

生态流量恢复的黄河干流水库生态调度研究

刘明洋 周万勋

河南省江淮水利勘测设计有限公司 河南南阳 473000

摘要：一个普遍的挑战是，在水库生态调度研究领域，很难确定具体的生态目标，而且很难将微观的生态需求融入宏观的调控之中。采用流量恢复技术，研究黄河干流梯级水库的水流过程，以确保河流生态水文系统的健康状况，并基于此构建出一个综合的调度模型，通过对生态断面流量的有效控制，实现在不同生态条件下的黄河水资源配置方案。经过生态流量控制，昔河下游地区的供水保障率显著提升，而缺水指数、发电量指数以及生态破坏率的变化则相对较小；2021年，与非生态控方案相比，主要变化在于对缺水系数和生态保护率的支持，而供水保障率和发电量的变化则相对较小。从当前的情况来看，生态调度对黄河流域的各项指标的影响不显著，但2021年以后，它将为黄河流域的生态保护发挥重要作用。发电量指标对黄河生态系统的破坏程度不太敏感，但生态破坏率却显著增加，这表明生态调控对于缓解黄河生态系统的破坏具有重要意义。然而，如果没有外部水源，满足黄河干流生态用水的需求将会变得更加困难。

关键词：水文学及水资源；水库调度；生态流量恢复；黄河干流

Study on Ecological dispatching of the Main stream reservoir of the Yellow River with ecological flow restoration

Mingyang Liu Wanxun Zhou

Henan Province Jianghuai Water Conservancy Survey and Design Co. Henan Nanyang 473000

Abstract: A common challenge is that it is difficult to determine specific ecological objectives in the field of reservoir ecological scheduling, and it is difficult to integrate micro ecological needs into macro regulation. By adopting flow restoration technology and studying the water flow process of the Yellow River main stem cascade reservoirs, we can ensure the health of the river ecological hydrological system and construct a comprehensive scheduling model based on it. Through effective control of the ecological section flow, a water resources allocation plan for the Yellow River under different ecological conditions can be achieved. After ecological flow control, the water supply guarantee rate in the downstream of Xixia River has been significantly improved, while the changes in water shortage index, power generation index, and ecological damage rate are relatively small. In 2021, compared with the non-ecological control scheme, the main changes were in the support of the water shortage coefficient and ecological protection rate, while the changes in water supply guarantee rate and power generation were relatively small. From the current situation, the impact of ecological scheduling on various indicators in the Yellow River Basin is not significant, but after 2021, it will play an important role in the ecological protection of the Yellow River Basin. The power generation index is not very sensitive to the degree of damage to the Yellow River ecosystem, but the ecological damage rate has increased significantly, indicating that ecological regulation is of great significance in mitigating the damage to the Yellow River ecosystem. However, if there is no external water source, it will be more difficult to meet the ecological water demand of the Yellow River main stem.

Keywords: hydrology and water resources; reservoir scheduling; ecological flow restoration; mainstem Yellow River

引言

生态调度已成为一种重要的河流恢复技术，国内外许多国家都在努力实施这一技术，例如美国田纳西河流域的恢复、克罗拉多河的可持续发展以及澳大利亚墨累-达令河的可持续发展。在这些国家中，美国、澳大利亚等西方发达国家的研究已经相当成熟，并已经开始进行实际应用。（在我国生态调度是与河流健康的概念一起出现的，作为一种河流生态修复和维持河流健康的非工

程手段被广泛关注，目前我国水库生态调度的实践工作正处于探索阶段，有几个问题亟待解决。

（1）环境控制指标采集。为了达到保护河流的健康状况，我们需要深入研究水流状况和生态系统的相互作用，并设定一些可行的、有效的环境管控措施。当前的研究大多停留在宏观层面，而忽略了生态系统的微观结构和功能，同时也没有清晰地阐释它们之间的相互作用，也没有建立起可靠的实验数据。

(2) 协调生态和社会经济发展是我们的首要任务。当前, 大多数水库都承担着多种综合性的任务, 包括发电、防洪、灌溉和供水。为了充分发挥水库的生态效益, 必须妥善处理与其他防洪目标之间的关系, 例如与水库防洪计划的协调, 以及与区域电网负荷的协调; 通过协调, 确保用水单位的引水过程顺利进行。

(3) 在大范围内进行生态调度。生态调度不仅仅是水库的蓄水和放水, 它还能影响整个流域。当前, 河流生态调控的重点在于选择合适的生态控制点或陷测断面, 但是这些控制点的流量控制取决于上游水库的泄量组合, 特别是当干支流流量叠加时, 下泄流量的变化会变得非常复杂, 无论是时间上还是空间上。受跨流域调水工程和地下水变化的影响, 控制点滴量变得更加复杂和多样化。流域尺度的梯级水库生态调度方法将成为广大河流管理者和研究者面临的一个新挑战。

本文主要针对流域生态调度这一科学问题展开, 引入生态流量恢复法, 计算生态系统所需的恢复流量, 进而确定生态目标, 通过建立多目标模型将生态目标与防洪目标、兴利目标有机结合, 经模拟反馈计算, 获得黄河流域的生态调度方案。

一、生态调度的内涵与分类

在国外, 生态调度是一种广泛应用的综合性处理方式, 但尚未形成明确的定义。氯的核心价值在于, 它可以将生态因素融入当前的水库调度, 并与其他水库的功能相结合, 以此来指导水库的调度实践。随着水库调度技术的不断进步, 生态调度已经成为一种重要的社会责任, 旨在实现流域水资源的有效配置, 保护河流的生态环境, 实现可持续发展。根据先前的研究成果, 我们可以将生态调度定义为: 在满足人类基本需求的同时, 通过优化水库的功能, 尽可能地减少对周边环境的不利影响。因此, 从这个意义上讲, 生态调度就是指在确保防洪和供水安全的前提下, 以最小化经济效益最大化作为目标, 使得整个区域的水循环能够达到最佳状态, 最终实现人与自然和谐共生的过程。目前, 关于生态调度概念还没有一个统一的定义。

依据其定义, 可扩展生态调度的内涵如下: 通过生态调度, 我们旨在改善库区和下游水文、水力和水体环境, 以确保河流生态系统的稳定性和可持续发展。生态调度是水库综合调度的重要组成部分, 它不仅要求水库综合调度系统能够有效地指导水库的长期运行, 而且还要求其具备可持续性。生态保护是水库综合运用的核心任务, 应当优先考虑防洪、生活供水等基本需求, 同时结合其他目标, 努力实现对河流生态功能的有效保护。在保证河流正常蓄水位下进行生态调度, 并使之与社会发展协调一致, 从而促进社会和谐。生态保护需要建立在科学合理的基础上, 因此, 必须加强生态环境保护工作。生态调度是一种全新的理念, 具有较强的适应性和实用性。7 在生态调度中要充分考虑到上下游及河

道内生态用水量变化情况及其相互影响关系, 要根据不同地区实际情况合理确定生态调度方案。

二、生态流量恢复法

一直以来, 国际上的科学家和水管理者都认为, 要想保持河流的健康, 就必须模拟自然流量的节律, 包括数量、频率、发生时间、持续时间和变化速率等。本文提出的生态流量恢复法旨在通过实施有效的措施来恢复生态系统的流量, 其基本原则是: ①尽可能模拟自然流量过程。其包含四个方面的含义: 天然流量的一些要素不能被缩减, 必须被完整保留; 天然流量的一些要素可以按比例缩减; 天然流量的某些要素可以被一起删除; 调控性流量的可变性在某些方面应当模拟天然流量的变化性; ②根据对河流生态水文关系的深入理解, 采取最有利于生态环境的措施, 以达到更优质的水资源利用效果; ③尽管有其他重大因素影响河流健康, 例如污染等, 提供生态水量仍然是有价值的。

事实上生态流量恢复法属于整体法的一种, 其思路如下: ①进行河流生态水文调查, 确定生态保护目标; ②构建一个基于河流生态水文学的理论框架, 以探究其对不同流量组分的反应机制; ③构建一套完整的参照框架, 以便准确地预测出不同流量组分在自然环境中的变化趋势; ④根据一个特定的生态目标, 采用水力学指标来衡量其生态需求, ⑤通过构建水文和水力学模型, 精准地估算出满足该目标的水力学参数的取值, 并与未经人类干预的情况进行比较, 从而重新构建出流量的结构。确定生态流量的范围和阈值应用该方法对黄河生态安全的重点关注河段进行生态流量恢复计算, 结合河流的连续性要求, 得到黄河干流石嘴山、斗龙拐、龙门、潼关、苏园口、利津签关键断面的恢复流量。由于本文研究尺度是基于中长期的, 因此参与生态调度计算的生态流量将被转换到月尺度。可以看到, 当月生态需水量呈先增后减趋势。这主要是因为汛期时, 上游来水增加, 而下游河道蓄水能力不足, 使得生态流量出现了下降趋势。但是, 当月生态需水量仍然保持着较高水平(约1亿 m^3/d)。

三、生态调度的模型与求解

(一) 模型建立

鉴于水库具有复杂的功能需求, 因此, 在实施生态调度时, 必须基于工期法减家具标的基础函数, 以确保防洪、防凌的安全性。特别是针对暴雨洪水和冰凌洪水, 应采取有效措施, 如控制水库的水位及下泄流量, 以达到最佳的调度效果。在黄河的主要支流上, 兰州和花园口被认定为有效的防洪减灾设施。二生态系统的流量指标。提供必要的生态流量, 维持黄河流域生态水文系统平衡和健康生命·生态控制站选择中游的河口镇和下游的花园口街面, 生态流量分为最低限制流量和适宜流量, ③水资源利用目标: 包括缺水量最小和发电量最大, 其

中发电目标要求在实现其他强制目标（如防洪、基本生态流量、供水保证）的前提下，寻求干流梯级水库的合理运行方式，提高发电效益。约束条件包括：节点水量平衡约束、节点间水流连续性约束、水库水量平衡约束、水库库容约束、出库流量约束、出力约束和非负约束等。

（二）模型求解

根据黄河干流水利工程位置分布和水资源利用特点，将黄河流域概化为节点围，通过节点可反映流域生活、通过对黄河流域水资源的调控，可以有效地控制工业和农业用水、水库蓄水和放水、自然入流和支流汇流、流域外引水以及地下水的抽取，从而实现对贫困地区水量的有效控制，从而改善当地的水资源状况。系统仿真模型以水量平衡原理为基础，所需基本数据

过节点文件的形式输入，计算结果也以节点形式输出或在节点基础上处理成其它形式成果，非以模拟反增的形式进行仿真计算其反馈原理为在仿真模型中加入了三层辨识反馈结构，每一层的水位、断面流量以及出力都可以通过辨识来获取，并且可以根据实际情况调整模拟的参数，以达到预期的效果。在此基础上，可以不断地调整模拟参数，以达到最佳的效果，并且可以保证模拟结果的准确性。

（三）方案设计

为分析、考量不同水平年下梯级水库调度对流域兴利目标和生态目标的影响，设置现状年和2021年两个水平年，每个水平年下设置三个方案，分别为不控制生态流量（简称初始方案）、以低限水平控制生态流量（简称低控方案）和以适宜水平控制生态流量（简称适控方案）。三个方案均以现状年（或2021水平年）需水水平作为需求侧，以多年平均水资源量和现状年（2021水平年）下蓄引提供水工程为供给侧，进行目标调控，其中，2021水平年增加节水措施（工农业节水15%）和调水措施（引游济渭调水10亿 m^3 、引汉济渭通水10亿 m^3 ，小江引水入渭河调水70亿 m^3 、南水北调中线20亿 m^3 等）。径流序列采用1955-2000年黄河流域45年系列资料。根据上述分析结果，将黄河上流经的省区分为3类：第一类是沿黄河主要支流及其他重要河流；第二类是黄河中游地区及汾河河段以及下游至陕甘宁蒙交界处；第三类是黄河下游一潼关段—西安以下的关中平原、陕北高原地区。

四、结束语

本文以生态恢复流量为依据，构建水库综合调度模型，对黄河现状年和2021水平年的水库生态调度方案进行模拟研究，取得了如下结论及建议：

（1）通过现状年和2021水平年调度结果的对比分析，发现流域需水逐渐增加。供需矛盾日益加重，由此引发黄河流域缺水指数上升。供水保证率下降，发电量减少和生态需水破坏率加重等问题。到2021流域需水量将增加需求约30多亿 m^3 。尽管通过节水措施、调水

措施，流域缺水量仍会从现状年的67亿 m^3 上升至77.9亿 m^3 ，

（2）对于生态需水量的满足率，随着需水的增加逐渐降低，其中利津断面的破坏率增加最为显著，2021年利津断面生态破坏率将达到35.83%。可见，未来居不下的经济需水缺口与生态保护用水将产生不可调和的矛盾，如何协调两者的关系，确定合适的生态保证目标，是维持黄河健康生命的关键。

（3）由于采用的是中长期调度，把短时间的生态需水平均到月内，故从发电量上看影响不大。但是，短时间的洪水脉冲需要水库弃水才能实施，故会对发电量产生一定影响，需要从更小尺度上进行研究。

（4）通过对人类用水指标的分析，我们发现，在增加生态流量控制后，黄河上中游地区的缺水指数急剧上升，而下游地区则呈现出相反的趋势。水质保证率的变化趋势与缺水指数的变化趋势相似。电站的发电量变化不大，但是响应速度却很快，变化幅度很大但在库群总发电量上早现出随控制强度加大明显增加的趋势。生态用水指标对生态流量控制的响应较为强烈，特别是在头道拐、龙门、潼关、花园口几个断面上，利津断面反应相对迟钝。这主要是因为该断面位于黄河上游，受季节性降雨及上游地区来水来沙条件的限制，导致生态流量较少；另一方面，该断面处于河道末端，受到河流下泄水量的约束，使得生态下泄水量也相应减小。因此，为了维持河川生态环境平衡，必须加强生态流量管理，以达到合理利用水资源的目的。

黄河的生态水文系统十分复杂，它横跨多个地区，受到多种因素的影响。尽管黄河的干流水库的生态调度已经开始进行，但相关的研究仍处于初级阶段，缺少足够的数据库支持。因此，我们需要进一步深入探索小尺度的调度模型、坝体的调控措施以及更为广泛的生态目标获取方法。

参考文献：

- [1] 耿娜娜, 邵秀英. 黄河流域生态环境—旅游产业—城镇化耦合协调研究[J]. 经济问题, 2022(03):13-19.
- [2] 徐维祥, 郑金辉, 王睿, 周建平, 胡豹, 刘程军. 黄河流域城市生态效率演化特征及门槛效应[J]. 地理科学, 2022,42(01):74-82.
- [3] 许学工. 黄河流域高质量发展的途径探讨——生态—文化—经济融合发展、分区与统筹[J]. 黄河文明与可持续发展, 2021(01):71-87.

作者简介：

刘明洋（1997-）男，汉族，河南许昌，本科，河南省江淮水利勘测设计有限公司，研究方向：水文与水资源

周万勋（1998-）男，满族，河南南阳，本科，河南省江淮水利勘测设计有限公司，研究方向：水文与水资源