

水电可持续泥沙管理的研究进展

田鹏 张浩宇

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：据预测，未来 20 年所有新能源投资的 60 %将用于可再生能源。估计新的水电产量占有所有可再生能源的 25 %。然而，未来面临的主要经济、技术和生态挑战之一是流域沉积物的沉积、处理和扰动动态，这大大降低了未来水电的市场潜力。由于缺乏对这些沉积学挑战的认识，各种巨大的经济、技术和生态问题不断涌现，对水电行业、水管理当局和社会的影响越来越大。在大量文献回顾的基础上，本文讨论了现有法律框架、水库管理技术的不足及未来发展方向，并对沉积物的生态相关性和可能的干扰进行了描述。结论表明，所有这些问题都应在考虑生态要求和标准的情况下，通过改进水电利用的泥沙管理，在总体目标的框架内最小化成本。

关键词：水力发电；底泥管理；可再生能源；成本优化；水生态

DOI: 10. 69979/3060-8767. 24. 3. 003

引言

IEA《世界能源展望》预测，未来 20 年所有新能源投资的 60 %将用于可再生能源^[1-2]。预测新的水电产量占有所有可再生能源的 25%。虽然水资源是生产气候中性能源的重要来源^[3]，但流域也提供了重要的生态系统服务，如灌溉、饮用水、生物多样性和娱乐^[4]。然而，未来的主要经济、技术和生态挑战之一是河流流域沉积物的沉积、处理和扰动动态，这大大降低了水电的未来市场潜力。未来水力发电行业、水管理部门和社会面临的重大经济、技术和生态问题日益凸显。水电利用中的生态问题是由于泥沙管理的中长期缺陷、泥沙连续体的中断和下游河段的后续影响。此外，河流泥沙积累对洪水风险增加、河道内生物影响和各种已实施的河流修复手段的鲁棒性提出了挑战。此外，大坝上游沉积物的积累，由于缺乏沉积物和营养物质，减少了下游施肥，并对下游造成污染风险。

本文的目的是全面地描述全球泥沙管理在水电利用方面的现状、不足和未来的挑战，为河流治理及水电可持续管理提供理论支持，以确保水电生产的可持续性和河流系统的生态完整性。

1 相关法律框架

1.1 水框架指令

所有欧洲河流的一个里程碑被确定为执行《欧洲指令》的政治决定，以满足欧洲联盟所有成员国的客观管理标准。从 2000 年的《欧洲水框架指令》(WFD)^[5]开始，重点关注水环境“良好生态状态”(GES)的保护或恢复。在其他社会经济用途较大的水体，如水力发电，其目标是“良好的生态潜力”。

然而，并没有专门处理河流系统中的沉积物或沉积物过程，尽管沉积物是水环境的自然和基本组成部分，其中管理在水立法中起着重要作用^[6]。特别是，对于所要求的“良好的生态状况”，河流系统中沉积物连续体的保存和实现是没有目标的。WFD 的重点不是从沉积物动力学的整体观和集水区尺度来建立良好的生态状态，而是关注水库冲刷或水质问题等方面的有害影响。

1.2 洪水指令

大多数欧洲河流系统受到沿河流走廊的多重压力的严重影响，如水力发电厂和/或在以前的淹没区发生了显著的变化。此外，生态退化，特别是对这些溢岸区的强化利用，如果被整治河流的设计流量被超标，或防洪措施失效（如洪水），将增加人类悲剧的风险和高额的经济损失）。为了应对这一特定的自然灾害，欧洲议会于 2007 年发布了第二个与河流系统管理相关的指令。鉴于欧洲洪涝灾害的严重性，欧洲人洪水指令解决了风险分析问题，并为成员国提供了四个步骤的操作任务：①一般规定，②初步洪水风险评估，③洪水风险图和洪水风险图，④洪水风险管理计划，其中必须包括水电的操作方面。关于减轻洪水防御影响的措施主要包括：①岸坡加固/保护；②航道整治。

1.3 可再生能源指令

关于水管理问题的第三个是处理能源供应的重要方面，即水力发电。《可再生能源指令》(RED)声称，到 2020 年，每个成员国基于可再生能源的能源消费总量为 20%，能源市场等水电产量的增加将是这些目标的结果。在联邦能源战略中，水电利用的扩展已经作为一项目标实施。尽管水力发电必须

被视为一种可再生的能源形式，但与欧洲水框架指令的目标相反，河流系统动能和势能的强化利用仍然存在。根据 EUECOSTAT 报告，控制河流中泥沙管理的推荐减缓措施是：①机械破碎床面粗化；②清除沉积物；③重新引入沉积物；④恢复侧蚀过程；⑤引入冲洗流。

1.4 存在的不足和未来的挑战

迄今为止，欧盟还没有专门的立法来管理流域尺度的沉积物数量或质量，包括各种指令的目的和利益冲突。然而，泥沙问题与许多其他立法领域相关联。

2 水库泥沙管理技术

水库中的泥沙管理技术种类繁多，可分为①全流域措施；②水库技术；③大坝技术。

2.1 全流域泥沙管理技术

尽管各种研究强调了预防措施的重要性，即在流域尺度上采取的预防措施，但关于这一主题的定量研究却很少。根据文献[7]的方法，全流域水库管理技术包括：①技术保持措施，例如：洪流控制、泥沙保持盆地；②自然保持措施；③土地利用和管理措施；④跨流域引水；⑤在水库入口处建设预蓄水池；⑥绕避沉积物，这也可以看作是水库中的一种缓解措施。

2.2 水库泥沙管理技术与泥沙减缓

近期的许多研究集中在水库的管理技术上。水库泥沙管理中经常被研究和描述的减缓措施是泥沙绕流系统。通过隧道（绕行）进行泥沙转移可以被看作是针对水库淤积的一种预防性和流域尺度的措施，因为它抑制了推移质和部分悬移质输入水库，确保了洪水期间的泥沙连续性^[8]，从而可以通过防止大坝下游的河床冲刷来改善河流生态和可持续性^[9]。水库中其他常见的管理技术可以概括为清除水库沉积物的措施，如机械清淤和水力清淤（水库冲洗）。关于机械疏浚，可区分为：①干式疏浚（往往局限于堤防附近的区域），使用常规施工机械，要求水库最大降深，同时保持水轮机运行；②湿式疏浚，无需降深，可清除整个库区的沉积物。这里需要专门的机械（浮筒式挖泥船、吸泥船），而的疏浚效率要低得多。然而，水力清淤，即通过冲洗水库来清除沉积物，通常被认为是处理水库淤积^[10]的最简单、最经济的措施。为了达到所需的剪切应力，水位的完全下降是必要的，这会导致能量产生的高损失。因此，在年调蓄水库的情况下，通常与其他维护工作相结合。相对于水库的自由流冲洗，最近的一些研究调查了压力冲洗，这不涉及水位的完全降深。因此，它仅对可利用库容有边际效应，但它可以通过发展局部侵蚀锥来帮助保持取水构筑物不受沉积物的影响。

2.3 大坝处的水库管理技术

最近的大量研究涉及^[11]大坝的水库管理技术。由于浊流将细小物质输送到大坝方向已被公认为大型高山水库淤积的主要驱动力，它们是最近许多出版物的焦点。一般来说，治理浊流的措施要么是阻止它们在临界点沉降，要么是稀释它们，从而通过拦河坝输移。它们包括建造不透水和透水的屏障，如大坝和土工布帷幕，通过水力手段（射流筛）防止沉降，泄水和排气，以及通过水轮机稀释和随后的泄水含沙水。

2.4 存在的不足和未来的挑战

正如已经列出的那样，可以使用多种策略来管理水库中的沉积。这些策略从防止沉积物进入水库到沉积物清除技术。可为鉴戒地、利用引水隧洞的泥沙绕流系统或在槽水库已在世界范围内安装。一般而言，水库管理试图将沉积物管理作为功能系统的一个组成部分，因为水库的设计是为了提供可再生的供水来源。然而，目前国际上水库泥沙管理存在重大缺陷和后果：①由于缺乏过程理解和不同尺度的综合措施，（例如，由于技术和/或生态限制，不可能冲洗）措施在实施中存在问题；②由于缺乏泥沙管理或技术缺陷，损害和降低了特定技术系统部分（如水轮机）的可操作性；③由于缺乏泥沙管理而导致水库淤积增加，从而丧失了水电系统的生产力/供应安全。

3 过程理解与数值模拟

开发预测工具，如数值泥沙输移模型，将是水电行业可持续泥沙管理的一个重要未来方面。许多研究已经计算了与水流有关的泥沙输移和储层沉降。此外，为了提高对热混合和对流扩散过程的理解，采用数值模型来描述水库中的水温和浊度动态。文献^[12]模拟了一个天然湖泊和一个通过抽水蓄能连接的水库中的温度和浊度。Kim^[13]将一个二维水质模型应用于深水水库的浑浊互流。此外，Choi 等^[14]进行了纵向-垂向水动力和浊度模拟，以预测大坝重建效果。近期的一些研究主要集中在水电站技术结构的三维数值模拟方面。

除了泥沙输移过程的缺点外，在水电工程泥沙输移模拟和监测方面也存在着各种各样的缺点：①特别是，由于经验泥沙输移方程的限制，大多是在小尺度物理模型研究中得出的。（通常高估或预测偏低）。缺乏足够的数学描述为改善水库管理而采取的措施的可预测性受到负面影响。②数值研究：在该领域的研究相对较少，这一方面是由于所需的计算工作量较大，另一方面是由于可以获得流场的全貌，从而可以更深入地了解正在进行的过程。③根据（a）临界剪切应力，（b）临界水深平均进近速度和临界冲量。对于小粒径沉积物，如粘土或粉土，粘聚力控制临界剪切应力。粘聚力和生物膜的

作用增加了启动运动的临界剪切应力。④此外,固结和进一步的岩土和土壤水文过程影响沉积物的再搬运,但仍缺乏详细的过程理解和描述。⑤近年来,湍流和脉动参数的作用得到了广泛的认可。在物理实验室中,基于临界湍流力和冲量、临界局部接近速度和施加在水流上的网格湍流,对(如起动、三角洲形成、沉积等)的泥沙输运动力学进行了研究。然而,湍流过程的贡献在常用的输沙公式中没有体现。

4 结论

水电站的泥沙管理对于可再生能源生产的可持续性以及淡水生态系统的保护和恢复都具有重要意义。对于可再生能源的生产,特别是水电站水库的库容是关键和关键点之一,特别是在长期的角度。如果如预测的那样,未来 20 年所有新能源投资的 60 %将用于可再生能源,则必须保证甚至扩大水电平衡风能和光伏等可再生能源波动性能源生产的灵活性。因此,应避免因泥沙治理作业(如清淤、冲洗等。)而造成的中长期停产。这类停机还包括维修工作甚至更换涡轮机,这些涡轮机可能因运输沉积物的磨损而受损。在所进行的研究中,可以得出结论,由于缺乏过程理解,(例如,由于技术和/或生态限制,不可能冲洗)措施的实施存在各种问题,由于缺乏沉积物管理或技术缺陷,损害和降低了具体技术系统部分(如涡轮机)的可操作性。因此,会出现因泥沙管理缺失导致的水库淤积增加而导致水电系统的生产力/供应安全的损失。

参考文献

- [1]王浩.以可再生能源为主的能源系统[J].水电与抽水蓄能,2024,10(02):2-3.
- [2]何霄.“双碳”目标下能源经济结构转型研究[J].现代营销(上旬刊),2023,(03):107-109.
- [3]European Commission. Directive 2009/28/EC. Renew Energy Directive 2009.
- [4]Vörösmarty CJ, Lévêque C, Revenga C. Millennium ecosystem assessment ecosystems and human well-being: current state and trends; 2010.
- [5]European Commission. Directive 2000/60/EC, The EU Water Framework Directive integrated river basin management for Europe; 2000.
- [6]Brils J. Sediment monitoring and the European Water Framework Directive[J]. Ann Ist Super Sanita, 2008, 44: 218-223.
- [7]Schleiss A, Oehy C. Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit[J]. Wasser Energ Luft Eau Énergie Air, 2002, 94: 227-234.
- [8]Vischer D, Chervet A. Geschiebe-Umleitstollen bei Stauseen; Möglichkeiten und Grenzen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau [M]. Hydrologie und Glaziologie. Zurich, Switzerland: ETH Zurich, 1996.
- [9]Schleiss A, Boes R. Dams and reservoirs under changing challenges. In: Proceedings of international symposium on dams and reservoirs under changing challenges[C]. 79 Annual Meeting of ICOLD. Lucerne, Switzerland: Swiss Committee on Dams, 2011.
- [10]Emamgholizadeh S, Bina M, Fathi-Moghadam M, Ghomeysi M. Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir[J]. ARPN J Eng Appl Sci., 2006, 1: 7-16.
- [11]Oehy CD, De Cesare G, Schleiss AJ. Effect of inclined jet screen on turbidity current[J]. J Hydraul Res., 2010, 48: 81-90.
- [12]Bonalumi M, Anselmetti F, Wüest A, Schmid M. Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations[J]. Water Resour Res., 2012, 48(W08508): 1-19.
- [13]Kim Y, Kim B. Application of a 2-dimensional water quality model (CE-QUAL-W2) to the turbidity interflow in a deep reservoir (Lake Soyang, Korea)[J]. Lake Reserv Manag, 2006, 22: 213-222.
- [14]Choi J, Jeong S, Park S. Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Turbidity Simulations for Prediction of Dam Reconstruction Effects in Asian Monsoon Area[J]. JAWRA J Am Water Resour Assoc., 2007, 43: 1444-1454.

作者简介:田鹏,1987年,山西水务集团建设投资有限公司副总经理,历任技术主管,项目负责人等职务。