

澜沧江流域水库 - 河流体系水温变化特征及其生态响应

纪伟^{1,2}

1. 南京聚润工程科技有限公司, 中国·江苏 南京 211800

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 中国·江苏 南京 210098

摘要: 本研究聚焦澜沧江流域水库 - 河流体系, 通过长期监测与数据分析, 深入探讨了该体系水温变化特征及其对生态系统的影响。研究发现, 澜沧江流域水库建设改变了河流自然水温节律, 呈现出分层、水温年变幅减小等特征。这些变化对水生生物群落结构、鱼类繁殖与生长、河岸植被等生态系统组成部分产生了显著响应, 影响了流域生态平衡。本研究为澜沧江流域水资源管理与生态保护提供了科学依据, 有助于制定合理的生态补偿与保护策略。

关键词: 澜沧江流域水库; 数据分析; 生态补偿; 保护策略

Characteristics of Water Temperature Change and Its Ecological Response of Reservoir-river System in Lancang River Basin

Wei Ji^{1,2}

1. Nanjing Jurun Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211800, China

2. Key Laboratory of Shallow Lake Comprehensive Management and Resource Development, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China

Abstract: This study focuses on the reservoir-river system in the Lancang River basin. Through long-term monitoring and data analysis, the water temperature change characteristics of the system and its impact on the ecosystem are deeply explored. It is found that the construction of reservoirs in the Lancang River basin has changed the natural water temperature rhythm of the river, showing the characteristics of stratification and annual decrease of water temperature. These changes produced significant responses to ecosystem components such as aquatic community structure, fish reproduction and growth, and riparian vegetation, and affected the ecological balance of the watershed. This study provides a scientific basis for water resources management and ecological protection in the Lancang River Basin, and contributes to the formulation of reasonable ecological compensation and protection strategies.

Keywords: reservoir in Lancang River basin; data analysis; ecological compensation; protection strategy

0 前言

澜沧江发源于中国青海省唐古拉山北麓, 自北向南流经中国青海、西藏、云南三省区, 出中国国境后被称为湄公河, 流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南, 于越南胡志明市流入南海。作为东南亚重要的国际河流, 澜沧江 - 湄公河对流域内各国的经济社会发展和生态环境稳定具有举足轻重的作用^[1]。

近年来, 随着澜沧江流域水电开发的加速, 一系列水库相继建成并投入运行。水库的建设在发挥防洪、发电、灌溉等重要功能的同时, 也显著改变了河流原有的水动力条件和水温结构。水温作为河流生态系统的关键物理参数, 其变化会对水生生物的生存、繁殖、生长以及整个生态系统的结构和功能产生深远影响。深入研究澜沧江流域水库 - 河流体系水温变化特征及其生态响应, 对于保护流域生态环境、实现水资源可持续利用具有重要的现实意义^[2]。

1 澜沧江流域概况

1.1 自然地理特征

澜沧江流域面积达 16.48 万平方公里, 流域内地形复杂多样, 涵盖高山峡谷、丘陵和平原等多种地貌类型。地势西北高、东南低, 海拔落差大, 从源地的海拔 5000 多米逐渐降至河口的不足 100 米。流域内气候类型丰富, 上游地区属高原气候, 寒冷干燥; 中游地区为亚热带季风气候, 温暖湿润; 下游地区则为热带季风气候, 高温多雨。这种复杂的地形和气候条件造就了澜沧江流域独特的生态系统, 生物多样性极为丰富^[3]。

1.2 水电开发现状

截至目前, 澜沧江流域已建成多座大型水电站, 如小湾水电站、糯扎渡水电站等。这些水电站的水库总库容巨大, 对河流的流量调节和水温变化产生了显著影响。以小湾水电站为例, 其水库总库容达 151.32 亿立方米, 坝高 294.5 米, 是世界上已建成的第三高混凝土双曲拱坝。大规模的水电开

发在带来巨大经济效益的同时,也引发了一系列生态环境问题,其中水温变化对生态系统的影响尤为突出^[4]。

2 澜沧江流域水库 – 河流体系水温监测方法与数据来源

2.1 监测方法

本研究采用了多种先进的水温监测方法。在水库和河流关键断面设置了水温监测点,使用高精度的温度传感器进行实时监测,传感器精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。同时,结合卫星遥感技术,获取大范围的水温分布信息,弥补了传统监测点空间覆盖不足的问题。此外,还定期采集水样,在实验室进行水温精确测量,以校准和验证传感器及遥感数据的准确性。

2.2 数据来源

研究数据主要来源于以下几个方面:一是中国水利部门在澜沧江流域设立的长期水文监测站所积累的水温数据,时间跨度从 2000 年至今;二是利用卫星遥感数据,通过专业的遥感图像处理软件解译得到的水温信息;三是本研究团队在重点区域开展的实地监测数据,包括在水库不同深度、河流不同断面的水温测量数据。通过对多源数据的整合与分析,确保了研究结果的准确性和可靠性。

3 澜沧江流域水库 – 河流体系水温变化特征

3.1 水库水温垂直分层特征

经过多年持续且细致的水温监测,科研团队发现澜沧江流域内的水库无一例外地呈现出显著的水温垂直分层现象。以规模宏大的糯扎渡水库为典型代表,在夏季(6~8月),阳光强烈,表层水体充分吸收太阳辐射能量,水温迅速攀升,可达 $28^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。当深入到水深 30 米处,水温急剧下降至 $20^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$,在此区间形成了极为明显的温跃层。温跃层犹如一道无形的屏障,阻碍了水体的垂直混合。在其下方,深层水体难以与表层水体进行热量交换,使得深层水体温度相对稳定且保持在较低水平。据实地监测数据显示,在夏季,糯扎渡水库 40 米以下的深层水体温度基本稳定在 $18^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$,波动范围极小。

进入冬季(12 至次年 2 月),太阳辐射强度减弱,气温降低,水库水温垂直分层现象虽有所减弱,但依旧存在。此时,表层水温约为 $18^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$,而深层水温维持在 $15^{\circ}\text{C} \sim 17^{\circ}\text{C}$ 。这种水温垂直分层特征并非偶然,而是与水库的多种物理特性紧密相关。水库的水深是关键因素之一,像糯扎渡水库平均水深达上百米,巨大的水深为水温分层创造了空间条件。水动力条件同样影响显著,水库内水流流速相对缓慢,不利于水体的强烈混合,从而促进了水温分层的形成。太阳辐射作为热量的主要来源,其在水体不同深度的穿透和吸收差异,直接导致了水温的垂直分布不均。

3.2 河流与水库水温的季节性变化

在河流处于自然未受干扰状态时,水温遵循着明显且规律的季节性变化模式。春季(3~5 月),随着太阳直射点北移,气温逐渐升高,河流表层水温如同被唤醒的生命,

逐渐上升。通过对澜沧江上游某自然河段多年的监测数据统计分析,发现该河段在春季平均每月水温升高约 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。到了夏季,太阳辐射达到最强,水温也随之达到峰值,部分河段表层水温可超过 30°C 。例如在澜沧江中游的部分开阔河段,夏季水温最高时能达到 32°C 。秋季(9~11 月),气温开始下降,河流表层水温也如同退潮一般,逐渐降低,平均每月下降幅度约为 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。冬季,气温降至全年最低,部分上游河段水温可降至 10°C 以下,在一些高海拔且流速较慢的支流河段,水温甚至可低至 5°C 左右。

然而,自一系列水库建成并投入运行后,河流的水温季节性变化规律被彻底打破。以小湾水电站下游河段为例,在水库建成前,该河段水温季节性变化与自然河流特征相符。但水库建成后,其强大的调节功能使得下游河流的水温年变幅明显减小。在夏季,水库底部低温水的下泄成为主导因素,使得下游河流表层水温较建库前显著降低,降低幅度可达 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 。在冬季,情况则相反,水库下泄水相对温暖,这使得下游河流表层水温较建库前升高了 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。这种水温季节性变化的改变,对下游河流生态系统的各个层面都产生了深远影响,从水生生物的生存繁衍到河流生态系统的物质循环和能量流动,无一不受其波及。

3.3 不同水库对水温的影响差异

不同规模和运行方式的水库,在澜沧江流域中犹如不同的“温度调节器”,对水温的影响存在着显著差异。大型水库凭借其巨大的库容和深邃的水深,水温分层现象表现得更为突出,对下游河流水温的调节作用也更为强劲。以景洪水电站水库为例,其总库容为 10.77 亿立方米,相较于流域内的大型水库,规模相对较小。在实际运行中,其对下游河流的水温调节作用相对有限,下游河流的水温变化相对平稳,波动范围较小。据监测数据显示,在景洪水电站水库下游 50 公里范围内,河流表层水温在夏季因水库调节的变化幅度仅为 $1^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$,冬季变化幅度在 1°C 以内。

而总库容达 237.03 亿立方米的糯扎渡水库,宛如一个巨型的“温度控制中枢”,对下游河流的水温影响范围广泛且程度深刻。在糯扎渡水库下游 100 公里的河段内,夏季水温受水库下泄低温水影响,可降低 $5^{\circ}\text{C} \sim 7^{\circ}\text{C}$,冬季则因下泄水相对温暖,水温升高 $3^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 。此外,水库的运行方式,诸如发电流量的大小、调节频率等,也如同“变速齿轮”一般,对水温产生不同程度的影响。频繁调节发电流量的水库,其下游河流的水温波动相对较大。例如,某座以调峰为主、发电流量频繁变化的水库,在其下游河段,水温在一天内的波动幅度可达 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$,这对水生生物的生存环境稳定性造成了极大挑战。

4 澜沧江流域水库 – 河流体系水温变化的生态响应

4.1 对水生生物群落结构的影响

水温的微妙变化如同一只无形的大手,对澜沧江流域水生生物群落结构产生了显著且深远的影响。众多水生生物

在长期的进化过程中,对水温形成了特定的适应性,水温的改变无疑会导致它们的生存空间和生态位发生位移。在水库下游河流的长期监测中,科研人员发现,一些原本偏好高温环境的浮游生物种类,数量出现了明显的下滑趋势。以蓝藻为例,在水温降低的下游河段,其作为高温性浮游植物的典型代表,生物量下降了 30%~40%。与之相反,硅藻等适应较低水温环境的浮游植物种类,生物量则呈现出上升态势,在部分河段,硅藻生物量占浮游植物总生物量的比例从建库前的 30% 左右上升至 40%~50%。

在底栖生物方面,水温变化如同一场“生态变革”,深刻影响了底栖生物的分布和多样性。在水库下游河流中,由于水温的改变,一些底栖动物的栖息地环境发生了根本性变化,进而导致其种群数量和分布范围出现显著改变。某些对水温敏感的软体动物种类,如某种螺蛳,因水温变化不适宜其生存,数量大幅减少,在部分河段的种群密度较建库前下降了 50% 以上。而一些适应水温变化能力较强的水生昆虫幼虫,如摇蚊幼虫,数量相对增加,其在底栖生物群落中的优势地位逐渐凸显。这种水生生物群落结构的改变,犹如多米诺骨牌效应,可能会进一步影响整个生态系统的能量流动和物质循环,从根本上改变河流生态系统的运行模式。

4.2 对鱼类繁殖与生长的影响

水温作为影响鱼类繁殖和生长的核心关键因素之一,在澜沧江流域的生态舞台上扮演着举足轻重的角色。许多土著鱼类在长期的生存繁衍过程中,形成了特定的繁殖水温要求。例如,部分土著鱼类只有在水温达到 18℃~20℃ 时,才会开启繁殖活动。然而,水库的建设与运行犹如一把双刃剑,虽然带来了诸多经济效益,但也使得下游河流的水温节律发生了不可逆转的改变。在小湾水电站下游,通过对鱼类繁殖行为的长期观测研究表明,一些鱼类的繁殖时间较建库前推迟了 1~2 周。这一延迟可能会使鱼类的繁殖活动错过最佳的环境窗口期,影响鱼类的繁殖成功率。同时,幼鱼孵化后的生存环境也因水温变化而改变,可能面临食物资源减少、天敌增多等不利因素,对鱼类种群的延续和发展构成了潜在威胁。

水温变化还如同一个“生长调节器”,对鱼类的生长速度产生直接影响。在适宜水温范围内,鱼类的新陈代谢旺盛,生长速度较快。但当水温偏离适宜范围时,鱼类的生长进程会受到明显抑制。在水库下游河流中,由于夏季水温降低,一些喜高温的鱼类,如罗非鱼,生长速度受到严重影响。据养殖实验数据对比,在水温降低的河段,罗非鱼的生长速度较自然状态下降低了 15%~20%。这不仅意味着鱼类达到上市规格的时间延长,增加了养殖成本,更对渔业资源的可持续发展产生了不利影响,可能导致渔业产量下降,影响当地渔民的经济收入和渔业产业的稳定发展。

4.3 对河岸植被的影响

水库-河流体系水温变化如同一个“生态蝴蝶效应”的引发者,对河岸植被也产生了不可忽视的影响。水温变化首先通过影响河流的水位和流量,进而对河岸带的土壤水分条件和淹没频率产生连锁反应。在一些水库下游河流,由于

水温变化导致水位波动减小,原本依赖洪水周期性泛滥进行种子传播和更新的河岸植被种类受到了严重冲击。以某些草本植物为例,它们在长期的进化过程中,形成了依靠洪水将种子携带到更广泛区域进行传播的繁殖策略。但随着洪水泛滥频率降低,种子传播范围受到极大限制,种群数量逐渐减少。在部分水库下游河岸带,这些草本植物的覆盖面积较建库前减少了 30%~40%。

水温变化还可能通过影响微生物活动和土壤养分循环,如同在生态链条上施加了微妙的变化,间接影响河岸植被的生长和分布。在水温较低的区域,土壤中微生物的活性如同被按下了“减速键”,降低明显。这使得土壤养分的分解和转化速度减慢,土壤中可供植物吸收利用的养分含量减少,可能会影响河岸植被对养分的吸收和利用效率,进而影响植被的生长状况。一些对养分需求较高的植被种类,可能会因养分不足而生长缓慢、植株矮小,甚至出现死亡现象,从而改变河岸植被的群落结构和生态功能。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究通过对澜沧江流域水库-河流体系水温变化特征及其生态响应的研究,得出以下结论:澜沧江流域水库建设改变了河流的自然水温节律,水库呈现出明显的水温垂直分层特征,河流的水温季节性变化受到显著影响,不同水库对水温的影响存在差异。这些水温变化对水生生物群落结构、鱼类繁殖与生长以及河岸植被等生态系统组成部分产生了显著的响应,影响了流域生态平衡。

5.2 研究展望

未来,随着澜沧江流域水电开发的进一步推进以及气候变化的影响,澜沧江流域水库-河流体系的水温变化及其生态响应将面临更多挑战。后续研究应加强对不同气候情景下水库-河流体系水温变化的预测,深入研究水温变化对生态系统长期影响的机制,为制定科学合理的水资源管理和生态保护策略提供更坚实的理论基础。同时,应加强对流域生态系统的监测和评估,建立生态补偿机制,以减轻水电开发对生态环境的负面影响,实现澜沧江流域经济发展与生态保护的协调共进。

参考文献:

- [1] 朱伟明,李涛辉,杨祥磊,等.澜沧江-湄公河流域水库建设对植被干旱的影响及驱动机制[J/OL].水利水电技术(中英文),1-16[2025-03-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.2025.0225.1621.009.html>
- [2] 韩祥峰,郭明伟,刘坤,等.澜沧江流域糯扎渡水库沉积物有机质来源的定量研究[J/OL].地球与环境,1-10[2025-03-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1139.p.20240702.1322.001.html>
- [3] 刘文琨,罗增良,周鹏程,等.气候变化下澜沧江流域径流及水电站发电能力预测[J].人民长江,2024,55(8):103-113.
- [4] 余君妍,马骏,杨正健,等.基于水体溯源的澜沧江梯级水库水体总磷来源及滞留效应分析[J].中国农村水利水电,2023(3):94-101+119.