沙在库内淤积。其结果不仅招致水库有效库容减小，原设计的防洪、发电、灌溉、给水等兴利指标不能全部实现，更严重的是将威胁水库寿命，造成水库报废。此外，水库回水末端的淤积上延，将扩大淹没和浸没面积，给工农业生产带来严重影响，并且将威胁上游重要城镇、工矿的安全和铁路、桥梁的正常使用，回水末端的泥沙淤积还会影响航运。水库淤积发展到坝前，除影响航运外，还将使大量较粗底沙通过水轮机，严重磨损水轮机的过流部件，给水电站的运行带来不利影响；库区泥沙的大量淤积，可能造成有害物质沉积于库底，使水质和环境受到污染，并且将会淤没鱼类的产卵地和改变河底条件，影响鱼类繁殖；与此同时，还将使下游细泥沙的来量大大减少，造成农业生产所需的天然肥源缺乏，并对水生生物的生长带来不利影响，鱼类产量随之减少；由于库区的泥沙淤积而相应地引起下游河道的冲刷，也将带来一系列的新问题。由此可见，在河流上修建水库，虽然会给国民经济各方面带来许多利益，但也将带来许多问题和不利影响，其后果有时可能是相当严重的，在进行水库的规划设计时，必须给予足够重视，并进行认真研究。

我国许多河流的含沙量一般都较大，水库淤积问题显得十分普遍而严重。在西北、华北和东北西部地区的河流，多为流经黄土高原的多沙河流，含沙量很大，多年平均含沙量都在15公斤/米³以上，甚至接近500公斤/米³（如祖厉河）。有的河流最大含沙量高达1400~1600公斤/米³，按体积比，泥沙占50~60%。由于这些地区河流的含沙量很大，因而造成水库淤积问题十分突出。例如，陕西省1973年统计库容在100万米³以上的水库192座，总库容为15亿米³，已被泥沙淤损4.7亿米³，占总库容的31.6%，其中43座水库已完全淤满。比较严重的延安和榆林地区，损失库容竟占总库容的88.6%和74.6%。山西省全省43座大中型水库，总库容为22.3亿米³，到1974年已淤积泥沙约7亿米³，占总库容的31.5%，平均每年淤损库容0.5亿米³。内蒙古自治区曾调查19座库容在100万米³以上的水库，总库容为2.69亿米³，已淤损库容0.844亿米³，占总库容的31.4%。宁夏回族自治区的大中型水库，30~70%已淤满，库容损失也是很严重的。以黄河干流上的水利枢纽而言，如青铜

峡水库1967~1972年五年间库容淤损86.9%，平均每年淤损17.4%。由此可见，我国多沙河流上，水库淤积相当严重，库容损失很大，而且速度快。因淤积损失库容而威胁水库的寿命，以及由此所引起的综合效益降低，水库“翘尾巴”所带来的危害，以及泥沙过机造成水轮机严重磨损等等问题，都显得十分突出。

在我国南方或其它地区含沙量较小的少沙河流，水库淤积问题虽不象多沙河流那样突出，但仍然存在，造成的损失也是不容忽视的。例如，山东省46座大中型水库，每年淤损库容0.61亿米³，约占总库容的0.5%，若加上小型水库的淤积，每年约淤损库容1亿米³，相当于每年损失一座大型水库。丹江口水库1960~1965年3月淤积9641.5万米³，因其库容很大，淤积造成的损失占总库容的比例虽然不大，但其淤积的绝对量仍然是不小的，相当于损失了一座大型水库。浙江黄坛口水库修建在含沙量很小的乌溪江上，其多年平均含沙量仅0.143公斤/米³，但自建库至1973年的15年间，总淤积量为518.88万米³，占总库容的6%，淤积损失也是不容忽视的。广西西津水库位于郁江中游，多年平均含沙量为0.24公斤/米³，自1964年建成后，仅1965年一年就淤积约280万米³，占总库容的0.2%，也是值得注意的。

必须指出，少沙河流水库的库容损失问题虽然不象多沙河流水库那样突出，但是，在通航、防洪和推移质粗颗粒对水轮机的磨损等方面，特别是在通航方面，仍反映出水库淤积所引起的问题的严重性和迫切性。如西津水库，距南宁下游约15公里的航道被严重淤塞，每年必须清挖才能维持通航，坝前引航道淤积也较严重，最大淤积厚度达2米左右，给船只过闸带来不利影响。湖南柘溪水库在距坝约50公里的库段，航道严重淤塞，常常造成枯水期断航。丹江口水库回水末端附近的库段，推移质淤积严重，造成航深不足，航道不稳定，引起航行困难。由此可见，在少沙河流上，水库淤积引起的通航问题是十分严重的。就防洪问题而言，少沙河流地区一般人口比较稠密，许多水库的上游回水末端附近都有中小城镇、工矿或铁路桥梁，由于在此库段的泥沙淤积而引起回水位的抬高，严重威胁城镇、工矿的安全和铁路、桥梁的正常使用，如西津水库上游的南宁市，四川龚咀水库上游的成昆铁路等。至于推移质粗颗粒对水轮机的磨损问题，在我国西南地区也显得十分突出，必须引起应有的重视。

水库淤积问题是一个世界范围的问题。如美国，因水库淤积每年平均损失库容达11亿米³。据统计，1935年以前修建的水库，已有10%完全淤废，14%损失库容达原库容的1/2~3/4，33%达1/4~1/2。苏联中亚细亚、高加索地区的多沙河流，水库淤积问题也较严重。据该地区41个灌溉、发电水库统计，坝高6米以下的，淤满年限为1~3年；坝高7~30米的，淤满年限为3~13年；某些大型水库，如法尔哈达水库，12年淤积损失库容达87%，有的还更加严重。日本据256个发电水库统计，平均寿命53年，其中56个（占22%）库容已减少50%，26个（占10%）减少80%，5个（占2%）已完全淤废。

解放以来，我国水利水电建设事业发展很快，取得了巨大成绩。到1975年为止，全国已建成水库7万多座，其中大中型水库2千多座，而坝高在15米以上的达1万多座。由于我国水利水电建设发展很快，建坝数量很大，而河流含沙量一般都较大，因此水库淤积问题十分突出，研究和解决水库淤积问题也就显得更加迫切。

第二节 水库淤积的现象和规律

水库淤积现象虽异常复杂，但仍具有一定的规律性。多年来，人们通过对大量水库淤积实测资料和工程实践的总结分析，对它已有深刻了解。下面分别就水库淤积的纵剖面形态、横断面形态、淤积物分布和上延现象等四个方面加以介绍。

一、水库淤积的纵剖面形态

(一) 淤积纵剖面形态的类型

实测资料表明，水库淤积的纵剖面形态可分为如下几种基本类型：①三角洲淤积；②带状淤积；③锥体淤积。有些水库的淤积形态比较复杂，介于上述几种形态之间，或同时兼有几种形态，这是由水库的特定条件所决定的。现将三种基本淤积形态分述如下。

1. 三角洲淤积

这种淤积形态，比较广泛地出现于湖泊型水库（又称胃状水库）中。官厅水库是一个具有典型的三角洲淤积形态的水库。现以这个水库的淤积过程说明这种淤积形态的特点^[5]。

官厅水库修建在永定河上，其主要特点是，水库属典型的湖泊型，进库含沙量较大，年平均含沙量为36公斤/米³，汛期进库沙量约占全年进库总沙量的80%；进库泥沙较细， $d < 0.01 \sim 0.02$ 毫米的泥沙，汛期约占50~80%，汛期泥沙中值粒径变动于0.007~0.025毫米之间；水库蓄水位变幅较小，正式运用后库水位的变幅为3~5米。在上述条件下，水库正式蓄水运用后淤积物具有完整的三角洲形态。根据淤积纵剖面的外形和床沙粒配的沿程变化特点（图12-1），可以将淤积

区分为五段：①三角洲尾部段；②三角洲顶坡段；③三角洲前坡段；④异重流淤积段；⑤坝前淤积段。

三角洲尾部段的主要特点是：挟沙水流处于过饱和状态，进库泥沙中的粗颗粒首先在此落淤，明显地呈现出水流对泥沙的分选作用，淤积物主要是推移质和悬移质中较粗部分。淤积使回水曲线相应抬高，并同时向上游延伸；而回水曲线向上游延伸的结果，又反过来影响尾部淤积不断向上游发展，二者相互影响、相互制约，体现了水流与河床的相互作用。实测资料表明（图12-1），淤积物中 $d < 0.08$ 毫米的泥沙在本段起点处仅占10%左右，而在本段终点处则占90%左右，具有明显的因水流的分选作用而造成的床沙沿程细化现象。回水末端的淤积上延，根据1956~1958年的三年资料

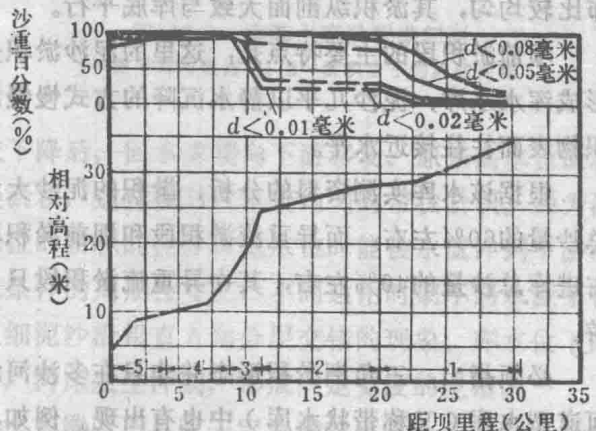


图 12-1 官厅水库淤积纵剖面及淤积物粒径沿程分布

1—尾部段；2—顶坡段；3—前坡段；4—异重流淤积段；5—坝前淤积段

体现了水流与河床的相互作用。实测资料表明（图12-1），淤积物中 $d < 0.08$ 毫米的泥沙在本段起点处仅占10%左右，而在本段终点处则占90%左右，具有明显的因水流的分选作用而造成的床沙沿程细化现象。回水末端的淤积上延，根据1956~1958年的三年资料

分析，其平均数值为每年2.6公里。

三角洲顶坡段的主要特点是：挟沙水流已趋近于饱和状态。顶坡坡面一般与水面线接近平行，水流接近均匀流。与水流条件相适应，顶坡上的床沙组成沿程变化不大，无明显的床沙沿程细化现象，说明分选作用不显著。三角洲洲面的断面形态具有一定的河相关系，一般的断面河相关系式在此段仍可适用。实测资料表明，1955年水库正式运用前河床比降约为14‰，而1958年水库正式运用后的第三年，三角洲洲面比降已减缓为3.76~4.14‰，水面比降则为2.31~4.65‰，两者十分接近。淤积在此段的泥沙组成为： $d > 0.01$ 毫米者占80%，而 $d > 0.05$ 毫米者占20%以上（图12-1）。三角洲顶坡段的淤积应与三角洲向前推进引起的相对侵蚀基准面的抬升有关。

三角洲前坡段的主要特点是：这里水深陡增，流速剧减，水流挟沙力也因而大大减小，于是使挟沙水流又一次处于过饱和状态，大量泥沙在此段淤积，其中主要是属于不能参加异重流的悬移质中的较细泥沙。淤积结果使三角洲不断向坝前推移。淤积物组成沿程变化较大，前坡坡顶的床沙组成与顶坡段相同，而前坡坡脚的床沙组成则与异重流淤积段相同，再一次出现明显的分选作用，河床沿程细化。实测资料表明，1958年三角洲前坡比降为26‰，不仅远大于三角洲尾部段和顶坡段的比降，甚至大于原河床比降。三角洲向坝前推进的速度，从1956~1958年的三年资料分析，平均数值为每年3公里左右，与回水末端的淤积上延速度大体接近。淤积泥沙组成是 $d < 0.01$ 毫米者在坡顶处仅占20%左右，而在坡脚处则占80%左右（图12-1）。

异重流淤积段的主要特点是：异重流潜入后，因进库流量减小或其它原因，部分异重流未能运行到坝前便发生滞留现象，因而造成淤积。淤积的泥沙组成较细，实测资料表明，80%以上的泥沙小于0.02毫米，粒径沿程几无变化，基本上不存在分选作用。淤积分布比较均匀，其淤积纵剖面大致与库底平行。

坝前淤积段的主要特点是：这里的泥沙淤积是由于不能排往水库下游的异重流在坝前形成浑水水库，泥沙几乎以静水沉降的方式慢慢沉淀而造成，落淤的泥沙全为细颗粒，淤积物表面往往接近水平。

根据该水库实测资料的分析，淤积的泥沙大量分布在三角洲上，其淤积的沙量占进库总沙量的60%左右，而异重流淤积段和坝前淤积段的淤积沙量，以及排往下游的沙量，仅占进库总沙量的40%左右，其中异重流淤积段只占10%左右，其余30%淤在坝前或排往下游。

必须指出，三角洲淤积形态并非只在多沙河流上的湖泊型水库中出现，在多沙河流的河道型水库（又称带状水库）中也有出现。例如，辽宁省红山水库为典型的河道型水库，位于西辽河的主要支流之一老哈河中游，多年平均含沙量为44公斤/米³，悬移质中值粒径为0.02毫米，含沙量高而泥沙组成细，水沙条件与官厅水库较为接近。1965年水库运用以来，年内库水位变幅较小，约为6~8米，汛期水位相对稳定，变幅仅4米左右。在此条件下，库区形成了三角洲淤积形态。此外，不少少沙河流上的水库，有的是湖泊型水库，有的是河道型水库，尽管进库含沙量不大，但库区也出现三角洲淤积形态。如山东省治源水库，水流出谷后到坝前为湖泊型，其进库多年平均含沙量为2.21公斤/米³，库水位年内变

幅为5~10米，汛期蓄水，枯季需水时放水灌溉。在这种条件下，库区出现三角洲淤积形态，同时，三角洲不断地扩大、长高和向坝前推移，与上述三角洲发展的一般规律基本一致。江西省上犹江水库是典型的河道型水库，进库多年平均含沙量仅为0.12公斤/米²，但在其支流营前水也出现三角洲淤积形态。

2. 带状淤积

这种淤积形态多出现在河道型水库中。现以丰满水库为例说明这种淤积形态的现象和特点^[3]。

丰满水库为修建在少沙河流上的一个典型的河道型多年调节水库，位于第二松花江干流上。该水库进库沙量小，多年平均含沙量仅为0.24公斤/米³，主要支流辉发河的多年平均含沙量为0.666公斤/米³。进库泥沙较细，粒径小于0.01毫米的泥沙平均占50%，汛期进库泥沙 d_{50} 为0.01~0.02毫米。库水位变幅较大，正常运用时变幅为10~20米，与此相应，回水变动范围也较长。上述水库形态、水沙特点和运用条件所造成的水库淤积特点是，淤积物自坝前一直分布到正常高水位的回水末端，呈带状均匀淤积（图12-2）。根据水库运用情况和水流泥沙运行特点，可以将淤积地区分为三段：①回水变化段；②常年回水区行水段；③常年回水区静水段。

回水变化段是指最高与最低库水位的两个回水末端范围内的库段。在此范围内淤积的泥沙较粗，绝大部分是推移质和悬移质中的较粗部分，淤积分布也较均匀。形成这种淤积与此段水流变化特点有关。在此段，由于水库的多年调节运用，水位变化具有周期性，水流条件也发生相应变化。

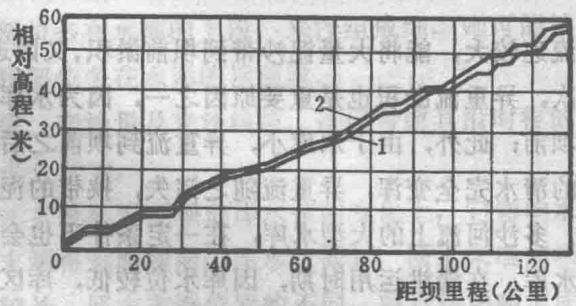


图 12-2 丰满水库淤积纵剖面
1—原平均河底高程；2—淤积后平均河底高程

当库水位较高时，回水末端位居上游，较粗泥沙便开始在此淤积；当库水位下降后，回水末端向下游移动，原来高水位淤积的泥沙被冲到下游，并在下游回水末端处淤积，这样便形成比较均匀的带状淤积。因为淤积的沙量甚小，而泥沙组成又很细，高水位时淤积的泥沙在低水位时能被水流冲到下游，故未能形成三角洲淤积。此外，由于水流条件的周期性变化，不同运用时期不同水流条件对泥沙的分选作用，还在横断面上形成粗细泥沙沿铅直方向分层交错的现象。库水位下降时，回水末端以上的河段恢复成天然河道，河床发生冲刷，形成一定宽度的主槽。

常年回水区行水段是指最低库水位回水末端以下具有一定流速的库段。此段除首端略有少量推移质淤积外，主要是悬移质淤积。因为含沙量小，泥沙细，而水流沿程变化又较小，故淤积范围长，分布也较均匀，仅为一很薄的淤积层，不足以形成三角洲淤积。

常年回水区静水段是指坝前水流几乎为静水的库段。此段全为悬移质中的极细泥沙，以静水沉降方式沉淀到库底形成的淤积，其淤积分布极为均匀，基本上是沿湿周均匀薄淤一层。

这个水库因汛期进库含沙量很小，而进库流量和相应的流速则较大，又属河道型水

库，水流比较集中，洪峰期坝前平均流速尚有0.34米/秒，故估计不会发生异重流，坝前段的冲泻质淤积，不是由异重流挟带而来。

3. 锥体淤积

在多沙河流上修建的小型水库，比较普遍地出现锥体淤积形态。图12-3陕西省黑松林水库的淤积纵剖面，就是一个典型的锥体淤积。

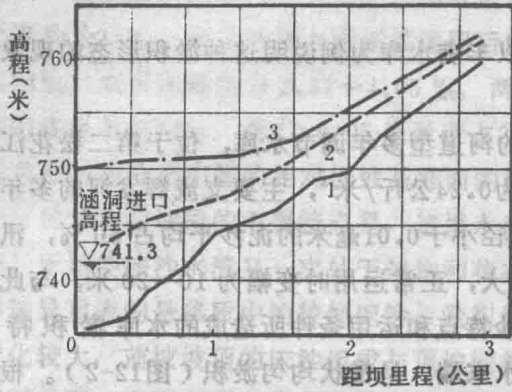


图 12-3 陕西黑松林水库淤积纵剖面

1—原河床；2—淤积后槽河床；3—淤积后滩面

这种淤积形态的主要特点是坝前淤积多，泥沙淤积很快发展到坝前，形成淤积锥体，与上述大型水库先在上游淤积然后向坝前推进发展的淤积形式完全不同。当水库淤满后，河床纵比降比原河床纵比降小，此后淤积继续向上游发展。

上述淤积特点，主要由于水库壅水段短、底坡大、坝高小、进库含沙量高等因素综合造成。因为底坡大、坝高小，故水流

流速较大，能将大量泥沙带到坝前淤积，又因进库含沙量高，故造成坝前淤积发展很快。其次，异重流淤积也是重要原因之一，因为水库壅水段短、底坡大，异重流常常能够运行到坝前；此外，由于水库小，异重流到坝前之后即逐渐排挤清水，并和清水相混合，使水库的清水完全变浑，异重流随之消失，挟带的泥沙便在坝前大量淤积。

多沙河流上的大型水库，在一定条件下也会出现锥体淤积形态。如黄河干流上的三门峡水库，在滞洪运用时期，因库水位较低，库区流速较大，大量泥沙被带到坝前淤积，因而出现锥体淤积形态（图12-4）。

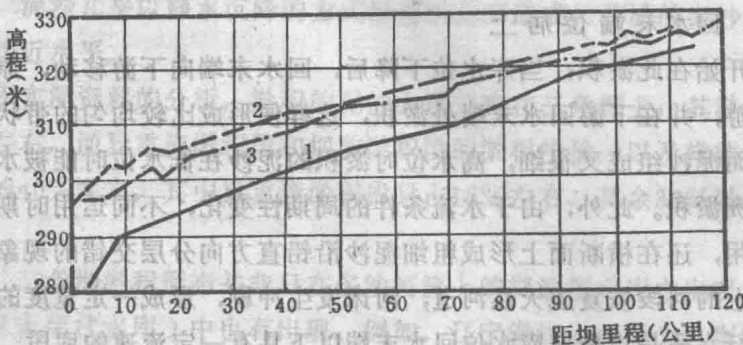


图 12-4 三门峡水库淤积纵剖面

1—1960.4.槽；2—1969.10.槽；3—1971.10.槽

有些少沙河流上的水库（如山东省七一水库），尽管含沙量不大，但由于坡陡流急、回水短，也出现锥体淤积形态。

以上所述为三种基本的淤积形态。有些水库的淤积介于这三种基本形态之间，形成复杂的淤积形态，在研究水库淤积的现象和规律时，必须对具体情况作具体分析。

(二) 影响淤积纵剖面形态的主要因素

影响水库淤积数量和分布的因素是众多的，主要为：

(1) 库区地形 水库按库区地形一般分为湖泊型水库、河道型水库和介于二者之间的水库。库区地形对淤积量和淤积分布影响甚大。湖泊型水库由于水流入库后突然扩散，水流挟沙力骤减，因而淤积量大，而且集中在库首，并往往以三角洲形态出现。河道型水库则很不相同，由于库形比较窄长，水流挟沙力处于缓变过程，泥沙淤积量相对较小，且沿程分布均匀。对于库区地形复杂，宽窄相间的水库，在展宽处泥沙大量淤积，而在束窄处淤积较少，则形成比较复杂的不均匀淤积形态。

(2) 来水量、来沙量、来沙组成及沿时程的变化 进库水量的大小，直接影响水流挟沙力的大小，因而影响淤积量和淤积分布。此外，进库水量的大小还影响水库的回水变化。在一定的库水位下，来水量大时回水末端靠近坝前，来水量小时回水末端远离坝前。由于回水末端位置的不同，泥沙淤积量和淤积分布显然也不相同。

进库沙量是直接影响水库淤积数量的重要因素，来沙量大，显然水库淤积量就大。来沙量的大小对水库淤积分布也有一定的影响，例如在许多条件都近似的情况下，多沙河流与少沙河流的淤积形态就不尽相同。来沙组成与水库淤积量和淤积分布也有密切关系。来沙组成较粗，将有利于在库内淤积，淤积部位多在水库的上段；来沙组成细，则可能被排往水库下游，从而减少水库淤积量，其淤积部位多在水库的坝前段。

在分析水库淤积时，不仅要考虑来水量、来沙量及来沙组成，还应考虑其沿时程的变化，因为这些对水库的淤积量和淤积分布也有影响。

(3) 水库的运用方式 水库运用方式直接反映在坝前库水位的变化上，它影响水库回水末端位置的变化。库水位高时，回水末端将远离坝前；库水位低时，回水末端向坝前推移。库水位变幅大时，回水变动范围也较长。回水末端位置的不同，将直接影响水库淤积的数量和分布。我国现阶段采用的水库运用方式，有拦洪蓄水运用、蓄清排浑运用以及滞洪运用等三种。一些水库淤积的实测资料表明：拦洪蓄水运用的水库，常年维持高水位蓄水，库水位变化较小，大量泥沙就在库内淤积，其淤积量与河道来沙量成正比，基本上等于河道的进库沙量（极细的冲泻质除外），库区常出现三角洲淤积。蓄清排浑运用的水库，在汛期沙量比较集中基本上不蓄水，利用水库泄水进行排沙，而在非汛期沙量较少时才蓄水运用。显然，这种运用方式将大大减少淤积量。滞洪运用水库是汛期只起滞洪作用，在滞洪的过程中排泄一部分泥沙，而在非汛期才进行蓄水，这种运用方式也将减少水库淤积的泥沙。蓄清排浑和滞洪运用的水库，有利于出现锥体淤积或带状淤积。

(4) 水库的泄流规模和泄流方式 泄流规模大，则淤积的泥沙在水库泄水时可能冲走一部分，从而大大减少水库的淤积量。在排沙的过程中，由于冲刷作用可能改变水库原来的淤积形态，因而对水库的淤积形态也会产生影响。泄流规模小，则水库淤积的大量泥沙，将无法排往水库下游，因而水库淤积量大。同时，因为泄流规模小，冲刷作用甚弱，往往难以改变水库原来的淤积形态，因而对水库的淤积形态不会产生较大的影响。

泄流方式的不同，对水库的淤积量和淤积分布也将产生影响。例如，卧管式和竖井式放水建筑物只能放走水库的表层清水，不能排走底部浑水，因而水库淤积量大。水库若有

底孔设施，并分层和分散布设，则对水库排沙有利，能减少水库淤积量，并对淤积分布产生影响。

(5) 库容的大小 小水库淤积发展快，特别是多沙河流上的小型水库，很快将被泥沙淤满，淤积形态多为锥体淤积。大型水库的淤积则不尽相同，就淤积泥沙的绝对数量而言，显然远大于小型水库，但由于库容大，淤满年限则较小型水库为长。大型水库淤积往往是从水库的上游段开始，然后逐渐向坝前发展；而小型水库则往往由于出现锥体淤积而形成相反的淤积发展。只有在某些特定条件下，有些大型水库才会出现锥体淤积形态，而与小型水库的淤积发展相近似。

(6) 支流的汇入 支流的汇入在不同程度上改变干流库区的水沙特性，从而影响水库的淤积量及其形态。其影响程度的大小，视支流的来水来沙量、来沙组成及其沿时程的变化等水沙特性而定。

由上可知，影响水库淤积的因素很多，并且错综复杂，在分析研究某一个水库淤积的具体特点和规律时，应对上述诸因素进行具体的综合分析，并在错综复杂的许多影响因素中，透过事物的现象，抓住事物的实质，全力找出起决定作用的主要因素。

从现有水库淤积的实测资料来看，影响水库淤积量及其淤积分布的决定性因素，往往是水库的运用方式。在水库具有一定规模的泄流条件下，水库的运用方式常常是决定水库淤积的关键。例如，官厅水库1956年正式运用以前，库水位变幅较大，坝前最大水深与最小水深之差达16米，回水末端变动范围也较长，因而水库的淤积沙量较少，淤积纵剖面无明显的三角洲，而在水库正式蓄水运用以后，库水位变幅较小，仅3~5米，造成水库的淤积沙量较大，淤积纵剖面形成完整的三角洲形态。三门峡水库自建库运用至1962年3月为蓄水运用方式，水库淤积严重，淤积纵剖面为三角洲形态；以后改为低水头防洪排沙运用，水库淤积沙量大为减少，淤积纵剖面出现锥体淤积，无明显的三角洲形态。红山水库也有类似情况，1960~1964年初蓄阶段出现锥体淤积，1965年开始正式蓄水运用，库水位变幅较小，汛期水位相对较稳定，淤积发展加快，出现三角洲淤积。此外，少沙河流上的水库也有类似情况，以四川省龚咀水库为例，该水库多年平均含沙量为0.48公斤/米³，1971年以前为自由滞洪期，库区出现锥体淤积；1971~1972年8月，水库开始蓄水运用，但水位变幅较大，全年平均变幅为12.6~36.9米，库区出现带状淤积；自1972年8月以后，库水位趋于稳定，全年平均变幅仅为0.8~2.6米，库区出现三角洲淤积。由此可见，不论是多沙河流上的水库还是少沙河流上的水库，在同一个水库中，水库运用方式的不同，对水库的淤积量和淤积分布，往往起着决定性的作用。当然，在某些特殊情况下，还应对具体情况作具体分析。

(三) 纵剖面淤积形态的判别

关于纵向淤积形态的判别，国内不少单位曾在分析水库实测资料的基础上，提出不少判别公式，主要的有：

陕西省水利科学研究所等单位统计了30个多沙河流水库的实测资料，得如下经验判别式：

$$K = \frac{V \times 10^{-4}}{W_s J_s} \quad (12-1)$$

当 $K < 2.2$, 为锥体淤积; $K > 2.2$, 为三角洲淤积或带状淤积。式中 V 为时段平均库容, 米³; W_s 为时段平均入库沙量, 米³; J_s 为库区河床纵比降。该式所依据的资料范围较广, 但未考虑水库运用这一重要因素, 并且未区分三角洲淤积和带状淤积, 这是不足之处。

原水电部第十一工程局分析了 7 座水库实测资料 (其中 5 座为多沙河流水库), 提出如下经验判别式:

$$\frac{SV}{Q} > 1, \quad \frac{\Delta h}{H} < 0.1 \quad (12-2)$$

为三角洲淤积;

$$0.25 < \frac{SV}{Q} < 1, \quad 0.1 < \frac{\Delta h}{H} < 1 \quad (12-3)$$

为带状淤积;

$$\frac{SV}{Q} < 0.25, \quad \frac{\Delta h}{H} > 1 \quad (12-4)$$

为锥体淤积。

式中 Q 为汛期平均流量, 米³/秒; S 为汛期平均含沙量, 公斤/米³; V 为时段平均库容, 亿米³; H 为坝前平均水深, 米; Δh 为库水位变幅, 米。该式反映了影响水库纵向淤积形态的主要因素, 即库水位的变化条件 $\Delta h/H$ 及入库水沙条件 SV/Q , 但所依据的资料不够广泛。

陈文彪分析了 8 座少沙河流水库的实测资料, 以 $\Delta h/H$ 表征对纵向淤积形态起主要作用的水库运用方式的影响, 以 W_s/W 表征入库水沙条件的影响, 当 $\Delta h/H$ 小而 W_s/W 大时, 应有利于形成三角洲淤积, 得如下经验判别式^[5]:

$$\varphi = \frac{H}{\Delta h} \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1/2} \quad (12-5)$$

当 $\varphi > 0.04$, 为三角洲淤积; $\varphi < 0.04$, 为带状淤积。式中 φ 为水库纵向淤积形态无因次判别数; H 为水库历年平均坝前水深, 米; Δh 为水库历年平均水位变幅, 米; W_s 为多年平均入库悬移质输沙量, 亿米³; W 为多年平均入库径流量, 亿米³。

上式未包括锥体淤积形态。对于少沙河流水库而言, 锥体淤积需根据具体条件进行分析, 只有在含沙量较一般少沙河流稍大, 且坡陡流急或自由滞洪条件下才有可能出现, 这与多沙河流水库不尽相同。

以上判别式都属于经验性质, 所依据的资料还不够多, 因此都有待进一步完善。有些水库的淤积形态十分复杂, 由其复杂的地形特征或其它特定条件所决定, 还应结合不同水库的具体条件加以分析。

(四) 淤积纵比降的估算

表征水库淤积纵剖面形态的主要特征值为纵比降, 如何确定这样的比降, 是水库淤积计算中的一个重要课题。

当水库淤积具有三角洲形态时, 在三角洲顶坡段, 由于水流接近均匀流, 并基本上处

于输沙平衡状态，其比降原则上可以通过理论计算确定。具体作法是，通过联解水流连续公式、阻力公式、挟沙力公式及断面河相关系式，求得比降的表达式，如

$$J = \frac{n^2 \zeta^{0.4} S^{0.73} / m \omega^{0.73} g^{0.73}}{K^{0.73} / m Q^{0.2}} \quad (5-22)$$

在三角洲顶坡段河槽系由水流塑造而成的条件下，这个公式可以适合各种情况，只要对给定的来水来沙，正确地选定有关参考值 K 、 m 、 n 及 ζ 即可。当然，这样的公式只有在来水来沙条件在较长时距内变化不大，因而河床变化滞后于水沙条件变化的现象得到克服之后才是成立的。在水沙条件变化较大时，公式中表征来水来沙条件的含沙量 S 、沉速 ω 、流量 Q 只能取时段中的某种特征值，例如相应于造床流量的有关数值，或对塑造河床起决定作用的大水大沙时的平均值。式(5-22)不仅适用于悬移质，也基本上适用于沙质推移质，因为悬移质中的床沙质实际上概括了沙质推移质。只是在单纯沙质推移质起作用的情况下，在联解有关方程式时，断面河相关系式可能应予以取消，因为沙质推移质对塑造河宽不一定起作用。如系卵石推移质，则除断面河相关系式应取消之外，水流挟沙力公式还应换为推移质输沙率公式，而导出比降 J 的原理则仍然不变。总起来说，通过联解有关公式求三角洲顶坡比降的作法，在理论上是无可非议的，关键在于正确地选定有关参数，而这正是困难所在。特别是因为水沙条件变化快、变幅大，而比降则变化慢、变幅小，如果选择不当，就可能造成较大误差。正因如此，大量经验公式便相继出现，主要有以下两种类型。

一种类型是，基本上以式(5-22)的结构形式为出发点，或改用不同于 $\sqrt{B/h} = \zeta$ 的其它形式的断面河相关系式(如阿尔图宁公式之类)，导出新的结构形式，并根据实际资料，调整有关指数和系数。例如，陈文彪将糙率 n 及沉速 ω 视为床沙 d_{50} 的函数，通过整理4座少沙河流水库实测资料，得经验关系式如下^[5]：

$$J_d = \frac{18 S^{0.25} d_{50}^{0.1}}{Q^{0.15}} \quad (12-6)$$

式中 J_d 为三角洲顶坡平均比降； Q 为入库多年平均流量，米³/秒； S 为入库多年平均含沙量，公斤/米³； d_{50} 为顶坡段床沙中值粒径，毫米。

另一种类型是，将三角洲顶坡比降与原河床比降联系起来。其理论根据是，原河床比降是挟沙水流和河床长期相互作用的产物，而三角洲顶坡比降则是在修建水库改变了水沙条件后挟沙水流和河床相互作用的产物，两者应存在一定联系。这一理论根据，在原河床是由挟沙水流塑造成的冲积河床的条件下，自然是成立的；如原河床并非冲积河床，或系卵石冲积河床，而所研究的却是悬移质淤积物的比降，两者自然不应存在任何联系。属于这一类型的公式，如焦恩泽分析多沙河流水库实测资料所得到的经验关系式^[16]：

$$J_d = 4 \frac{S^{0.2} J_0^{0.22}}{Q^{0.12} 4y_0^{0.34}} \quad (12-7)$$

式中 Q 为时段平均流量，米³/秒； S 为时段平均含沙量，公斤/米³； J_0 为原河床比降； $4y_0$ 为三角洲顶点淤积厚度，米。引进淤积厚度的原因是作者认为比降变缓的程度与侵蚀基点抬高的程度有关。

三角洲前坡比降的确定也是一个很复杂的问题。如果将三角洲看成一个巨大的沙波，

则三角洲的前坡可以看成沙波的背流坡。这样，它的比降应接近泥沙水下休止角的正切。显然，这种情况仅出现于三角洲淤积系由推移质运动所决定的条件之下。而通常所见到的水库三角洲淤积系由悬移质运动造成，三角洲前坡的形成机理与沙波背流坡迥然不同。实测三角洲前坡比降远较上述休止角的正切为小的原因即在于此。这里起决定作用的因素是，较异重流粒径为粗的泥沙，在水深急剧增加、流速急剧减小的条件下所发生的扩散沉降过程。原则上这一比降值应通过求解非均匀流泥沙扩散方程定出。作为近似，均匀流泥沙扩散方程的解也可加以利用。为此，须先求出前坡段的平均水力要素，可取其等于坡顶及坡脚水力要素的平均值。将所得前坡段平均水深 h 及流速 U ，再加上异重流的上限粒径 ω ，代入式(3-133b)或(17-20)中，或利用图3-37，取坡脚平均含沙量(即河段出口平均含沙量)与坡顶河底含沙量(即河段进口河底含沙量)的比值接近于0，即较此为粗的泥沙全部沉淀，就可求得极限落淤长度 x 。因已知三角洲顶点及坡脚的高程差，故前坡比降即可据以算出。

三角洲前坡比降也和顶坡比降一样，存在不少经验关系式。例如曹如轩等分析多沙河流水库实测资料得到的经验关系式

$$J_q = \frac{0.083}{Q_c^{0.54}} \quad (12-8)$$

式中 Q_c 为发生异重流时进库洪峰平均流量，米³/秒。又如焦恩泽求得的经验关系式

$$J_q = 1.6J_0 \quad (12-9)$$

应该指出，以上介绍的所有经验关系式由于考虑的因素不够全面，或者只是考虑间接起作用的因素(例如 J_0)，故一般只有参考价值，不能未经考证而直接引用。

库区各段淤积泥沙粒径的确定是一个十分复杂的问题，它显然决定于三方面的因素：即进入库段的来沙组成，库段的水力条件和冲淤过程，并随着它们的变化而变化。关于这一方面的工作，过去进行得很少。韩其为等所提出的非均匀沙不平衡输沙计算方法，对此作了可贵的尝试，将在下一章第四节中详细介绍。当库区淤积具有成熟的三角洲形态时，问题可以适当简化。如果将推移质淤积分开考虑，悬移质淤积可以粗略地分为两段，即三角洲前坡脚以上的三角洲淤积段和以下的异重流淤积段。淤积物代表粒径，后者可取异重流泥沙的平均粒径，前者可取来沙中扣除异重流泥沙之外的其余部分的平均粒径。当然，其中应包括作充填空隙之用的细颗粒泥沙，其所占百分数可根据实测资料定出。以往的水库冲淤计算，实际上就是采取的这种粗略划分的方法。应该指出，这种划分方法尽管比较粗略，但如将三角洲淤积作为一个整体来考虑，它还是很接近实际的。进一步略为详细的划分，是将三角洲分为尾部段、顶坡段和前坡段，各段的淤积物粒径彼此不同。如前所述，这三段中只有顶坡段淤积物的粒配比较稳定，其它两段均沿程急剧细化，谈论它们的淤积物粒配只具有全段平均意义。这种情况下粗略的作法是，从来沙粒配中扣除三角洲顶坡段水流条件不能起动的粒径及属于冲泻质的粒径[例如 $\omega < UJ$ 的粒径或由其它经验公式所确定的分界粒径，如式(13-11)]，并以之作为三角洲顶坡的床沙粒配。这里有两个作用相反的因素未予考虑：一个是，在尾部段内，可能有一部分较上述起动粒径为小的粗颗粒会沉积下来。不考虑这一点，按上述方法算得的三角洲顶坡床沙就偏粗。另一个是，由

于三角洲顶坡段悬移质中的床沙质和床沙的交换作用，粗的会沉下来，细的会冲起。不考虑这一点，按上述方法算得的三角洲顶坡床沙就偏细。上述粗略作法的假定是，这两个作用相反的因素彼此抵销，这自然是十分近似的。至于三角洲前坡段平均粒配，同样，粗略的作法是，取其等于三角洲顶坡床沙及同等重量的异重流淤积物的混和粒配。三角洲尾部段平均粒配，虽然也可以粗略地取其等于三角洲顶坡床沙及前述来沙粒配中不能起动部分的同等重量的混合粒配，但这里由于掺杂着推移质淤积，成果的可靠性就更差一些。应该指出，对于给定来水来沙条件（包括含沙量及粒配），在输沙平衡或者存在冲淤的条件下，如何确定床沙粒配（包括天然河流和水库），是一个研究较少没有很好解决的问题，尚有待从床沙粒配的形成机理作更深入的研究。目前有一些通过分析实测资料建立的经验公式，虽然不失为一种途径，但由于现象本身比较复杂，如果考虑的影响因素不够全面，资料范围不广，是不能推广应用的，这里不拟介绍。

二、水库淤积的横断面形态

天然河道的横断面形态常常是滩槽分明的，冲积平原河道尤其如此。在河道上修建水库以后，其横断面形态将发生变化，尽管这种变化极为复杂，但仍然存在一定的特点和规律。

实际观察表明，多沙河流上的水库普遍地存在“淤积一大片，冲刷一条带”的特点和规律。这就是水库淤积在横断面上的分布基本上是平淤的，库区横断面不存在明显的滩槽形态，出现淤积一大片的特点。当库水位下降时，如果水库具有足够大的泄流能力，并采取经常泄空的运用方式，则库区将拉出一条深槽，恢复横断面上滩槽分明的河道形态，形成一个有滩有槽的复式断面，出现冲刷一条带的特点。

图12-5为陕西黑松林水库的一个横断面淤积过程。由图可见，1962年以前该水库采用拦洪蓄水运用方式，水库淤积严重，整个横断面基本上已经淤平，滩槽界限已经消失。1962年以后为了减轻水库的淤积，改用蓄清排浑运用方式，汛期泄空排沙，非汛期蓄水运用，不仅大大减轻水库的淤积量，而且在横断面形态上又开始出现明显的滩槽界限，在原来平淤的库底上拉出一个深槽，形成复式断面。

多沙河流水库在淤积过程中，横断面的发展变化，一般还具有“死滩活槽”的规律。即滩地只淤不冲，滩面逐年淤高；主槽则有淤有冲，在采用合理的运用方式的条件下，淤废的主槽可以复活，使库区保持一条相对稳定的深槽，不致被泥沙淤死。从图12-5中也可以看出上述现象。

水库淤积的实际运用表明：当库区滩地上水以后，水浅流缓，大量泥沙沉淀，水位越

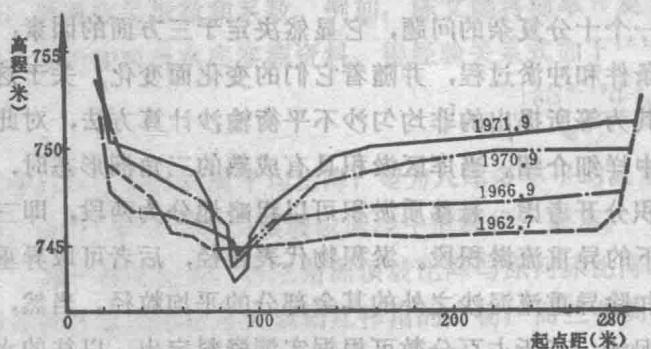


图 12-5 黑松林水库横断面淤积过程