

多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计

张金良^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要:针对多沙河流水库运行过程中由于入库含沙量较高,库区往往会发生严重泥沙淤积而侵占水库有效库容,造成水库使用年限降低、损害水库综合效益发挥等问题,为保障多沙河流水库库容充足和长效运行,通过分析水库拦沙期和正常运用期内库区泥沙冲淤变化规律,发现多沙河流水库库区存在高滩深槽、高滩中槽、高滩高槽3种泥沙淤积形态,提出了多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计方法和“深槽调沙、中槽兴利、高槽调洪”的库容分布模式,以及以高滩高槽淤积形态为下边界的防洪高水位、校核洪水位、移民水位等特征水位设计新方法。

关键词:多沙河流;淤积形态;库容分布;特征水位;耦合设计;古贤水库;东庄水库

中图分类号:TV145;TV62 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)04-0045-06

Coupling design for sedimentation pattern and storage capacity distribution of reservoirs in sediment-laden rivers//ZHANG Jinliang^{1,2} (1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, MWR (under construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Due to the high sediment content in the operation of the reservoirs in sediment-laden rivers, the effective reservoir storage capacity is often occupied by serious sediment deposition, which leads to the reduction of the service life of the reservoir and the damage to the comprehensive benefit of the reservoir. In order to ensure the sufficient and long-term operation of the sediment laden river reservoirs, three sediment deposition patterns for sediment laden river reservoirs were revealed based on the changes in sediment erosion and deposition during the sediment retention period and normal operation period of the reservoirs, including high beach with deep channel, middle channel and high channel. A coupling design method between the sediment deposition patterns and the storage capacity distribution in the sediment-laden river reservoirs was proposed. The storage capacity distribution model of deep channel for sediment regulation, middle channel for profit promotion, and high channel for flood regulation was established. A new design method of flood control high water level, check flood level and migration level is developed based on the siltation form of high beach and high channel.

Key words: sediment-laden river; sedimentation pattern; storage capacity distribution; characteristic water level; coupling design; Guxian Reservoir; Dongzhuang Reservoir

受季风气候影响,我国水资源时空分布不均,北方地区水资源匮乏,水土流失严重,泥沙问题突出,生态环境脆弱,发展水平不高,建设重大水库工程是协调水沙关系和人水关系、实现区域生态保护和高质量发展的重要基础措施^[1-3]。水库库容作为河流水库工程规划设计的关键性指标,是确定主要水工建筑物尺寸及估算工程效益的基本依据,对工程综合效益高低有直接影响。

库容设计一般受防洪、兴利、供水、拦沙以及回水淹没范围等多方需求的影响。其中,水库泥沙淤积不仅会造成库容损失,而且会引发淤积上延、水库

污染等诸多问题,是水库工程规划设计论证过程中需要重点关注的问题^[4-7]。水库建成蓄水以后,天然河流的水沙输移特性与河床形态的相对平衡状态将被破坏,随着库区水位壅高、水深增大,过水断面逐渐扩大,流速和挟沙能力沿程递减,泥沙从上游由粗到细沿程逐步分选淤积,在库区尾部形成泥沙淤积体并逐渐向坝前发展^[8]。泥沙淤积形态对水库库容分布及回水范围有显著影响,因此,库区泥沙淤积形态优化设计成为工程设计人员长期关注的问题^[9]。

围绕水库泥沙淤积形态类型及设计方法已开展了长期研究并取得了丰富的研究成果。研究表明,

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U22A20237)

作者简介:张金良(1963—),男,正高级工程师,博士,主要从事黄河流域重大水工程与水沙调控研究。E-mail:jlzhangyrec@126.com

泥沙淤积形态按纵向可分为三角洲、带状和椎体 3 种类型^[10],按横向可分为淤槽为主、淤滩为主、沿湿周淤积和淤积面水平抬高 4 种类型^[11-12],形态差异主要受库区地形条件、来水来沙条件、水库运用方式、水库泄流规模等因素影响。此外,已有研究基于实测资料分析提出了不同的淤积形态判别公式,如罗敏逊公式和焦恩泽公式等^[13]。针对水库泥沙淤积纵横剖面形态设计问题,研究人员围绕三角洲淤积河床纵剖面比降计算和造床流量河槽形态等问题进行了深入研究,针对性地提出了不同适用范围的计算方法和公式,如涂启华公式、王士强公式和姜乃森公式等^[1]。20 世纪 70 年代以后,随着泥沙运动基本理论不断成熟和泥沙数学模型的发展,采用数值模拟方法来预测水库淤积形态因具有适应性强、计算快、修改便捷等优点,逐渐被广泛采用^[14-18]。

长期以来,在进行水库泥沙淤积形态和拦沙库容设计时,尤其是对于少沙河流水库,往往只在水库死水位以下考虑泥沙淤积。与少沙河流水库不同,多沙河流水库由于入库来沙量大,在库区内部会产生严重的泥沙淤积问题。因此,多沙河流水库若只考虑死水位以下拦沙,不仅会折损水库使用年限和综合效益,甚至可能造成水库淤满报废。此外,为减小水库库区泥沙淤积并实现冲刷下游河床的目标,多沙河流水库在长期的运行实践过程中形成了调水调沙的水库运用模式^[19],水库需要设计一定的库容以满足调水调沙运行需求。然而,传统多沙河流水库库容以及特征水位的设计未考虑调水调沙期间泥沙冲淤的动态影响,而调水调沙会改变水库正常运行后库区内泥沙淤积形态,进而对防洪库容、兴利库容等水库特征库容分布设计产生影响,因此设计方法存在不合理之处。

水库淤积形态与库容分布二者之间是相互作用、相互影响的耦合关系,但目前对多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计尚未形成系统的技术方法。本文基于多年多沙河流水利工程的规划、设计和研究经验,提出了多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计方法,并成功应用于黄河古贤水库和泾河东庄水库等多沙河流水库工程。

1 耦合设计方法

1.1 库区泥沙淤积形态形成规律

多沙河流水库运用一般分为拦沙期和正常运用期两个阶段,其中拦沙期根据坝前淤积面高程和排沙底孔进口高程的关系可以分为拦沙初期和拦沙后期。具体而言,拦沙初期指坝前淤积面高程低于排沙底孔进口高程的阶段,库区存在异重流输沙过程,

形成三角洲淤积形态并逐步向坝前推进;拦沙后期指拦沙初期结束至拦沙库容淤满的阶段,库区水沙运动仍以异重流为主,三角洲顶点逐渐向坝前推移。拦沙库容淤满后即进入正常运用期,水库高水位蓄水运行时库区水沙主要呈现异重流输沙和壅水明流输沙两种情况,造成水库槽库容逐渐被淤积;若泄空水库排沙运行,库区内出现均匀明流输沙流态,以沿程冲刷和溯源冲刷的方式将淤积在槽库容的泥沙排出库外。

合理的水库泥沙淤积形态是保障防洪安全和综合效益发挥的基础和前提。水库运用过程中,水库淤积高程线若超过设计淤积高程线,将侵占防洪库容、兴利库容等,影响防洪、兴利等效益发挥。以黄河小浪底水库为例,根据小浪底水库设计方案,当 75.5 亿 m^3 拦沙库容淤满后,库区形成高滩深槽的淤积形态,水库防洪库容、兴利库容均以深槽淤积形态为河道边界进行库容分布设计。2003 年小浪底水库蓄水运用初期,由于水库壅水,库尾就出现了明显翘尾巴现象,侵占了部分有效库容,2004 年通过调水调沙优化才调整了库区淤积形态(图 1)。

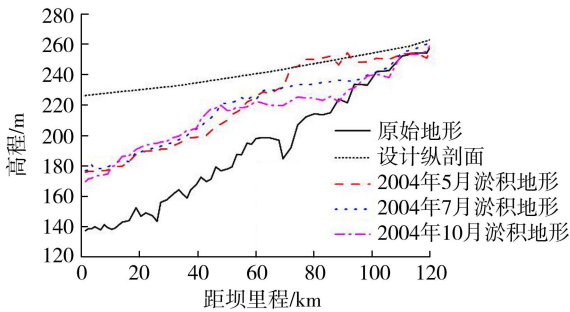


图 1 黄河小浪底水库库区淤积形态变化

多沙河流进入正常运用期后,由于水库来沙量大,库区还会发生不同程度的泥沙淤积且难以及时排沙出库,侵占部分防洪和兴利库容。当水库汛期遇到有利的大流量水流过程时,水库可敞泄排沙以冲刷年内其他时段淤积的泥沙,从而长期保持水库有效库容。因此,在水库工程规划设计过程中,若水库泥沙淤积形态考虑不充分,将影响水库防洪库容及特征水位、水库淹没范围等关键指标的设计,导致防洪库容和移民淹没范围设计偏小等问题,从而可能对工程周边人民的生命财产安全造成严重威胁。因此,基于库区泥沙动态淤积规律及黄河调水调沙实践经验,本文通过调研分析多沙河流水库淤积特点,充分考虑正常运用期库容泥沙冲淤动态变化,提出了多沙河流水库三槽淤积形态(高滩深槽、高滩中槽和高滩高槽)设计理念,如图 2 所示。

具体而言,高滩深槽指在水库正常运用期内,水库降至死水位排沙时形成的淤积形态,即坝前泥沙

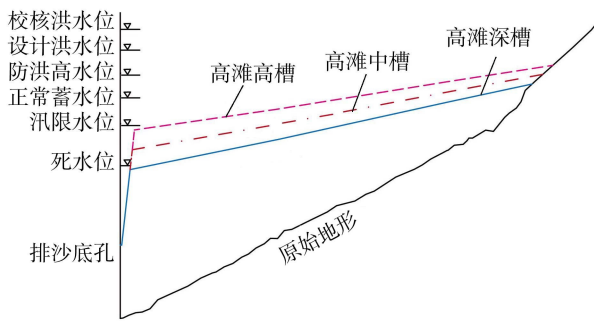


图2 多沙河流水库三槽淤积形态示意图

淤积高程与水库死水位基本持平,也即死库容淤满状态,此时槽库容空间范围内基本无泥沙淤积,是正常运用期内库区泥沙淤积的最低状态。高滩高槽是在水库正常运用期遇到入库水量少、沙量大的年份或者连续丰沙年,泥沙大量淤积在槽库容空间范围内,汛限水位以下的库容基本被泥沙全部淤满,且无法通过水库调度运用及时将淤积泥沙排出水库,此时坝前泥沙淤积体高程与水库汛限水位基本持平,是正常运用期所允许的水库淤积最不利形态。高滩中槽是水库调水调沙运用过程中在死水位与汛限水位之间形成的动态淤积形态,是介于高滩深槽和高滩高槽的中间形态,一般取为高滩深槽、高滩高槽的中间值。

1.2 库容配置模式

在进行多沙河流水库库容配置时需要充分考虑三槽淤积形态对水库防洪、兴利等方面的影响,提升水库综合效益。一般而言,多沙河流水库库容涉及拦沙库容、调水调沙库容、兴利库容、防洪库容、调洪库容等,与少沙河流水库相比,拦沙库容和调水调沙库容是多沙河流水库工程设计需要特殊考虑的。

拦沙库容通常是指水库正常运用后泥沙淤积平衡线以下的库容,是达到设计淤积形态平衡后的斜体淤积库容,主要由水库死水位决定,死水位越高,按相同的设计淤积形态水库的拦沙库容越大^[1]。

以防洪减淤为主要开发任务的水库,调水调沙库容设计在满足下游河道减淤和中水河槽长期维持的要求下,还要长期维持水库的有效库容;以兴利综合利用为主的水库,在设计调水调沙库容时还需要保证兴利库容不被泥沙淤积。具体来说,在水库拦沙期内,由于拦沙库容尚未淤满,调水调沙库容位于泥沙淤积体以上,水库汛限水位随泥沙淤积而进行动态调整,充分发挥水库效益;在水库正常运用期内,调水调沙库容在死水位以上、汛限水位以下,即在高滩深槽形态上进行设计,调水调沙库容为动态库容,允许泥沙淤积。

兴利库容是水库通过调节径流,在正常运行情况下,为满足兴利要求在供水期开始应蓄足的水量,

一般指死水位与正常蓄水位之间的库容。可见,对于多沙河流水库正常运用期而言,兴利库容包含了调水调沙库容。因此,在进行多沙河流水库兴利库容设计时,要充分考虑调水调沙库容内泥沙动态淤积对兴利库容的影响。由于水库正常运用期内,高滩深槽和高滩高槽是调水调沙库容内泥沙淤积形态变化的最低和最高地形边界,若以允许泥沙淤积空间的下边界为基础进行兴利库容设计会导致水库兴利效益折损。因而,兴利库容应以泥沙淤积的中间形态即高滩中槽为边界进行设计,以充分发挥水库兴利效益。此外,对于兼具供水功能的水库,兴利库容的设计需要考虑与供水区内调蓄工程进行联合调节。

根据下游河道防洪需求,多沙河流水库防洪库容应设计在库区泥沙淤积达到平衡后的汛限水位以上。由于水库正常运用期内可能出现高滩高槽的不利淤积形态,为确保防洪安全,多沙河流防洪库容应设计在高滩高槽以上。考虑防洪运用期间槽库容空间被完全淤满后,槽淤积面与滩地淤积面基本齐平,因此高槽的淤积比降与深槽保持一致,淤积高程与滩地淤积高程保持一致,淤积形态仍为椎体。一般情况下,少沙河流水库防洪库容与兴利库容不结合或部分结合,而多沙河流防洪库容一般是与兴利库容部分结合,在非汛期,兴利库容可以重复利用汛期预留的防洪和调洪库容。调洪库容指在汛限水位至校核洪水位之间的库容,位于调水调沙库容以上,包含了防洪库容。与防洪库容相同,调洪库容同样应以高滩高槽淤积形态为下边界进行设计。

因此,对于多沙河流水库淤沙形态与库容设计形成了“深槽调沙、中槽兴利、高槽调洪”的耦合设计理念,如图3所示。

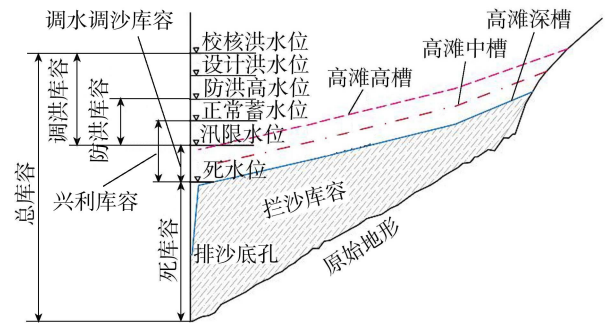


图3 多沙河流水库淤积形态与库容耦合设计示意图

1.3 特征水位论证

多沙河流水库特征水位包括起始运行水位、死水位、正常蓄水位、防洪特征水位及移民水位。

a. 起始运行水位是多沙河流水库特有的特征水位,是水库拦沙期汛期运用的最低水位。起始运行水位的确定受库区地形与库容分布特点、库区干

支流淤积量、淤积部位、淤积形态及起始运行水位下蓄水拦沙库容占总库容比例、水库下游河道减淤冲刷以及综合利用效益等多因素的影响,同时,还需要综合考虑水工建筑物优化布置,以保证发电水轮机组的良性运行和减少泄水建筑物的投资。

b. 死水位是水库正常运用情况下,允许消落的最低水位,是水库规划设计首先要确定的特征水位。对以防洪减淤为主的多沙河流水库而言,确定死水位时,应考虑充分发挥水库的拦沙减淤作用,在不影响上游重要对象的前提下,尽可能选择高的死水位。同时,死水位的设计也要满足水库排沙、防洪、调水调沙和兴利等综合利用要求。此外,死水位会影响高滩深槽淤积体纵剖面沿程的高程分布,因此,在设计过程中也需考虑其影响。

c. 正常蓄水位的设计应在充分发挥水库拦沙减淤效益的前提下,综合考虑水库非汛期的兴利要求、工程建设条件、淹没损失、淹没影响程度等因素。同时,由于多沙河流水库调水调沙运行过程中出现的三槽淤积形态会侵占部分兴利库容,因此,在正常蓄水位设计过程中应综合考虑三槽淤积形态的影响。

d. 防洪限制水位、防洪高水位、设计洪水位和校核洪水位统称为防洪特征水位,决定了调水调沙库容、防洪库容和调洪库容。由于在调水调沙过程中,库区会出现三槽淤积形态,而高滩高槽作为库区泥沙淤积的最不利形态对水库防洪安全影响显著,因此多沙河流水库防洪特征水位论证应基于高滩高槽淤积形态,以满足防洪安全需求。

e. 移民水位论证关系人民生命财产安全和工程投资,其受水库回水计算基底边界影响显著。现行设计规范关于移民水位计算基底边界标准不一,如 SL/T618—2021《水利水电工程可行性研究报告

编制规程》规定“提出不同淤积年限的库区淤积沿程分布,分析对回水的影响”、SL290—2009《水利水电工程建设征地移民安置规划设计规范》规定“回水计算需要考虑 10~30 年的泥沙淤积影响”等。对于多沙河流水库,考虑其入库泥沙量大且调水调沙运行需求会造成槽库容内泥沙淤积动态变化,多沙河流水库的移民水位应基于库区内最不利的泥沙淤积形态即高滩高槽进行设计论证,以避免移民水位设计不当所造成的不利影响。

2 应用实践

黄河古贤水库、泾河东庄水库年均入库含沙量分别为 28、140 kg/m³,属于高含沙量、超高含沙量河流水库工程,在水库规划设计过程中需妥善处理入库泥沙对古贤和东庄水库工程带来的不利影响,长期保持水库有效库容,实现水库长期有效运行和综合效益发挥。基于本文提出的多沙河流水库淤积形态与库容分布设计方法,同时考虑水库综合效益最大化,针对古贤和东庄水库工程三槽淤积形态、库容分布和特征水位进行设计论证。

2.1 三槽淤积形态

2.1.1 经验公式方法

根据库区地形特点和泥沙淤积规律,古贤和东庄水库库区可分为坝前段、中间段和尾部段 3 个库段。对影响库区淤积形态的各项参数进行深入论证分析,采用涂启华公式(式(1))计算高滩深槽和高滩高槽淤积形态的分段比降,并基于死水位和汛限水位确定各淤积形态沿程河底高程,结果如表 1 和图 4 所示。

$$i = K \frac{Q_{s,out}^{0.5} d_{50} n^2}{B^{0.5} h^{1.33}} \tag{1}$$

表 1 古贤和东庄水库三槽淤积形态设计

区段	比降/‰				河底高程/m			
	古贤水库		东庄水库		古贤水库		东庄水库	
	深槽	高槽	深槽	高槽	深槽	高槽	深槽	高槽
坝前段	0.17	0.12	0.25	0.15	584.50~594.70	600.50~607.70	753.50~761.50	777.50~782.30
中间段	0.21	0.14	0.31	0.16	594.70~607.30	607.70~616.10	761.50~775.14	782.30~789.34
尾部段	0.30	0.18	0.66	0.20	607.30~631.60	616.10~631.60	775.14~783.92	789.34~792.00

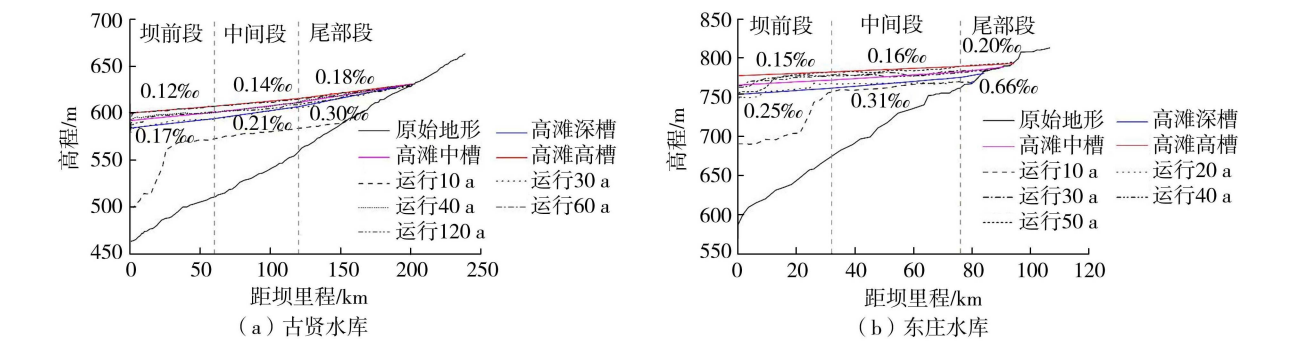


图 4 古贤和东庄水库库区淤积形态设计结果

式中: i 为淤积三角洲顶坡段比降; K 为平衡比降系数,与平均来沙系数成反比; B 、 h 分别为主汛期平滩流量对应的水面宽和平均水深,m; $Q_{s,out}$ 为主汛期平均出库输沙率,t/s; d_{50} 为汛期平均出库悬移质泥沙中值粒径,mm; n 为汛期平均糙率。

2.1.2 数值模拟方法

采用数值模拟方法^[20] 预测古贤和东庄水库不同运用期库区泥沙淤积形态,结果如图 4 所示。根据古贤水库可行性研究报告,古贤水库设计拦沙年限为 38 a,水库进入正常运用期后,库区深槽、高槽淤积平均比降分别为 0.229‰、0.152‰,与经验公式方法计算的 0.234‰、0.155‰基本一致。根据东庄水库设计方案,东庄水库设计拦沙年限为 30 a,水库进入正常运用期后,库区深槽、高槽淤积平均比降分别为 0.336‰、0.166‰,与经验公式方法计算的 0.341‰、0.162‰基本一致。经验公式方法计算的是一个区间的平均比降,而数值模拟方法可以计算出库区泥沙沿程淤积分布,并给出不同运用期的动态变化。总体来说,经验公式方法简单便捷且可以满足三槽淤积形态设计需求,数值模拟方法可以得到沿程泥沙淤积时空动态分布,具有更好的适应性。因此,多沙河流域泥沙淤积形态设计可以根据实际情况选择合适的方法,同时,可以采用两种方法互为验证。

2.2 库容分布与特征水位

黄河古贤水库运用以防洪减淤为主,同时兼顾供水灌溉和发电等综合利用需求。根据古贤水库开发功能及综合利用需求,古贤水库的库容分布设计如下:①根据水库死水位及淤积形态设计,在满足拦沙需求的前提下,古贤水库的死水位为 588 m,设计最大拦沙库容为 93.42 亿 m³,其中死水位以下为 60.50 亿 m³,死水位以上为 32.92 亿 m³。②根据调水调沙运用和防洪需求,古贤水库设计 20 亿 m³ 的调水调沙库容和 12 亿 m³ 的防洪库容;兴利库容设计在调水调沙库容以上,为 15 亿 m³;水库设计洪水标准为 1 000 年一遇,校核洪水标准为 5 000 年一遇,根据调洪计算成果,调洪库容为 17.77 亿 m³。③根据各库容大小,考虑库区地形和泥沙淤积形态,确定各特征水位,其中防洪高水位和校核洪水位以高滩高槽淤积形态为下边界进行设计。古贤水库的库容分布和特征水位设计结果如图 5(a)所示。

泾河东庄水库运用以防洪减淤为主,且兼顾供水、发电和改善生态等综合利用需求。根据东庄水库开发功能及综合利用需求,基于与古贤水库相同的库容分布和特征水位规划设计理念和方法,东庄水库的库容设计如下:最大拦沙库容为 20.53 亿 m³,其中

死水位以下原始库容为 14.30 亿 m³,调水调沙库容为 3.27 亿 m³,防洪库容为 4.30 亿 m³,兴利库容为 5.78 亿 m³,调洪库容为 7.78 亿 m³。依据库区原始地形和三槽淤积形态,推求东庄水库特征水位。东庄水库的库容分布和特征水位设计结果如图 5(b)所示。

I—总库容;Ⅱ—死库容;Ⅲ—调水调沙库容;Ⅳ—防洪库容;Ⅴ—兴利库容;Ⅵ—调洪库容;①—死水位(588.00 m/756.00 m);②—汛限水位(617.00 m/780.00 m);③—防洪高水位(625.50 m/796.22 m);④—正常蓄水位(627.00 m/789.00 m);⑤—设计洪水位(627.52 m/799.09 m);⑥—校核洪水位(628.75 m/803.15 m)(括号中数据分别为古贤水库和东庄水库水位)。

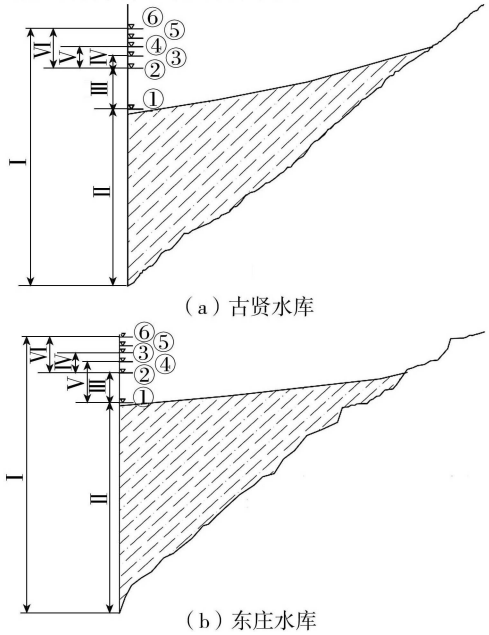


图 5 古贤和东庄水库容分布与特征水位设计结果

3 结 语

针对多沙河流域水库库容及特征水位传统设计方法未充分考虑库区内泥沙冲淤动态影响的问题,本文根据水库拦沙期和正常运用期调水调沙过程中库区泥沙冲淤变化规律,发现多沙河流域库区存在高滩深槽、高滩中槽、高滩高槽 3 种泥沙淤积形态,提出了完整的淤积形态设计方法。针对维持水库长期有效运行和提升综合效益等需求,提出了“深槽调沙、中槽兴利、高槽调洪”的库容分布模式和利用原则,实现了拦沙库容、调水调沙库容、兴利库容、防洪库容的分布与淤积形态耦合设计,弥补了传统设计方法的不足;同时,提出了以高滩高槽淤积形态为下边界设计防洪高水位、校核洪水位和移民水位的新方法,可为多沙河流域水库工程设计提供支撑。

参考文献:

[1] 张金良. 多沙河流域水利枢纽工程泥沙设计理论与关键技术[M]. 郑州:黄河水利出版社,2019.

- [2] 王宗志,谈丽婷,耿敏,等.考虑调水和供水规则的水库优化调度[J].水资源保护,2023,39(1):15-21. (WANG Zongzhi,TAN Liting,GENG Min,et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):15-21. (in Chinese))
- [3] 张金良,仝亮,王卿,等.黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J].水利水电科技进展,2022,42(2):41-49. (ZHANG Jinliang,TONG Liang,WANG Qing,et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):41-49. (in Chinese))
- [4] 马翠丽,张建,万占伟.水库泥沙淤积及其对工程运用的影响[J].河南水利与南水北调,2017(4):77-78. (MA Cuili,ZHANG Jian,WAN Zhanwei. Reservoir sediment deposition and its impact on engineering operation[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion,2017(4):77-78. (in Chinese))
- [5] 郅国明.小浪底水库耦合水电及下游冲淤的调度模型研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [6] 李立刚,陈洪伟,李占省,等.小浪底水库泥沙淤积特性及减淤运用方式探讨[J].人民黄河,2016,38(10):40-42. (LI Ligang,CHEN Hongwei,LI Zhansheng,et al. Discussion on the characteristics of sediment deposition and operation of sediment reduction of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River,2016,38(10):40-42. (in Chinese))
- [7] 张俊华,马怀宝,王婷,等.小浪底水库支流倒灌与淤积形态模型试验[J].水利水电科技进展,2013,33(2):1-4. (ZHANG Junhua,MA Huaibao,WANG Ting,et al. Model test of water intrusion and deposition morphology of tributary in Xiaolangdi Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):1-4. (in Chinese))
- [8] 陶国武,周泽宇.国内水库泥沙淤积治理综述[J].吉林水利,2016(1):36-38. (TAO Guowu,ZHOU Zeyu. Review of national reservoir sediment control[J]. Jilin Water Resources,2016(1):36-38. (in Chinese))
- [9] 张俊华,马怀宝,窦身堂,等.小浪底水库淤积形态优选与调控[J].人民黄河,2016,38(10):32-35. (ZHANG Junhua,MA Huaibao,DOU Shentang,et al. Optimization of deposition morphology and regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River,2016,38(10):32-35. (in Chinese))
- [10] 赵克玉,王小艳.水库纵向淤积形态分类研究[J].水土保持研究,2005(1):186-188. (ZHAO Keyu,WANG Xiaoyan. On classifying of deposition feature in profile of reservoirs[J]. Research of Soil and Water Conservation,2005(1):186-188. (in Chinese))
- [11] 李立刚.黄河小浪底水库库区泥沙冲淤规律及减淤运用方式研究[D].南京:河海大学,2005.
- [12] 卢金友.水库淤积断面横向分布规律研究[J].长江科学院院报,1988,5(1):71-81. (LU Jinyou. Study on the lateral distribution in cross-section of reservoir sedimentation[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research,1988,5(1):71-87. (in Chinese))
- [13] 涂启华,杨赉斐.泥沙设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,2006
- [14] 来世玉.河道型水库泥沙淤积数值模拟研究[D].天津:天津大学,2015.
- [15] 杨春瑞,邓金运,陈立.复杂边界作用下三峡水库泥沙淤积特征与趋势[J].水科学进展,2023,34(3):442-452. (YANG Chunrui,DENG Jinyun,CHEN Li. Sediment deposition trend in the Three Gorges Reservoir under the action of complex boundary conditions[J]. Advances in Water Science,2023,34(3):442-452. (in Chinese))
- [16] 假冬冬,王远见,江恩惠,等.小浪底水库淤积形态数值模拟[J].人民黄河,2020,31(2):240-248. (JIA Dongdong,WANG Yuanjian,JIANG Enhui,et al. Numerical study on the sedimentation pattern of Xiaolangdi Reservoir on the Yellow River[J]. Yellow River,2020,31(2):240-248. (in Chinese))
- [17] 假冬冬,江恩惠,王远见,等.小浪底水库水沙调控对淤积形态影响的数值模拟[J].人民黄河,2022,44(2):32-35. (JIA Dongdong,JIANG Enhui,WANG Yuanjian,et al. Numerical study on responses of sedimentation patterns of the Xiaolangdi Reservoir to water and sediment regulation[J]. Yellow River,2022,44(2):32-35. (in Chinese))
- [18] 吴腾,申孙平,李涛,等.三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (WU Teng,SHEN Sunping,LI Tao,et al. Influence of operation of Sanshenggong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):401-405. (in Chinese))
- [19] 张金良,胡春宏,刘继祥.多沙河流域水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术[J].水利学报,2022,53(1):1-10. (ZHANG Jinliang,HU Chunhong,LIU Jixiang. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(1):1-10. (in Chinese))
- [20] 张金良,罗秋实,陈翠霞,等.黄河中下游水库群-河道水沙联合动态调控[J].水科学进展,2021,32(5):649-658. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,CHEN Cuixia,et al. Research on joint dynamic control of reservoir groups and river channel in the Middle and Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2021,32(5):619-658. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-17 编辑:熊水斌)