

湖泊与水库泥沙淤积计算方法

国际水文计划(IHP)

第二阶段项目A.2.6.1 专题组报告

报告人:Stevan Bruk



南京水利科学研究院技术情报研究室

1987年3月

联合国教科文组织 巴黎

湖泊与水库泥沙淤积计算方法

国际水文计划 (IHP)

第二阶段项目 A.2.6.1 专题组报告

报告人: Stevan Bruk

1985年2月

序 言

这篇技术报告是根据国际水文计划政府间委员会 (Bureau of the Intergovernmental Council of IHP) 的决定而准备的, 该委员会于1981年委任了一名报告人(S. Bruk) 和二名合作报告人 (Fan Jiahua 和 H. E. Jobson) 在 IHP II.A.2.6.1 计划项目下准备报告。国际大陆侵蚀委员会 (J. McManus) 和国际水资源管理培训中心 (CEFIGRE) 也派了代表 (J. Evrard) 参加。

其任务为: “评论湖泊与水库淤积的计算方法, 并准备一份关于最近发展情况的报告。”报告要提供一个湖泊和水库淤积问题研究工作以及实用计算方法最近发展状况的概要, 还包括预防或减轻水库在运行期间淤积的适当措施的建议。最后, 报告还确定进一步研究的需要并对在第三阶段(1984—1989) IHP 可能开展的活动提出建议。

报告的目录及每章的草稿在巴黎会上进行了讨论。会议分别于1981年7月和1982年9月举行。报告的文章内容由下列成员提供。

第一章——水库淤积在技术和经济方面的影响, J. Evrard, 法国电力公司, 贝齐埃 (Electricité de France, Beziers)。

第二章——水库淤积的物理过程, J. McManus, 英国敦提大学 (University of Dundee, Dundee, U. K.)。

第三章——现场测量, H. Jobson, 美国地质调查局 (U. S. Geological Survey, U.S.A.)。

第四章——保持库容的方法, 范家骅, 北京水利水电科学研究院, 中国。

第五章——预报方法, S. Bruk, “Jaroslav Cerni” 水资源开发研究所, 南斯拉夫 (“Jaroslav Cerni” Institute for Development of Water Resources, Belgrade, Yugoslavia)。

第六章——结论与建设, 由提供报告内容的各章著者提出, S. Bruk 收集整理编纂。

国际原子能机构的 B. R. Payne 为编写第三章作了一些工作。

报告每一章的草稿都在写作组成员间传阅并相互提出意见。报告的所有底稿由 McManus 博士在进行英文编辑时作了审阅, H. E. Jobson 先生则注意使报告便于照像制版。

该项目的技术秘书——联合国教科文组织水学司高级计划专家张有实 (Zhang Youshi) 先生对各项工作进行了协调。

此外还有许多国际组织, 如世界气象组织、国际原子能机构、国际灌溉排水委员会、国际科学水文学协会及其国际大陆侵蚀委员会和国际水资源管理培训中心都一直了解该项工作的进展情况。

报告内容首先是在 1981 年 6 月 29 日—7 月 1 日联合国教科文组织于巴黎召开的辑稿人第一次会议上进行了讨论, 尔后, 1982 年 9 月 20 日—24 日又在巴黎举行的第二次会议上作了修

改。报告初稿完成后，初步在1983年10月11—16日在南京召开的第二次河流泥沙国际学术讨论会的一次特别会议上进行了讨论。

在最后的报告中，著者们回答了南京讨论会期间提出的建议和意见。在南京讨论会上提出的有关补充学术活动的建议包括在本报告最后一章。

报 告 人：Stevan Bruk 博士

贝尔格莱德 1985年2月

编 者 的 话

“湖泊与水库淤积计算方法”一书是联合国教科文组织国际水文计划第二阶段A.2.6.1专题报告，1985年由联合国教科文组织（Unesco）在巴黎用英文出版，全书共分六章：

第一章：水库淤积在技术上和经济上的影响——简述水库淤积各方面的影响。

第二章：水库淤积物理过程——定性描述湖泊与水库中的淤积现象，指出对目前尚不清楚的某些现象还需作进一步研究。

第三章：野外测量——主要介绍目前国际上在水库地形、淤积物密度以及淤积龄期测量方面采用的新技术。对泥沙淤积传统的测量技术只作了简单的介绍。

第四章：恢复库容的方法——介绍世界各国已采用的各种方法及其效果，并列举了成功的与不成功的典型实例加以说明，其中有些实例在国际上还是第一次公开发表。

第四章：预报计算方法——简要介绍了常见的预报方法，同时也考察了一些新的预报方法。除了库区淤积和坝下冲刷模型，还介绍了一维数学模型以及有关的估算方法。

本书可供水利规划、设计和管理运行的技术人员和决策者以及水利、地质、地理、力学等有关专业的研究人员及大专院校师生参考。

本书由南京水利科学研究院技术情报研究室组织翻译校对，参加译校人员如下：

第一章 葛九峰译，金德春校。

第二章 王世夏译，柴挺生、刘俊潮校。

第三章 林晓碕译，刘俊潮、柴挺生校。

第四章 周名德译，李洪良校。

第五章 李洪良译，柴挺生校。

第六章 王新会译，柴挺生、刘俊潮校。

全书由北京水利水电科学研究院泥沙所范家骅和王兆印总校，最后由范家骅审定。

责任编辑：唐仁楠。

目 录

绪 论	1	编写报告所采用的方法	1
报告范围	1		

第一章 水库淤积在技术和经济方面的影响

1.1 物理和生物方面的影响	2	的影响	7
1.1.1 对水库的影响	2	1.2.2 对闸门和阀门的影响	7
1.1.2 对水库上游河段的影响	3	1.2.3 对坝的影响	7
1.1.3 对大坝下游河段的影响	3	1.2.4 对大坝监测的影响	7
1.1.4 泥沙对水生物的影响	5	1.3 在经济和社会方面的影响	7
1.2 对工程安全的影响	7	1.3.1 库容减少所引起的后果	7
1.2.1 泥沙淤积对泄水底孔		1.3.2 水面减少所产生的影响	8

第二章 水库淤积的物理过程

2.1 引 言	9	2.4.1 风的作用	16
2.2 供沙特性	10	2.4.2 太 阳 热	20
2.3 河流蓄水对地貌的影响	13	2.4.3 河道入流	20
2.3.1 水库上游的淤积	14	2.5 湖底淤积物地形	25
2.3.2 水库下游的刷深	15	2.6 岸边线侵蚀	27
2.4 水库内泥沙的运动	16		

第三章 现场测量

3.1 湖泊和水库的泥沙输入量和输出量 的现场测量	33	3.2.3 遥感技术的应用	40
3.2 淤积速率	35	3.3 泥沙密度	41
3.2.1 观测方法	35	3.4 粒 径	42
3.2.2 泥沙沉积年代的确定	39	3.5 水 流	43
		3.6 入流在水库的停留时间	44

第四章 保持库容的方法

4.1 减少水库淤积的方法	50	4.1.2 利用植被网截留泥沙	53
4.1.1 利用水土保持以减少 进库泥沙	50	4.1.3 高含沙水流的旁泄	57
		4.2 增大利用水流排沙的方法	60

4.2.1 洪水期间的流量调节	60	4.4 蓄水库容的恢复	112
4.2.2 库水位降低冲沙	77	4.4.1 淤积泥沙的冲刷	112
4.2.3 异重流排沙	90	4.4.2 疏 浚	114
4.3 底孔建筑物	104	4.4.3 虹 吸	117

第五章 预报方法

5.1 预报的目标和范围	130	5.2.2 水库泥沙淤积的数学模拟	139
5.1.1 目 标	130	5.3 库容恢复和保持的预报	146
5.1.2 根据水库泥沙淤积预报 确定工程决策	132	5.3.1 水库放空和冲沙的 非恒定流模型	146
5.1.3 预报的概率特性	135	5.3.2 溯源冲刷	148
5.2 水库淤积预报	136	5.3.3 异重流排放	149
5.2.1 经验方法	136	5.4 下游冲刷的预报	155

第六章 结论与建议

6.1 水库淤积产生影响的估计	164	6.4 维持库容的方法	166
6.1.1 物理和生态方面的影响	164	6.4.1 减少水库泥沙的技术	166
6.1.2 对结构安全的影响	164	6.4.2 水库减淤措施	166
6.1.3 社会和经济的影响	164	6.4.3 损失库容的恢复	166
6.2 对物理现象的认识	165	6.5 预报方法	167
6.2.1 泥沙淤积的物理过程	165	6.5.1 预报的目标	167
6.2.2 泥沙沉积物的性质	165	6.5.2 不确定性及灵敏度分析	167
6.3 测量与水库调查	165	6.5.3 预报的经验方法	167
6.3.1 泥沙测量	165	6.5.4 水库淤积的数学模拟	167
6.3.2 水库调查	165	6.5.5 恢复库容措施效率的估计	168
6.3.3 测量技术	165	6.5.6 坝下游冲刷的预报	168
6.3.4 确定淤沙龄期	165	6.6 对今后工作的建议	168
6.3.5 水库中水流	166		

附录: A: 从放射性同位素数据测定泥沙淤积率	170
-------------------------------	-----

绪 论

报告范围

本报告中介绍的对水库淤积的计算是水库工程规划、设计和运行期间进行预报的一种工具。因为有确定的工程目的，计算要求所有预报目标都有清楚的介绍和说明，即：预报目标具有哪些技术和经济上的重要性，哪些物理现象应该模拟，根据预报应规划哪些工程措施以及可进行哪种现场测量以支持计算。

由此看来，本报告涉及范围比题目稍微要宽些，除了对计算方法进行评述之外，报告也考虑到水库淤积的其它方面，而这些情况从工程观点看是重要的。因此，在第一章对水库淤积在技术、社会经济方面产生的影响进行了讨论。第二章则叙述了与湖泊、水库淤积有关的一些物理现象。第三章对测量方法和仪器设备作了评述。第四章详细介绍保持有效库容以及恢复库容的方法。第五章在上述几章的基础上介绍几种主要的工程预报方法。最后，报告的主要结论在第六章予以总结，其中包括在IHP（国际水文计划）第三阶段划期间继续开展一些学术性活动的建议。

由于时间和资料的限制，本报告不可能包括湖泊、水库泥沙淤积各种各样的问题。人工水库淤积产生的工程影响远远超过天然湖泊，所以本报告重点放在水库淤积问题方面。此外，本报告主要涉及到深水水库淤积问题，而对浅水蓄水库论及较少，对这些浅水库众多的物理和生态过程，也未在本报告中予以讨论。然而，本报告建议在IHP下一阶段计划中把浅水蓄水水库列为一个专门报告的主题。

编写报告所采用的方法

考虑到预先确定的一些局限性，作者根据下述原则从实际出发编辑了本报告：

——作者们在编写报告初稿时，没有企图引用所有的参考文献，只用了他们手头的资料。

在扩大报告所需的资料方面，法国电力公司文献服务处给予了大力协助。国际水资源管理培训中心还将其收集的资料交给作者们自由选用。

——报告由作者负责。

这一原则是根据在会上对每一章节进行讨论，并把初稿在付印前交全体作者们传阅来实现的。

报告在第二次河流泥沙国际学术讨论会（1983年10月11—16日于中国南京召开）上作了最后一次修改。

——初步报告截止日期是1983年10月，最终报告的截止日期是1983年12月。

作者们认为，水库泥沙淤积这一课题需要赶快行动，这个报告仅是进一步行动的基础，而不求作为课题的定论，更为重要的是及时准备好报告，而不要因扩充和润饰报告内容而贻误出版，

第一章 水库淤积在技术和经济方面的影响

(法国) J. Evrard

水资源的管理常常需要建造大坝以控制河水流量的分布不均。建造一座水库会严重影响社会和经济环境,甚至在水库给人们带来效益之前就会使人们感到这种影响。

根据大坝的用途,工程效益可以因地点和时间而有所不同。比如,水电工程的效益在工程完成之后很快就可以显示出来。但这种效益不在坝址现场,因为电力要输送到电网系统。相反,灌溉工程的效益却需经过一段时间开发农田的潜力发挥出来之后才能在当地显示出来。

挟沙河流上的水库会逐渐淤积起来,虽然过程可能经历很长一段时间。因此应特别注意,在没有充分获得水库效益之前,不要使水库淤塞。如果不能预测水库泥沙淤积,也不采取措施防止泥沙淤积或使泥沙淤积的影响减轻到一个可接受的水平,对于决策者来说则是一个极大的错误。如果轻视这方面的工作,将来就要付出昂贵的代价,因为可使用的水资源相当有限,而且一个流域内在经济上合适的水库库址也是很有限的。

1.1 物理和生物方面的影响

在河谷内建坝会引起:

- 河水流量过程的变化;
- 库区河槽形态的变化;
- 输沙能力的明显变化。

如果一部份河水为工程所引走,则下游流量就会减少。

由于流域的整体性,某一河段的改变特别是泥沙输移及其影响,总会在一定程度上影响整个流域。

1.1.1 对水库的影响

拦河蓄水,过流断面加大,水流速度减小,从而导致输沙能力减小。输沙能力的减小会引起泥沙沉积,其后果如何则取决于沉积泥沙的粒径、形状和沉积部位。沉积过程的机理详见本书第二章,现概述如下:

较粗颗粒最先沉积,在水库的上游端附近形成水下三角州,其形状和发展趋势取决于水流流态及库水位的变化情况。水下三角州使原始河床上升,除了减少有效库容以外,这还可能减少桥下的净空,给水上通航造成危害。它也可能使洪水期水位上升,使河边土地淹没,特别是在显露的沙质河滩被耕种或长满灌木丛的情况下更是如此。

水下三角州的形成更深一步的影响是提高地下水水位,形成沼泽地。

较细的泥沙被水流带入水库,并根据水流流速和风生流或热力流的大小而沉积在水库底部。这些细颗粒泥沙会漂散到沿岸或近岸地区,粉沙或淤泥又会不断地从这些地区被带

到大坝处，并在那里累积起来，在某些情况下形成真正的泥湖。

沉积下来的细颗粒泥沙可能影响水库的有效库容和死库容。

在沿岸地区、小湾和浅滩的底部会明显升高，因而可能招致水生物的发展。而水生物的发展又可能加速淤积的粉沙和淤泥的固结过程。如果这些淤积物长时间露出水面，就可能会变干并被风蚀。

在较深的近岸地区，如不采取一些冲沙措施，淤积泥沙会不断固结，渐渐填满死库容。

淤积的后果如何，取决于河流进水的位置与建筑物位置的关系。很明显，应认真控制靠近进水口的支流的进入。

除了考虑泥沙输移以外，还需考虑因波浪作用和库水位变动引起的岸边侵蚀所带来的影响。

1. 1. 2 对水库上游河段的影响

水库中的泥沙沉积物会引起河床上升，并向上游方面延伸。此现象所引起的后果类似前面提到的水库上游端三角洲形成后所产生的后果，即形成河道游荡、河边土地淹没、桥下净空减小等等。

另一方面，如果在流域内广泛采取控制泥沙的方法，如水土保持、建造集沙坑等等，在保护工程的下游其挟沙能力增加会引起冲刷。但这一般不能平衡水库水位抬高的作用。

1. 1. 3 对大坝下游河段的影响

由于大坝或多或少地拦截了河流一部份泥沙，而且拦截水库中的大部分粗颗粒泥沙，改变了泄放泥沙的粒径分布，下游河段强烈受到大坝的影响。

水库也改变了大坝下游水流流态，即使工程没有分流（即年流量保持不变）的情况下也是如此。在大多数情况下，水库可以削减中、小洪水的流量。如果大坝分导一部份流量的话，这种调节作用就更加明显。

(A) 对河流形态的影响

向坝下排泄经过调节的泥沙含量少的流量，将会引起河床冲刷。推移质将会往下游方向不断增加，直至输送能力和输沙量达到平衡状态为止。如不受到河底岩石的限制，坝下河底会出现刷深。较深的河槽将有利于洪水通过。但另一方面，坝下河底刷深也会带来一些不利的作用：

——刷深的河槽会影响河谷内的地下水位。如果地下水流向河流，则会降低地下水位；如果地下水来自河流，则会减少地下水的供水量。

——河底刷深会导致地下水的污染或增加河口附近土壤的含盐量。

——坝下河底刷深会破坏建筑物和淘刷河岸。

如果大坝分导一部份流量，因为泄放的流量较小，可减少冲刷作用。

如果从大坝把大量的泥沙随水流一起泄放到下游，泄放的水流会成为饱和的含沙水流。这样，河流的冲刷能力就会降低，泥沙沉积物也会在坝下游出现。导致河床高程抬高，从而影响洪水的通过并使河流弯曲。

用数学模型可以研究工程对河流形态的影响，也可以用数学模型模拟下游河道。使用这类数学模型，可以确定建造必要的保护工程和制定操作制度。

用水库来减少中、小洪水流量并拦截河流中的大部份泥沙，阻止了放淤的可能性，即阻

止了将肥沃的泥沙引放到河谷的土地上。必须注意到沉积在河谷中的泥沙除了具有肥力以外，还可以防止由于耕种土地而增加的风蚀作用，因此有利于保护土壤。

(B) 湍急支流的影响

在湍急支流的交汇处，会出现锥形的粗颗粒沙堆，但在干流洪水期间，这些锥形沙堆会被洪水冲刷。因水库削减了中、小洪水的流量，会终止洪水冲刷锥形沙堆的作用。山溪的锥形沙堆可以阻碍河流中的水流，因而大洪水可以把河水推向对岸，甚至因河槽的这种阻碍而造成上游土地淹没。当阻碍物一旦冲破，巨大的水流突然地泄往下游河段，给下游河段带来危害。

这些问题可以在各支流流域采取控制冲刷措施和建造截沙坑而加以解决。在用上述措施控制急湍流之前，应采用适当堤防系统将交汇处的急流导向下游。

(C) 砾石采石场的影响

水库阻挡了部份或几乎全部粗颗粒泥沙，从而切断了用作建筑材料的砾石层的补给。

因此，应制定一项管理砾石场的政策，以防止砾石料过早地被消耗完。应鼓励在大坝上游——即水库上游端附近的三角洲地带采集砾石料。过多地挖掘砾石层会使地下水位线下降。而毫无控制地采集砾石还会在大洪水期破坏河槽的稳定性。

当下泄的水量由于分流而减少时，问题会更加严重，若洪水通过滩地则有助于开辟砾石场。

(D) 对河口的影响

减少泥沙输移破坏了河口泥沙的平衡状态，特别在三角洲地区更是如此。因潮流和波浪作用而引起的海岸冲刷，不再从河流挟带来的泥沙沉积得到补给，而且肥沃的农田会因岸滩冲蚀而缩小，甚至完全消失。

由于洪水时的非饱和挟沙水流有很大的冲刷能力，大洪水会突然地完成水流冲蚀岸的作用，如果水库靠近河口地区此现象尤为明显。洪水流量还可以加剧沿岸环流的发展，从而可能加强泥沙的沿岸输移。

当这些问题给人们带来不可容忍的危害时，可以用适当的防护建筑物（如堤坝、防波堤，丁坝等）加以补救，不过这些建筑物很费钱，必须在数学或物理模型的基础上明确使用目的后，由专家进行设计。

(E) 排沙影响

结合下列工作，把淤泥排放到大坝下游河段：

——维修：水库定期排空（因为并非所有时间都可以进行水下检查），修理，定期试验闸门等。

——水库运行：泄洪等。

——经济目的：用水排沙以保持库容，疏浚、虹吸排泥等特殊操作规则的应用等。

不管在什么情况下，即使在不需要排放的情况下，总是要往下游排泥的。在清库操作结束水库排空时，河流切割淤泥河床，直至河床降到原有高程为止。这时淤泥滩地被排干，大断面淤泥坍塌。应注意到，露出水面的河岸的坍塌角度较之淹没河岸的坍塌角度要小。因此，库水泄空后会增加滑坡。在排淤的情况下，可有意识地将表层及底层水混合以减少不良后果。

随水排放的泥沙含量可以造成不可补救的危害。这种排放泥沙按颗粒大小沉积下来——

最粗颗粒的泥沙在靠近大坝处沉积下来，较细的泥沙在更下游的河段沉积下来，形成沙洲粉沙洲，最后形成粉沙浅滩。这些沉积泥沙可以改变河床的坡度并阻碍水流。这样就会妨碍洪水通过并造成岸边土地的淹没。河床泥沙颗粒分布改变后可能妨碍开采砾石。河床淤积会堵塞河床并妨碍河水渗入地下，这些都会给农业带来严重危害。最后一点是，排出的淤泥对环境是会有害的。这些问题在下面几节将予以讨论。

由于上述这些原因，有必要研究一下排淤泥的条件。研究内容包括：

——研究流域地质条件以确定泥沙特性。同时把类似地区加以比较，有助于估计泥沙沉积物的流变特性。

——研究河床形态和水库操作的有关问题。

1. 1. 4 泥沙对水生物的影响

泥沙是影响水生物的一个因素。水生物的特别依赖于阳光辐射（决定光合作用）所传递的能通量和有机物质的再循环。水中的阳光透入量取决于水的透明度，因此也就取决于悬移质的浓度。

有机物质的循环与水库中输移物质及泥沙沉积物的特性特别有关。这些泥沙沉积物主要由流域流失的土壤所组成的，又加入了人类活动所产生的各种物质。

这些物质来自：

——地表径流，过量的自流灌溉条件下淋洗被灌溉土壤的过滤。这种物质含有堆肥和粪便一类的有机肥料，但多数情况下是含有氨基或磷基的化肥。另外，还含有杀虫剂和除草剂，杀菌剂等一类的有毒物质。

——未处理的或未很好处理的城市和工业废水。这些废水不但含有有机物质，还含有铬、镉、水银等类有毒的重金属盐。

不能排除一些物质之间的叠加作用，在泥沙中已发现这些物质中的某些物质有选择性地聚积在一起。通过营养循环过程，发现它们浓度增加。其结果是，有些有毒物质，实际上在水中探测不出来，可以在泥沙中发现有相当多的这种物质，以致严重危害较高级的生物体。

除了这些直接作用之外，这些物质对生物群还有间接的影响。它们通过对“化学远距催化剂”的作用，可以影响生物活动。上述的“化学远距催化剂”通过活性有机体合成，从而控制活性有机体的营养、繁殖和活动性等重要特性。

总之，坝本身并不是主动的污染因素。但是，由于拦截泥沙及其伴随的营养物质，坝可以引起某些现象，须进行下列适当的研究工作以弄清这种现象的影响：

——对河流进行水文调查或评价。

——生物污染指标的检测，必要时检测聚集在水底或水层内营养循环中的有毒物质。

——用数学模型对生态系统的进化进行预测。这些数学模型建立在生物发展规律和流体力学规律的基础之上，看来很有前途，尽管它们的发展还会遇到一些困难。

这些研究项目与泥沙淤积的水力学模型结合进行，可以改善水库设计工作从而消除或减少水库所带来的不利影响。

(A) 对水库中的生物的影响

悬移物质会限制叶绿素活动，从而导致浮游植物产量的减少以及营养循环的减弱。

在沿岸地区，太阳辐射线可穿透水体，在那里，泥沙是水生植物生长的根基；在浅水

区，这类水生植物主要由灯芯草，芦苇等组成；海藻则生长在气候条件及水位变化合适的较深的水域中。库水中的营养物含量越高，水生植物的长势就越好。

芦苇和水下海藻生长的地方为水底生物提供了栖居的地方，从而为饲养鱼类提供了有利的生活环境。

在近岸深水区，几乎没有阳光穿透。在那里不生长水生植物，聚积下来的沉积物一般呈季节性分层状态。有机物质，特别是很快分解的藻类和植物，可以造成水中缺氧，形成厌氧微生物的生长条件。细菌矿化作用被遏止（特别是在水和泥的交界面上），水库底部即出现腐烂发酵，以致不宜于生命的存在。

另外，由于泥沙沉积物覆盖了鱼类的产卵场地，因而阻碍了在砾石滩产卵的鱼类的繁殖。

水流从激流条件过渡到死水条件的过程中，在失去营养成分的情况下，可以给水生物造成深刻的变化，其结果使鱼类的数目大大减少。就鱼类的生产能力及质量而言，这种减少有时可以用适当的管理措施和喂养措施加以解决。

（B）对水库上游水生物的影响

水库泥沙淤积对上游河段的影响一般来说是有限的。

水库上游端河床高程的提高一般会导致形成砾石滩并引起河道分叉，这样就为鱼类产卵造成了一个有利的环境。不过，由于水库内大面积的产卵场地覆盖着淤泥，加之水库水位变化，有些鱼种向支流迁移，从而造成支流下游段鱼类总数出现暂时性过多现象。这就会使鱼类食物供给不足，引起大鱼吃小鱼的现象，从而影响鱼类繁殖率。

（C）对大坝下游河段水生物的影响

不论采取何种预防措施，水库中总会沉积数量可观的冲刷产物，而且，在泥沙聚集过程中，也会聚积相当数量的营养物。对坝下游段的影响程度取决于水库的操作使用方式。

水库在正常运行的情况下，当水流从取水建筑物泄放时，水中只会有溶解的固体，实际上没有悬浮泥沙。这就导致下游河道中的生物群减少，有时影响到河口。如果一部份流量被分流，这种现象会更加恶化。

生物群的减少会引起鱼类繁殖率的下降，尽管在有些情况下，这个问题可以通过施放鱼苗加以补救。

当打开底孔泄洪、冲沙或清库等例外情况时，大量泥沙沉积物被冲刷，泄水中出现比正常情况要高出许多的高含沙量混浊水流，其对生物群的影响程度取决于泄放水的物理化学特性，也取决于库水泄放的条件。

如果被排放的淤泥不含有毒物质，淤泥所造成的污染只是机械性的污染，但会造成较敏感鱼类鱼鳃受淤泥堵塞而死亡，并且可以因泥沙复盖砾石沙洲而破坏鱼类产卵场地。然而，这种污染的影响是暂时的，不会带来永久性的不良后果。

含有大量有害物质的腐烂性淤泥给鱼类带来的致命性危害要大的多。深水鱼类会被大量杀死并在很长的时间内造成鱼类不平衡状态。

如果不考虑下游河段的输沙能力而盲目泄放泥沙，其后果则特别严重——有毒淤泥的沙洲和浅滩，使大面积河段变成不能产鱼之地。

因此须事先仔细地研究泄放泥沙所带来的影响。必须有计划地控制泄放频率，同时要考

虑生物群的生物循环, 尽量减少不利影响。这类研究应包括进行下游段的观测, 必要时还要对河口进行观测, 因为突如其来的大量淤泥会对海洋环境带来严重影响。

最后, 应强调指出, 向下游段泄泥是不可避免的, 但流域内泥沙流失是可以防止的。社会必须在人造财富的维护和他继承的自然遗产之间权衡利弊。就水库工程本身来说, 必须制订出可以普遍接受的给河流中的生物带来最小影响的水库运行办法。必要时水库工程还须增加补救措施的费用。

1. 2 对工程安全的影响

泥沙沉积物会影响坝的安全。

1. 2. 1 泥沙淤积对泄水底孔的影响

泥沙沉积的最大危害之一是伴有缠绕着树枝和沉没的碎物的泥沙沉积物阻塞泄水底孔, 也可能完全堵塞泄水底孔。为此, 水库必须有时偶尔泄空。因此, 在工程规划时, 应设计一些设施, 在适当地点通过适当尺寸的闸门泄放漂浮物。泄水底孔管道必须顺直, 而且有足够的尺寸, 并由闸门控制水流的通过。

建议在水库蓄水以前, 库区的树木应当砍伐清除掉。

1. 2. 2 对闸门和阀门的影响

当泄水底孔泄放高速水流 ($>40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时, 会同时出现空化、水流引起的振动及泥沙颗粒的磨损作用, 以致影响建筑物、衬砌层、混凝土表面, 尤其影响护坦的安全, 如果泥沙含有坚硬的矿物质, 则磨损情况更为严重。

由于位移和减压而使淤泥释放出来的气体, 特别是硫化氧气体, 会腐蚀闸门及闸室内的金属部件。

1. 2. 3 对坝的影响

在大坝的结构设计中, 应考虑由于泥沙沉积作用于坝的压力。

另外, 要确保建筑物的设计特性不因混凝土的变质而发生变化, 这是很重要的。同时必须考虑泥沙沉积物中的化学反应, 特别是与硫循环有关的泥沙沉积物以及水的腐蚀程度引起的化学反应。此外, 在设计中, 混凝土、浇筑混凝土技术及坝表面衬砌等问题应予以考虑。

1. 2. 4 对大坝监测的影响

泥沙沉积物会影响坝的监测。这些沉积物会妨碍水下监测手段的使用, 如潜水器、潜水员、水下电视等。即使库水放干后, 因为坝表面复盖了淤泥, 也妨碍视觉观测, 同时也不可能从水库一边进行观测。

1. 3 在经济和社会方面的影响

1. 3. 1 库容减少所引起的后果

水库泥沙淤积对工程的社会和经济目的所产生的影响决定于沉积物的规模及其特性。其后果很复杂, 因为大坝通常有多种用途, 而且随着年月的推移, 这些用途也会发展变化。

沉积泥沙影响水库的蓄水库容, 而蓄水库容则是水库的主要价值所在。库容的损失对能源生产, 民用水, 工业用水, 农业用给水以及流量控制等方面的影响特别大。泥沙沉积会减少

水深并促进水生物的生长，因而也会影响水库的表面积。有时这也会影响水库在娱乐（钓鱼、打猎），消防及公共卫生健康等活动方面的作用。

（A）对能源生产的影响

水力发电厂由于操作灵活机动，可以提供调峰的电力。可以说，水库是一个蓄能器，其蓄水容量愈大，效率也就愈大。因此，如果其库容减少，就会减少有关电厂的电能出力，并在进水不足时，在耗能最危急期间降低可用的最大功率。

（B）对农业用水和工业用水的影响

如果水力发电可以由其它方法代替的话，灌溉用水却无法代替。虽然最有效的灌溉技术可以节约水量，但没有水就不能灌溉。因此，泥沙淤积对于为农业服务的水库较之用于水力发电的水库，其危害性更大。

一个设计很好的灌溉工程对农业生产所带来的影响常常是引人注目的。在某些气候条件下，灌溉是作物生长的必须条件。蓄水量的损失会导致供水短缺，乃至造成灾难性的后果，因为缺水会引起为之辛劳一年的庄稼歉收。

水库截沙会引起坝下游河床加深，使供水系统进水口露出水面，这就需要重建进水系统，继续为灌溉服务。

工业是用水大户，水主要用于工业生产过程或用于冷却。工业用水短缺的补救很昂贵，但比起农业用水来说，这种损失是短暂的。

由于泄洪、冲沙及放空水库等原因，泥沙泄放至下游河段会造成各种不同的害处：泥沙在供水管道中沉积；阻碍灌溉喷头的正常工作；阻塞工厂热交换器；影响废水处理厂的正常运行；使水果生长斑点，因而减少水果的商品价值等等。

（C）对流量调节的影响

水库蓄水容量的减少也影响低水期调节流量，这会影响环境保护、工业或农业生产及时的供水能力。

对于防洪水库来说，因为生活在大坝下游、洪泛平原上的居民相信有大坝保护，常常忽视其它防洪措施，因此库容损失会带来更严重的后果。

1. 3. 2 水面减少所产生的影响

由于泥沙沉积物露出水面，加之浅水区水草不断生长，导致水面减少。

（A）对划船、航行及其它户外运动的影响

泥沙沉积及水草生长可能阻碍船舶行驶接近停泊处。

淤泥对于可供游泳和其它水上运动的岸滩来说，是一个十分讨厌的问题。

另一方面，水生植物是鸟类和其它水生物的良好天然保护场所，因而深受渔民和猎人欢迎。

（B）对消防的影响

大型水库很适合水上飞机进行再补给活动，一些国家使用水上飞机进行消防。自由水面的大量减少则会影响飞机的活动。

（C）对公共卫生健康的影响

水库岸边生长的植物既可为动物提供保护场所又有利于昆虫繁殖，只是昆虫令人难忍的叮咬就会使人们不愿意到那里去。更严重的是昆虫传布疟疾，盘尾丝虫病及黄热病等疾病，这会给人类带来危害。

第二章 水库淤积的物理过程

(英国) J. McManus

2.1 引言

从地貌学的观点看,滞洪或蓄水水库可在两种条件下形成,或利用原有的湖泊,或在河谷蓄水。每一座水库有由其原先状态决定的地貌;而流域形状、水循环和供沙条件,强有力地控制着流域内的淤积性质和淤填速度。

按照 Hutchinson 的观点(1957),自然湖泊的形成有十一种主要过程,包括从地面剥蚀直到因滑坡等而引起的排水道堵塞等成因。在已有的七十六种湖泊中,极少数适合进行人工扩大,多数则是季节性的、很不稳定的、或几乎没有河水入流的湖(例如咸水湖、冰坝湖、火山口湖)。大体上,起源于河流或冰川作用的湖泊,近海的湖泊,或由相当大的滑坡形成的湖泊,都能满足建造水库的要求。

在湖泊出口由于升高形成的天然坝或原有的人工坝而形成的水库,具有原有的水循环条件、供沙条件以及地貌条件,不过由于新近的充水边缘区域的作用而受到一些物理影响。

人们发现,河系是经过一系列可预测的演变而不断发展起来的。具有最早期发展阶段特征的狭窄、弯曲和陡坡的河谷,逐渐发展成较开阔的缓坡河谷,沿滩地有冲积台地。最后,河谷变得很平坦,地形起伏也急剧减小。这样一个过程需要数百万年的发展时间,而在一个流域范围内,较成熟的壮年期的特征首先显示于下游段,而幼年期的大起伏地形则长期存在于上游河段。

所以,发展中的河谷,在地点和时间两方面,是否适合建造水库,其可能性是不断变化的。深、窄、弯曲的水库具有上游地区和“幼年”期的特征,浅而宽广的水库则出现在具有较成熟的“壮年”期的特征的下游段。

在河流上拦河建坝或原有湖泊出口处的上升,会导致一块原已处于准稳定态的地面浸没于蓄水位之下。洪水淹没区有这样的特点,即它起初可控制受淹没地带的水循环和泥沙分布形式,但随着泥沙淤积的发展,这种控制能力会急剧减小。蓄水对于入流河道成为临时基准面,而入流河流中的泥沙则沉于相对静止的水域中,由于回水的影响,造成水库上游河槽淤塞以及易受洪水威胁的面积扩大,另外水道的航运条件也因之恶化。坝下泄水挟带的悬沙相对减少,除非有控制地泄放挟沙水流,否则初期河床会刷深。细颗粒从河床上冲走,直到河槽稳定而有粗化层的河床,并获得一个新调整的比降。

两种不同的成因造成两种根本不同形式的蓄水区。在“洪泛河谷”水库中,蓄水区的最深部分逐渐斜倾向坝前,且其死库容面积由坝的形状及出口泄水道决定。在“开扩湖泊”水库中,天然湖底坡度向离开坝址的方向下倾,其死库容面积可包括与坝分隔开的那些深坑。

尽管两种蓄水形式都与作用于水柱的主要物理过程相对应,比如风浪引起的环流的生成、水温分层现象、湖面假潮的发展、入流河道的泥沙羽流(Sly, 1978);但高度混浊的入流分布形态却会有显著差异。在“洪泛河谷”水库,高密度水流经过全库底,在坝的背面造成淤积(Gould, 1960; Lara 和 Sanders, 1970);在“开扩湖泊”水库,这样的水流可以进入主要的或次要的深坑,而其携带的泥沙则留在与坝相距很远的死库容内。

2.2 供沙特性

水库的来水量主要由气候条件决定,但地势、植被、耕耘活动以及基岩特性也是重要因素。来水流量的增减还随流域内的降雨或融雪而变化,峰、谷之间的相互间隔可以是数小时或数天,但无论是在温带、热带或极地,都属于一般的季节变化类型。

尽管卵石和粗沙沿河床滚动或滑动或跳起呈跃移状态,而细沙、粉沙和粘土则是靠水的天然紊动性悬浮挟运于整个水体之中。在大洪水时粗粒河床质是可动的,但在较小流量时最大颗粒仍保持不动,只有较细颗粒沿底运动。当流速低于当地临界值时没有底沙运动,固体颗粒仅以悬沙状态输移。

水流输沙量的估算是水利工程师长期面临的一个复杂问题,他们曾提出过使人感到迷惑的多种简化估算输沙量的方法和公式(Graf, 1971; Yalin, 1972; Bogardi, 1974; Vanoni, 1975)。与输沙量有关的参变量包括河床坡降、剪应力、流量、流速、紊动强度、流体温度、颗粒大小和河床轮廓。不存在可把这些参变量都考虑进去的简单通用公式。尽管如此,按照各家的研究可认为,当通过某处的流量减小时,水流的挟带能量也减小,相应输沙能力也降低,泥沙就淤积下来,使河床淤高,对水流引起较高的阻力,从而进一步减小流速和泥沙输送能力。

冲泻质中的细粉沙和粘土保持在水体中流向水库。细颗粒具有低的沉速,由于水流紊动而保持悬移状态。较粗颗粒只有在水流或河床剪力超过当地起动值时才发生运动,而很细颗粒泥沙无论何时只要水在动它就随之而动。悬移质含沙浓度始终随流量而变化。实际的含沙浓度大小,取决于降水强度及土壤可被挟运的程度。在干燥地区长时间间隔的暴雨能产生泥流,但高含沙浓度($>200\text{kg/m}^3$)也能在湿润地区产生,在黄河流域有记录的泥流浓度达 1600kg/m^3 。一般说来,越是有洪水暴涨的河流悬沙量越高。

在半干旱地区,流量和含沙量两者的峰值同时出现,而在较湿润地区,两者常是错开的。在某些流域,初冬时含沙量峰值先于流量峰值出现(Miller 和 Piest, 1960),但它随时间的推移而滞后,到了晚春和初夏,沙峰迟于洪峰出现(Walling 和 Gregory, 1970; Culbertson 等, 1972)。

当洪峰以波动速度流过一个流域时悬移质沙峰却随较低的水流速度运动,因此在任何一个流域两个峰值的相对到达时间改变了(图2-1)。这样,进入任何一个水库的悬移质峰值有时先于洪峰,有时与洪峰同步,也有时滞后于洪峰。在流域下游的水库,悬移质沙峰通常是跟在洪峰后面的,而在流域上游的水库,悬移质沙峰常先于洪峰到达。

一条河流输送冲泻质和河床质颗粒的能力随季节变化,因为水流挟带泥沙颗粒是由水流剪应力所引起的。大流量情况下较之小流量时有更多沙粒从河底升起(Herb, 1980)(图2-2)。