

文章编号:0559-9350(2017)12-1387-12

## 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究

邓铭江<sup>1</sup>, 黄 强<sup>2</sup>, 张 岩<sup>1</sup>, 张连鹏<sup>2</sup>

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对我国额尔齐斯河流域生态问题, 给出了水库群生态调度的定义。以保障河流健康、河谷生态系统安全为目标, 构建了宏观、中观、微观相互嵌套多尺度耦合的水库群生态调度体系; 结合生态调度的原则和依据, 建立了水库群多尺度耦合的生态调度多目标模型, 以及水库群中长期、短期和实时生态调度模型; 提出了多时间尺度耦合的水库生态调度技术、多目标非线性水库调度模型求解技术和生态系统滴漫灌溉技术; 定义了滴漫灌溉, 构建了生态滴漫灌溉系统。应用上述体系、模型和方法, 计算结果表明, 中长期调度方案能满足额尔齐斯河流域水资源综合利用各部门的供水量及保证率要求, 尤其是满足河谷林草生态供水的破坏深度要求和最大连续缺水年数的限制; 水库群实时生态调度模型的计算结果表明: 模型计算的河谷林草、湿地的水库人工生态洪水过程与实测值比较接近, 相对误差为 0.04 %, 说明模型结果合理。实时监测了河谷林草的滴漫灌溉效果, 包括范围、面积、水深等, 监测结果表明: 水库人工生态洪水过程基本满足河谷林草滴漫灌溉面积、水深等生态需水要求。研究成果对额尔齐斯河维持河流健康、保障生态安全、解决国际河流的水资源综合利用问题、发展水库群生态调度的理论和方法, 具有重要的理论意义与应用价值, 可供我国北方河流生态调度借鉴。

**关键词:** 水库群生态调度; 水资源综合利用; 生态调度体系; 多尺度耦合调度模型; 人工生态洪水过程

中图分类号: TV697.1+1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170728

### 1 研究背景

我国有江河 5 万多条、已建水库近 9 万座, 几乎所有的江河都建设了水库, 形成了以水库群为核心的水资源综合利用系统。江河水资源维系着生态系统, 形成了河道内外生态的多样性。但是, 由于经济的快速发展, 用水量日益增加, 加之水库不断增多, 使其河流生态系统发生了改变, 生态退化、生物多样性减少等问题日益严重, 大部分江河出现不同程度的生态问题。因此, 为进一步保障河流的生态安全, 水库的生态调度成为目前研究的热点和前沿问题。

国外水库生态调度研究始于 20 世纪 70 年代, 我国于 21 世纪初开始研究, 起步较晚。水库生态调度可分为河流、湖泊生态需水量调度, 模拟生态洪水调度、防治水污染调度、控制泥沙调度、水系连通性调度、生态因子调度等。水库生态调度主要是通过改变传统的水库控制运行方式解决生态问题, 发挥如下作用: 维持河流的生物多样性; 改善河道的水质; 防治河道泥沙淤积; 调控下泄水量的温度; 满足下游湖泊湿地生态耗水等。

1946 年, 美国学者 Masse<sup>[1]</sup>首先提出了水库调度问题, 随后有许多学者研究了发电、灌溉、供水、防洪等优化调度模型和方法。水库生态调度的相关研究相对滞后, 最早由 Schlueter 等<sup>[2]</sup>(1971

---

收稿日期: 2017-07-24; 网络出版日期: 2017-12-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171219.1554.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91325201); 水利部公益项目(201501058)

作者简介: 邓铭江(1960-), 男, 湖南衡阳人, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 主要从事水资源调控研究。

E-mail: xjdmj@163.com.net

通讯作者: 黄强(1958-), 男, 四川绵阳人, 教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn

年)提出水库调度应维持河流多样性问题；1984年，Petts等<sup>[3]</sup>系统地分析了水库对河流生态的影响；1998年，Hughes等<sup>[4]</sup>研究了水生生物习性，建立了基于河流生态流量的水库调度模型，并应用于水库调度方式的调整；2000年以后，许多学者相继提出了生态可持续水资源管理规程及平衡人与生态需水的水库管理办法，以及水库营造洪水过程进行生态调度的概念。近几年来，把评价生态影响的变化范围法(RVA)<sup>[5-6]</sup>引入了生态调度，建立了水库生态调度评价标准。2003年，李国英<sup>[7]</sup>等研究了小浪底水库调水调沙调度，采用人造洪水过程输沙入海，效果良好；2005年，彭虹等<sup>[8]</sup>研究了丹江口水库加大枯水季下泄流量，控制汉江下游富营养化；2007年，董哲仁等<sup>[9]</sup>研究了水库生态调度理论及方法；2008年，胡和平等<sup>[10]</sup>提出基于生态过程线的水库生态调度方法；近几年，康玲等<sup>[11]</sup>以汉江适宜生态流量及鱼类产卵所需的洪水脉冲过程为约束条件建立生态调度模型；尹心安等<sup>[12]</sup>提出生态调度规则优化；张洪波等<sup>[13]</sup>提出生态调度内涵并建立了黄河上游水库生态调度模型；黄强等<sup>[14]</sup>对水库生态调度研究新进展进行了综述。

上述研究成果大都集中在个别水库、河段，研究重点比较具体、深入，如通过水库生态调度解决河流基流、生态流量过程、洪水脉冲过程、调水调沙人工洪水过程等。但是，缺少对河流水库群整体研究，从河流全局考虑的较少。因此，本文针对新疆额尔齐斯河，在水资源综合利用的原则指导下，构建多尺度耦合的水库群生态调度体系，旨在揭示水库生态调度规律，为流域水资源科学管理，尤其是水库生态调度提供科技支撑。同时，研究额尔齐斯河流域复杂水库群的多尺度、高维、多目标、非线性生态调度，对维持河流健康、保障生态安全，解决国际河流的水资源综合利用问题，发展水库群生态调度的理论和方法，具有重要的理论意义与应用价值。

鄂毕河是世界十大河流之一，河流长5 410 km、流域面积298万km<sup>2</sup>，最后注入北冰洋，入海口多年平均水量3 967亿m<sup>3</sup>。额尔齐斯河是其主要支流，发源于我国阿尔泰山东南坡，穿越中国、哈萨克斯坦和俄罗斯。在中国境内，河流长633 km，流域面积4.5万km<sup>2</sup>，多年平均水量111亿m<sup>3</sup>，由阿尔泰山南坡汇入额尔齐斯河的支流主要有喀腊额尔齐斯河、克兰河、布尔津河、哈巴河等。随着新疆北部地区经济社会的不断发展，对额尔齐斯河流域水资源的开发力度和规模的需求也在不断加大。目前，流域水资源综合利用矛盾突出，已建山区、平原水库40多座，过去这些水库仅注重传统的水量调度，而忽略了生态调度，造成河流生态系统需水长期得不到满足，鱼类、鸟类等动物的栖息地环境恶化，河谷植被、草场退化等生态问题突出。额尔齐斯河流域的生态问题是一项复杂的系统工程问题，必须综合考虑，为了破解这一难题，亟待研究额尔齐斯河骨干水库群的生态调度，维持河谷林草、湿地、湖泊等生态功能，适度恢复退化的生态系统，保障河谷林草湿地的生态安全。

## 2 水库群生态调度体系构建及关键技术

水库群按其分布形式可分为梯级水库群、并联水库群、混联水库群和跨流域水库群。水库生态调度分为以月为时段的多年长期调度；以旬为时段的关键生态季中期调度；以日为时段的关键生态月短期调度；以小时为时段的关键生态期实时调度等。在水库调度中，一般把中期与长期合并，称为水库中长期调度。下面主要对水库生态调度的定义、水库群生态调度体系构建及关键技术进行研究。

**2.1 水库群生态调度定义** 从国内外学者对水库生态调度的定义来看，所谓水库生态调度，是指兼顾生态的水库综合调度方式。Symphorian等<sup>[15]</sup>指出，生态调度是指水库调度时既要满足人类社会对水资源的各项需求又要满足河流生态系统的需要。董哲仁等<sup>[9]</sup>定义的多目标水库生态调度，是指水库在满足发电、灌溉、供水、航运、防洪等多种社会经济目标的前提下，同时兼顾河流生态需水的一种调度手段。张洪波<sup>[13]</sup>定义的水库生态调度，是指在水库运行与管理过程中兼顾考虑生态因素，在河流生态需水规律研究的基础上，通过调整水库调度和运行方式，从而尽量满足河流生态系统的需水要求。蔡其华<sup>[16]</sup>定义的水库生态调度，是指在满足大坝下游生态保护和库区水环境保护要求的基础上，充分发挥水库的防洪、发电、灌溉、供水、航运、旅游等各项功能，使水库对大坝下游生态和库区水环境造成的负面影响控制在可承受的范围内，并逐步修复生态与环境系统。以上水库生

态调度的定义大都是单库、局部河段，虽然考虑了生态需求，但忽略了生态的灌溉用水方式。因此，为了全面反映水库群在流域水资源综合利用的作用，以水库群生态调度为核心，考虑生态灌溉方式，本文给出了如下水库群生态调度定义。

水库群生态调度定义：根据流域水资源特性和综合利用原则，通过水库协调各部门需水要求，在满足人类社会对生活、生产用水的前提下，寻求维持生态系统平衡的水库蓄水与放水、拦洪与泄洪等合理的调度方案，采用合理的生态灌溉方式实现生态调度目标，发挥水库群综合利用效益，保障生态系统安全的水库控制运用技术。

**2.2 水库群生态调度体系构建思路** 额尔齐斯河水库群生态调度体系构建的总体思路是(如图1所示):以水库群生态调度模型和河谷生态系统滴漫灌溉为主线,通过建立水文过程与生态过程的耦合关系,实现保障河流健康、河谷生态系统安全的调度目标。

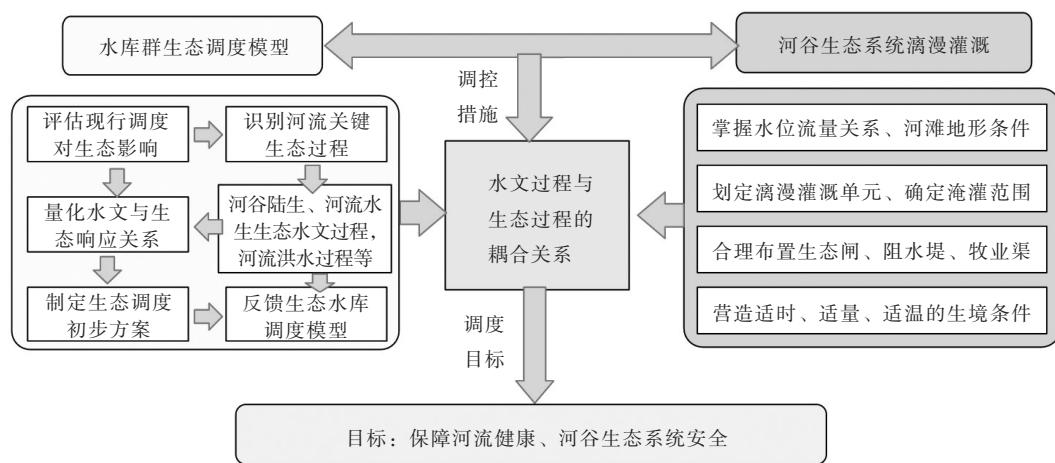


图1 额尔齐斯河水库群生态调度体系构建框架图

**2.3 宏观、中观、微观相互嵌套多尺度耦合的水库群生态调度体系构建** 水库群生态调度研究的尺度分为宏观、中观和微观调度。宏观尺度上，通过建立水库群中长期生态调度模型，在战略上揭示水库群多年生态调度规律，制定水库生态调度规则，获得不同水文年各生态供水期的可供生态水量，并作为中观尺度调度的边界条件，保证水库在多年运行期间的生态调度策略的科学和合理性；中观尺度上，建立水库群短期生态调度模型，利用中长期调度结果作为边界条件，旨在揭示水库群年内生态供水期的调度规律，得出水库生态关键生态期可供生态水量及过程作为微观尺度调度的边界条件，保证水库在年内生态调度策略的科学和合理性；微观尺度上，建立水库群实时生态调度模型，旨在揭示水库关键生态期调度规律，营造适宜生态系统的水库实时人工生态洪水过程，保证水库在生态关键期的生态调度方案的科学和合理性。基于上述考虑，本文构建了如图 2 所示的宏观、中观、微观相互嵌套多尺度耦合的水库群生态调度体系。

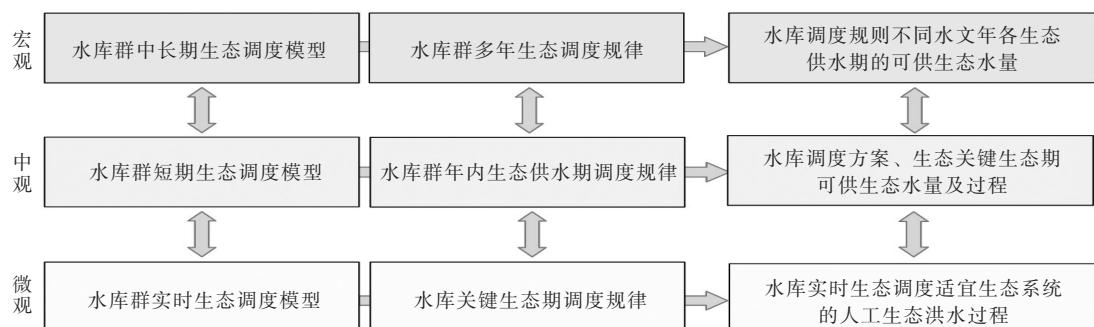


图2 水库群多尺度耦合的生态调度三层体系结构图

**2.4 水库生态调度关键技术** 在额尔齐斯河水库群生态调度体系中, 可凝练如下3个关键技术: 多时间尺度耦合的水库生态调度技术、多目标非线性水库调度模型求解技术和生态系统的滴漫灌溉技术, 如图3所示。

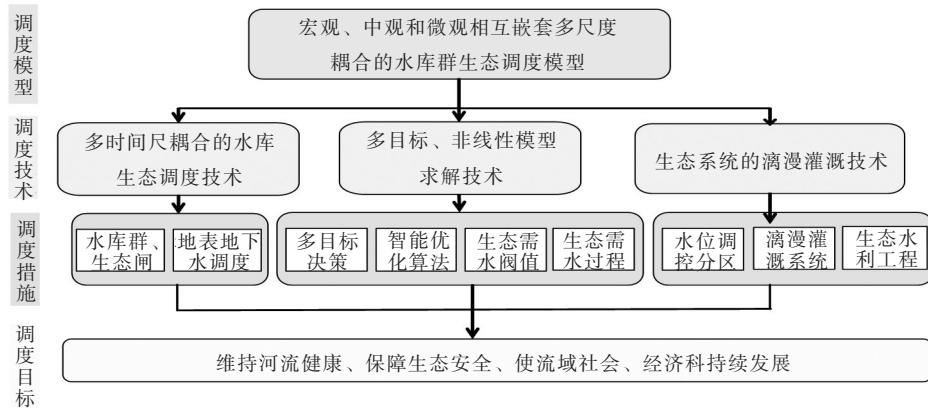


图3 额尔齐斯河水库群生态调度技术

(1) 多时间尺度耦合的水库生态调度技术。多时间尺度耦合的水库生态调度技术主要是将宏观、中观、微观尺度的调度策略与生态效益监测结果耦合为一个整体的技术, 旨在解决流域生态问题。水库群中长期生态调度是宏观尺度、短期生态调度是中观尺度、实时生态调度是微观尺度。宏观尺度的调度策略可提供不同水文年各生态供水期的水库可供生态水量以及水库控制水位, 中观尺度的调度策略可提供水库生态关键生态期可供生态水量及过程, 微观尺度调度策略可营造适宜生态系统的水库实时人工生态洪水过程。因此, 宏观、中观与微观尺度是相互嵌套结构, 并存在互动和互馈机制。最终, 评价调度效果好坏取决于对生态系统的监测。把监测生态系统效果反馈给宏观、中观与微观尺度的生态调度模型, 然后进行不断修正、迭代求解获得水库群生态调度规律。

(2) 多目标非线性水库调度模型求解技术。水库群生态调度模型具有复杂高维、多目标、动态、多阶段、非线性等特点, 该模型的求解是目前研究的热点和难点问题。水库群调度模型常用的求解方法包括常规法、模拟法、优化法和模拟优化法。多目标非线性水库调度模型求解技术是, 首先采用主次目标法处理多目标, 然后基于大系统协调思路将水库群分解为单库优化调度模型, 采用较成熟的非线性优化算法求解单库优化调度模型, 再通过协调各水库的水量平衡方程等, 经过多轮迭代求解水库群多目标调度模型的技术。

(3) 生态系统的滴漫灌溉技术。生态的灌溉与农业的灌溉非常相似, 但又有不同。农业灌溉已从传统的过大漫灌发展到了喷灌、滴灌等高效节水灌溉, 而生态灌溉研究相对滞后, 目前主要是过大漫灌, 或称淹灌。其缺点是耗水量较大, 不能做到精细灌溉。因此, 本文提出了一种新的生态灌溉方式。

生态系统的滴漫灌溉概念是本文的一个创新。首先解释滴漫的含义(经查阅康熙大字典): 滴为浅、薄, 浮薄, 水渗入地之意, 亦有通达、畅快之意; 漫常做漫溢讲, 水满向外流, 水面广阔, 微微动荡。滴漫灌溉定义: 根据河谷生态系统需水要求及生态分区, 利用水库群生态调度所营造的人造洪峰过程, 通过生态水利工程调控, 耦合生态与水文过程, 形成适时、适量、精细化的生态灌溉方式, 称之为滴漫灌溉。滴漫灌溉的核心在三个字上: 一是阻, 在下游减水河段修建生态闸、阻水堤、溢流口等工程措施; 二是引, 疏通河汉, 建设林草灌溉渠道; 三是漫, 形成水网通达, 水势漫溢, 浸没林草湿地的生态灌溉系统。滴漫灌溉系统则是在河谷生态区修建生态闸、壅水坝等生态水利工程, 形成水网通达, 水势漫溢, 浸没林草湿地的生态灌溉系统, 如图4所示。

生态系统的滴漫灌溉技术就是在河谷林草区、湿地, 建立生态滴漫灌溉系统, 采用滴漫灌溉的方式塑造有利于生态系统恢复的生态水文过程, 保证河谷林草能最大程度地吸纳水分, 达到最佳的生态效果。

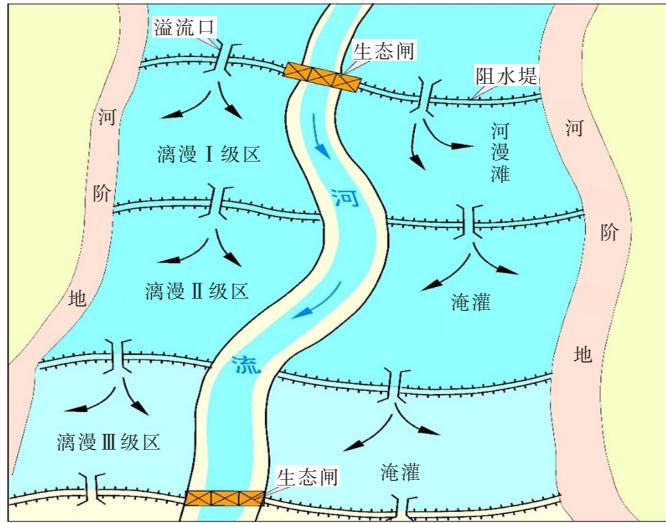


图4 滴漫灌溉技术

### 3 水库群生态调度模型建立及求解方法

宏观、中观、微观相互嵌套多尺度耦合的水库群生态调度体系的数学表达，本文简化为水库群中长期、生态关键期实时生态调度模型，下面分别论述。

**3.1 水库群中长期生态调度优化模型** 在满足流域生活工业供水、北疆供水、农业灌溉等综合用水的前提下，以保障河流健康、河谷生态系统安全为目标，建立多目标水库群优化调度目标函数。

#### 3.1.1 目标函数

①缺水量最小

$$\begin{aligned} \text{Min} F_1(\Delta W_1, \Delta W_2) &= \Delta W_1 + \Delta W_2 \\ &= \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [XSQ(j, t) - GSQ(j, t)] + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [XZQ(m, t) - GZQ(m, t)] \end{aligned} \quad (1)$$

②可调水量最大

$$\text{Max} F_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T W(n, t) \quad (2)$$

③综合效益最大

$$\text{Max} F_3 = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C(m)W(m, t) \quad (3)$$

④水电站群发电量最大

$$\text{Max} F_4 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T N(n, t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中： $\Delta W_1, \Delta W_2$  分别表示生态缺水量和社会经济缺水量； $XSQ, GSQ$  为生态需水量和生态供水量； $XZQ, GZQ$  为社会经济需水量和供水量； $J, j$  分别表示生态供水项目总数及编号； $M, m$  分别表示用水单元总数及编号； $T, t$  分别表示调度时期内总时段数以及编号； $C$  为供水单价； $N, n$  分别表示水库(或水电站)总数及相应编号， $N(n, t)$  为第  $n$  个电站  $t$  时段内出力； $\Delta t$  为时段长度； $W$  为水量。

#### 3.1.2 约束条件

(1)全局约束包括：

①保证率约束

$$P_m \geq P_{m_0} \quad (5)$$

②水量约束

$$W_{\text{地表}} + W_{\text{地下}} = W_{\text{工生}} + W_{\text{生基}} + W_{\text{外调}} + W_{\text{灌溉}} + W_{\text{湿地}} + W_{\text{湖泊}} + W_{\text{出区}} + W_{\text{损失}} \pm W_{\text{水库蓄供水}} \quad (6)$$

(2)局部约束包括：

①水量平衡约束

$$W_{\text{来水}}(n, t) = W_{\text{供水}}(n, t) + W_{\text{损失}}(n, t) \pm W_{\text{水库蓄供水}}(n, t) \quad (7)$$

②水位约束

$$Z_{\min}(n) \leq Z(n, t) \leq Z_{\max}(n) \quad (8)$$

③供水约束

$$\text{生态 } GSQ(j, t) \leq XSQ(j, t) \quad (9)$$

$$\text{各用水单元 } GZQ(m, t) \leq XZQ(m, t) \quad (10)$$

④出力约束

$$N_{\min}(n) \leq k_n Q(n, t) H(n, t) \leq N_{\max}(n) \quad (11)$$

⑤库容约束

$$V_{\min}(n) \leq V(n, t) \leq V_{\max}(n) \quad (12)$$

式中： $P_m$ ， $P_{m_0}$  分别为供水保证率和要求的供水保证率； $W$ 为水量； $Z$ 为水位； $GSQ$ ， $XSQ$  分别为生态供水量和需水量； $N$ 为出力； $k$ 为出力系数； $Q$ 为发电流量； $H$ 为水头； $V$ 为库容。

多目标函数一般可表达为：

$$\text{Max or Min} \{F_1, F_2, \dots, F_l\} \quad (13)$$

上述多目标模型的求解思路是，以生态和各部门的缺水量最小为主目标，将其他目标作约束条件处理，即将多目标模型转换为如下单目标模型进行求解：

$$\text{Ob. } \text{Min}(F_1) \quad (14)$$

$$\text{St. } ① \text{可调水量约束 } F_2 = XW_{\text{调}} \quad (15)$$

$$② \text{综合效益约束 } F_3 \geq B_0 \quad (16)$$

$$③ \text{发电量约束 } F_4 \geq E_{\text{设计}} \pm \Delta E \quad (17)$$

其他约束条件同上，不予列出。

**3.1.3 模型求解方法** 由于模型的复杂性，本文采用大系统协调分解法的思路将水库群调度分解为单库调度问题，将多库转化为相互有水利联系的单库子系统，对单一水库优化调度用动态规划(DP)法分别进行求解，再通过协调器经过多轮迭代进行求解。

**3.2 水库群短期生态调度优化模型** 生态调度关键期是指6月2日至6月14日的河谷林草生长的关键期。在生态调度关键期，应在满足北疆供水、生活工业用水、农业用水等条件下，以生态缺水量最小为目标，以日为计算时段，建立水库群短期调度模型。

(1)目标函数

$$\text{Min} F = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T [XSQ(j, t) - GSQ(j, t)] \quad (18)$$

(2)约束条件

约束条件同上，不予列出。

**3.3 水库群实时生态调度优化模型** 水库群实时优化调度的核心是考虑河道一维水动力模型，以水文过程与生态过程的耦合关系为依据，推求适宜于河谷林草生长的人工生态洪水过程。

**3.3.1 关键生态期的水库群实时优化调度模型建立** 以河谷林草生长关键期缺水量最小为目标，建立水库群实时生态调度模型如下：

$$\text{Ob. } \text{Min} \Delta W_{\text{林草}} = \sum_{t=1}^T (XQ(t) - GQ(t)) \cdot \Delta t \quad (19)$$

$$\text{St. } W_T = \sum_{t=1}^T GQ(t) \quad (20)$$

$$\left( \frac{Q(m,t) + Q(m,t+1)}{2} - \frac{q(m,t) + q(m,t+1)}{2} \right) \cdot \Delta t = V(m,t+1) - V(m,t) \quad (21)$$

$$GQ(1,t) = q(1,t) + q(2,t) + RQ(t) \quad (22)$$

式中： $W_T$ 为生态供水量，由中长期或短期调度模型计算得出； $T$ 、 $t$ 分别表示调度时期内总时段数及编号； $m$ 为水库编号； $q$ 为出库流量； $\Delta t$ 为时段时长度； $Q$ 为入库流量。

模型包括水库、生态闸和生态单元的约束条件以及一维河流演进水动力方程等，限于篇幅所限，在此忽略。

**3.3.2 模型求解方法** 水库群实时优化调度模型采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解，具体原理是，定义了一个约束主导原则，将优化问题区分为不可行解与可行解，对群体中任意两个个体优劣采用非支配原则进行判断，求解思路如下：①解 $a$ 是可行解而解 $b$ 不是可行解，那么解 $a$ 支配 $b$ ；②解 $a$ 与 $b$ 都不可行，但解 $a$ 的总体约束冲突值小于解 $b$ ，那么解 $a$ 支配 $b$ ；③解 $a$ 与 $b$ 都是可行解，且 $a$ 优于 $b$ ，那么解 $a$ 支配 $b$ 。

#### 4 应用实例分析

我国的额尔齐斯河流域已建水库达40多座。本文在水库群生态调度中，不考虑流域中的平原水库和小水库，仅考虑干支流中的大中型和生态水利工程，包括7座水库、25座生态闸、7条牧业大渠等。

流域内主要水库KLSK、LSW水库任务有防洪、北疆供水、工业生活用水、农业用水、生态供水和发电等；布尔津山口水库任务为防洪、流域内调水、工业生活用水、农业用水和发电等；克孜加尔水库任务是防洪、工业生活用水、农业用水、生态供水和发电等。

水库的调度规程是在汛期严格遵守防洪限制水位，汛末尽可能蓄满水库；按照调水、供水任务放水，同时兼顾发电，发电是“以水定电”。生态闸在生态供水期时开启，在非生态供水期时关闭。

按照水库、水电站、湖泊、湿地、灌区、取水点、补水点等，设置控制节点及控制断面，构造水资源系统网络节点图，如图5所示。

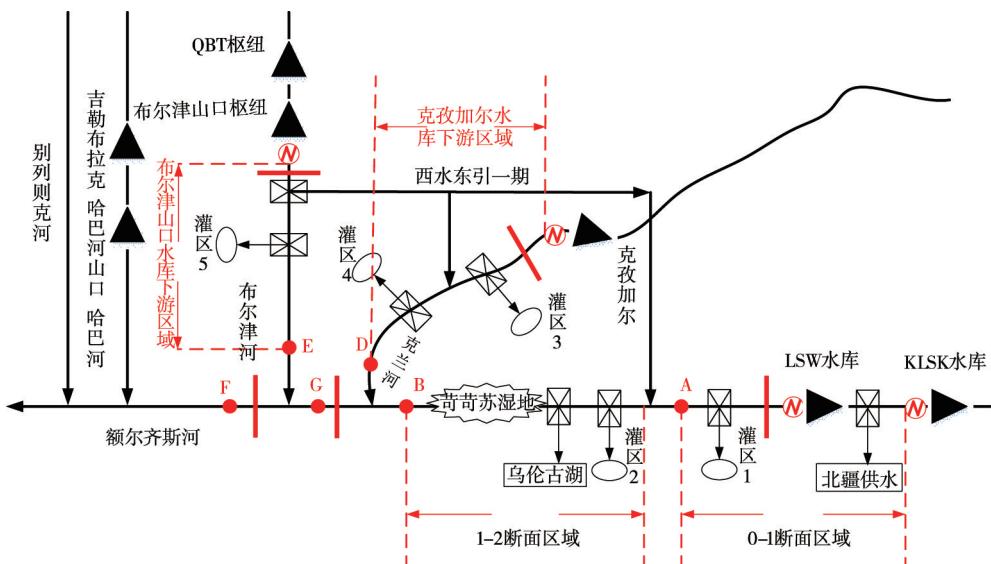


图5 额尔齐斯流水资源系统调度网络节点

**4.1 基本资料** 额尔齐斯河水库群生态调度采用的基本资料有工程资料、径流资料和需水资料等。工程资料包括7座水库水电站特征参数，25座生态闸、7条牧业大渠、北疆供水工程资料。径流资料包括KLSK、LSW、克孜加尔、山口等7座水库的入库径流，主要支流的径流资料等。需水资料包括生活工业、北疆供水、农业、生态、出区水量、乌伦古湖、发电用水资料等。其中，需水资料主要有各单元用水户的需水量、调水过程、灌溉用水过程、河道外生态用水、河道内生态用水等。河谷林草、湿地、湖泊生态耗水量为18亿 $m^3$ 。

**4.2 水库生态调度依据** 《额尔齐斯河流域综合规划》成果：额河河谷林草生态需水3.42亿 $m^3$ 、湿地生态需水4.08亿 $m^3$ ，额河向乌伦古湖补水6.5亿 $m^3$ 。其中额河中游生态调度重点关注区生态需水5.16亿 $m^3$ 。综合考虑河谷林草生态需水、河道生态基流和农业灌溉补给地下水等因素，满足生态调度重点关注区域河谷林草生态需水，需要上游水库泄水5.2亿 $m^3$ 。其中，需额河干流LSW水库供水4.46亿 $m^3$ ，克兰河克孜加尔水库供水0.74亿 $m^3$ 。在供水方式上，要求KLSK与LSW水库联合调度用人造洪水(最大洪峰大于800 $m^3/s$ )的方式下泄1~2次，对河谷林草进行漓漫灌溉。

根据各用水单元的重要程度及保证率要求，确定供水优先次序为：工业生活、生态基流、北疆供水、灌溉用水、河谷生态、乌伦古湖；对应各供水部门的保证率分别为：95%、90%、90%、75%、50%、50%。中长期以1959.5—2012.4共53年为调度期，其中5—7月为汛期，以旬为计算时段，8月—翌年4月为非汛期，以月为计算时段；短期即关键生态月调度，以日为计算时段；实时调度即关键生态期调度，为河谷林草关键期，以小时为时段。

**4.3 水库群中长期生态调度结果分析** 采用本文建立的水库群中长期生态调度优化模型求解获得的结果，如表1所示。总体上看，各用水单元在各节点和断面处的供水量均达到保证率要求。其中，工业生活由于需水量较少，保证率较高。

表1 中长期优化方案各用水单元保证率

断面	0-1断面	1-2断面	克孜加尔水库下游区域		山口水库 下游区域	节点G	节点F
			子区域①	子区域②			
北疆供水	92.5	—	—	—	92.5	—	—
工生	98.1	98.1	98.1	98.1	100.0	—	—
灌区	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3	—	—
苛苛苏湿地	—	50.9	—	50.9	—	—	—
乌伦古湖	—	50.9	—	—	—	—	—
生基	92.5	—	92.5	—	92.5	96.2	98.1
出区水量	—	—	—	—	—	—	60.4

作为用水大户的北疆供水和流域内引水，保证率均达到要求的90%，破坏深度为20%，连续缺水年不超过4年，如表2所示。说明通过水库群中长期调度，可以满足北疆供水和流域内综合用水要求。

表2 中长期优化方案引调水供水结果

用水户	需水量/亿 $m^3$	年平均缺水量/亿 $m^3$	破坏深度/%	缺水年数/a	保证率/%
北疆供水	18.0	3.6	20.0	4	92.5
西水东引	9.5	1.9	20.0	4	92.5

各断面灌区的供水结果见表3，其中灌溉保证率达到供水要求，破坏深度都在20%以内，连续缺水年不超过4年。对于需水量相对较大的农业灌区，通过水库群中长期水库调度，可以满足其用水要求。

表4是生态调度的主要结果，即河谷林草、湿地和乌伦古湖的生态调度结果。从总体上看，林草、湿地和湖泊的供水保证率达到50%的要求，最大连续缺水年数为4年，破坏深度为23.5%。

表3 中长期优化方案灌区供水结果

区域	需水量/亿m <sup>3</sup>	缺水年平均缺水量/亿m <sup>3</sup>	破坏深度/%	缺水年数/a	连续缺水年数/a	连续缺水年均缺水量/亿m <sup>3</sup>	保证率/%
0-1断面	2.85	0.47	16.5	12	2	0.45	77.3
1-2断面	3.39	0.56	16.5	12	2	0.55	77.3
克兰河水库下游	1.55	0.31	20.0	12	2	0.30	77.3
山口水库下游	4.62	0.92	19.9	12	2	0.90	77.3

表4 中长期优化方案河谷生态与乌伦古湖供水结果

区域	需水量/亿m <sup>3</sup>	平均缺水量/亿m <sup>3</sup>	破坏深度/%	缺水年数/a	最长连续缺水年数/a	连续缺水年平均缺水量/亿m <sup>3</sup>	保证率/%
河谷湿地	5.2	1.22	23.5	26	4	2.16	50.9
乌伦古湖	6.25	1.46	23.4	26	4	2.59	50.9

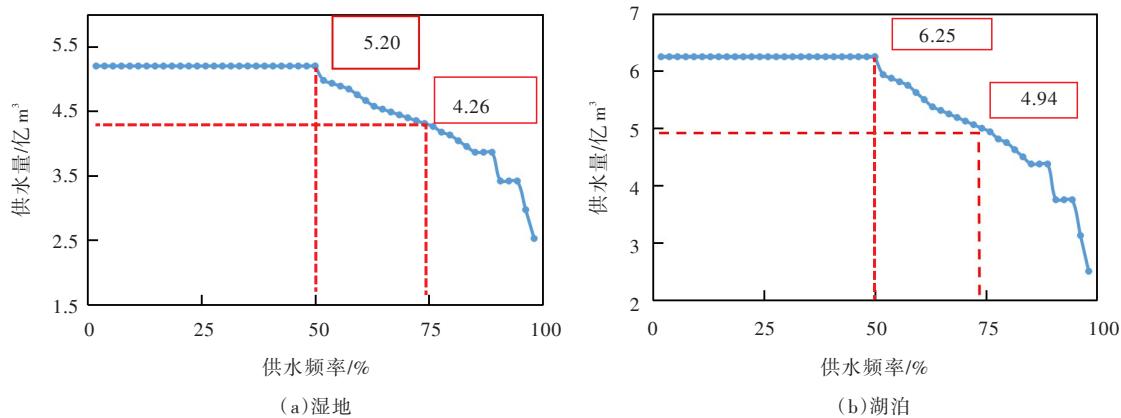


图6 不同供水频率下湿地、湖泊的供水量频率曲线

对湿地和湖泊的供水量绘制了如图7所示的生态供水频率曲线。图6结果表明，林草、湿地和湖泊的供水频率小于50%的供水量满足供水要求；供水频率50%~75%的供水量满足破坏20%深度的要求，供水频率大于75%的供水量破坏较为严重。

综上所述，水资源综合利用各部门的供水量及保证率均达到要求，其破坏深度、连续缺水年份也符合实际情况。本次中长期生态调度，调水量与设计相比，保证率没有变化；供水都达到了设计保证率；主要4座电站发电量设计值为117.93 kW·h，经过生态调度，发电量为119.51亿kW·h，增加了5%。

#### 4.4 水库群实时生态调度结果分析 生态关键期为2015年6月2—14日，由水库群中长期生态调度

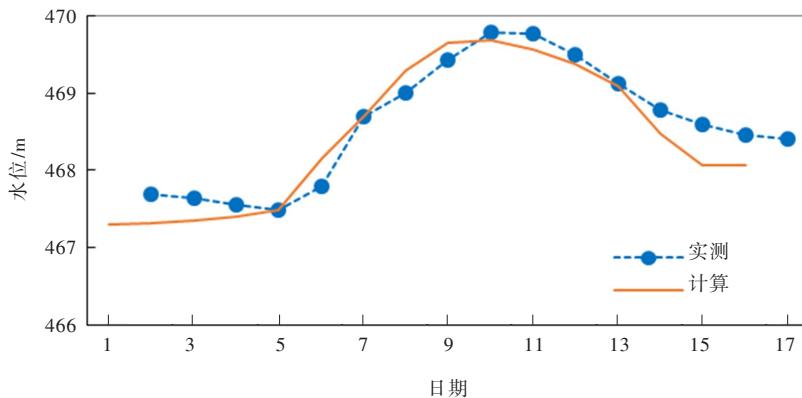


图7 水库群实时人工生态洪水过程(2015年6月)

模型提供的可供滴灌灌溉的水量为 $5.20 \text{亿 m}^3$ 。通过水库群实时生态调度模型和一维水动力模型HEC-RAS计算可知，在林草、湿地的水库实时人工生态洪水过程如图7所示。可以看出，模型计算与实测值比较接近，相对误差为0.04%，说明模型计算结果合理。

**4.5 河谷林草、湿地生态滴灌灌溉效果监测** 滴灌灌溉过程中，25座生态闸控制了180个控制单元，每个单元设置1~2个水位监测点，针对其中的20个主要观测点进行观测，如图8所示。河谷林草生态滴灌灌溉效果监测时间为2016年6月5—14日，监测内容包括范围、面积、水深等。其中，科克苏湿地实测的滴灌灌溉面积：6月8日为108.88万亩，6月9日为110.82万亩，6月14日为113.28万亩，水深从0.5 m到0.9 m，如图9所示。生态灌溉总面积为215.69万亩，说明水库实时人工生态洪水过程基本满足了230万亩河谷林草滴灌灌溉面积、水深等生态需水要求。本次生态调度对河谷林草的生长起到很大作用，经后期观察、调研可知，通过这次生态滴灌灌溉，河谷林草长势良好，一改在自然状态下林草的长势。

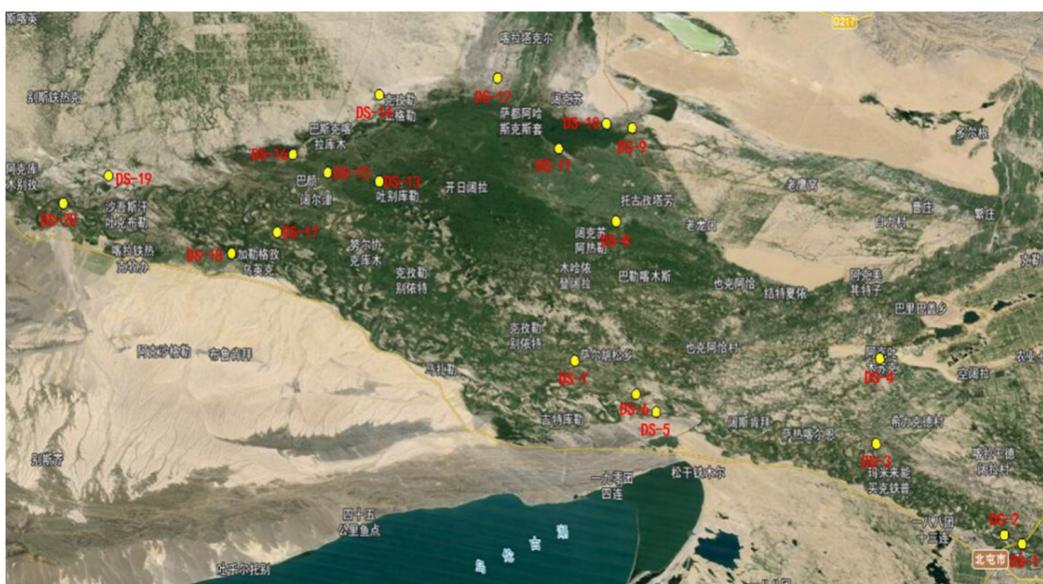


图8 河谷草地自动水位记录仪位置示意图

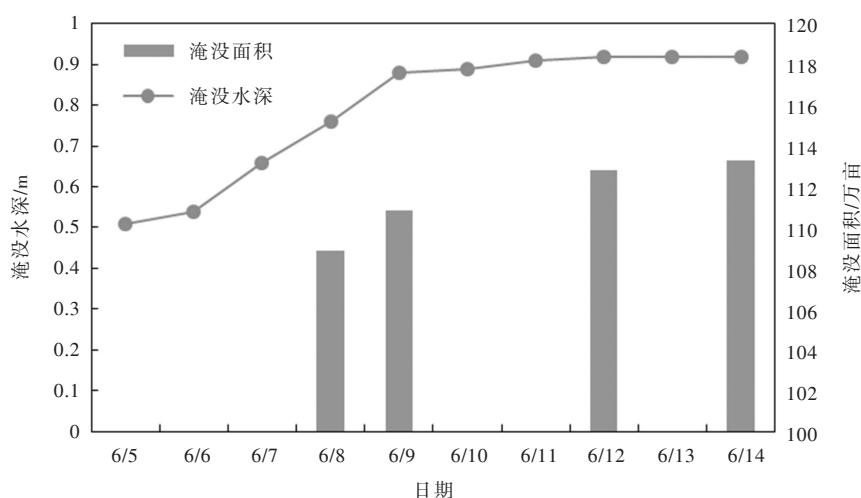


图9 科克苏湿地滴灌灌溉面积与水深

## 5 结论

随着新疆北部地区经济社会的不断发展，额尔齐斯河水资源综合利用矛盾十分突出，造成

河流生态系统需水长期得不到满足，河谷林草、湿地退化等生态问题突出。本文为了解决额尔齐斯河流域生态和水资源综合利用问题，进行了水库群生态调度研究，得到结论如下：(1)以保障河流健康、河谷生态系统安全为目标，构建了宏观、中观、微观相互嵌套多尺度耦合的水库群生态调度体系，定义了水库群生态调度，论述了其内涵，发展了水库生态调度的理论和方法。(2)构建了流域生态调度网络节点图，按照生态调度的原则和依据，建立了水库群多尺度、多目标生态调度模型，以及水库群中长期和实时生态调度模型。(3)针对水库群生态调度模型，提出了多时间尺度耦合的水库生态调度技术、多目标非线性水库调度模型求解技术和生态系统漓漫灌溉技术。其中，定义了漓漫灌溉、表述了其内涵，构建了生态系统漓漫灌溉系统。(4)通过水库群中长期生态调度模型长系列计算，结果表明：流域水资源综合利用各部门的供水量及保证率均达到要求，尤其是河谷林草、乌伦古湖补水均满足设计保证率要求，其破坏深度、最大连续缺水年数比较符合实际情况。(5)应用水库群实时生态调度模型进行了生态关键期的调度计算，结果表明：模型计算的河谷林草、湿地的水库人工生态洪水过程与实测值比较接近，相对误差为0.04%，说明模型计算结果合理；监测了河谷林草的漓漫灌溉效果，包括范围、面积、水深等，监测结果表明：水库人工生态洪水过程基本满足河谷林草漓漫灌溉面积、水深等生态需水要求。经后期观察、调研可知，通过这次生态漓漫灌溉，河谷林草长势良好。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] MAASS ARTHUR M M , et al . Design of water resource system[J] . Soil Science, 1962, 94(2): 135 .
- [ 2 ] SCHLUTER U . Überlegungen zum naturnahen Ausbau von Wasserläufen[J] . Landschaft und Stadt, 1971, 9(2): 72–83 .
- [ 3 ] PETTS G E . Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management[M] . John Wiley, 1984 .
- [ 4 ] HUGHES D A , ZIERVOGEL G . The inclusion of operating rules in a daily reservoir simulation model to determine ecological reserve releases for river maintenance[J] . WATER S A, 1998, 24(4): 293–302 .
- [ 5 ] KOEL T M , SPARKS R E . Historical patterns of river stage and fish communities as criteria for operations of dams on the Illinois River[J] . River Research and Applications, 2002, 18(1): 3–19 .
- [ 6 ] RICHTER B D , BAUMGARTNER J V , BRAUN D P , et al . A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J] . Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 14(4): 329–340 .
- [ 7 ] 李国英 . 基于水库群联合调度和人工扰动的黄河调水调沙[J] . 水利学报, 2006, 37(12): 1439–1446 .
- [ 8 ] 彭虹, 郭生练 . 南水北调对汉江下游藻类生长的影响及对策研究[J] . 环境科学与技术, 2003, 26(3): 1–3 .
- [ 9 ] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇 . 水库多目标生态调度[J] . 水利水电技术, 2007, 38(1): 27–32 .
- [ 10 ] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等 . 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J] . 水科学进展, 2008, 19(3): 325–331 .
- [ 11 ] 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等 . 水库生态调度模型及其应用[J] . 水利学报, 2010, 41(2): 134–141 .
- [ 12 ] 尹心安 . 河湖生态流量的水库调控模式(中文版)[D] . 北京: 北京师范大学, 2011 .
- [ 13 ] 张洪波, 黄强, 钱会 . 水库生态调度的内涵与模型构建[J] . 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(4): 427–433 .
- [ 14 ] 黄强, 赵梦龙, 李瑛 . 水库生态调度研究综述[J] . 水力发电学报, 2017, 36(3): 1–11 .
- [ 15 ] SYMPHORIAN G R , MADAMOMBE E , ZAAG P V D . Dam operation for environmental water releases; the case of Osborne dam, Save catchment, Zimbabwe[J] . Physics & Chemistry of the Earth Parts a/b/c, 2003, 28(20): 985–993 .
- [ 16 ] 蔡其华 . 充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式[J] . 中国水利, 2006(2): 14–17 .

## Study on ecological scheduling of multi-scale coupling of reservoir group

DENG Mingjiang<sup>1</sup>, HUANG Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Lianpeng<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Irtysh River Basin Development & Construction Administrative Bureau, Urumqi 830000, China;

2. Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education.

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The connotation of the ecological scheduling of the reservoir group was defined in this paper with an aim of finding the solution of the ecological problems in the Irtysh River Basin in China. In order to protect the health of the river and the safety of the valley ecosystem, the ecological multi-scale coupling scheduling system of the reservoir group with long, medium and short terms were constructed. According to the principle and basis of ecological scheduling, the multi-objective ecological reservoir scheduling model with multi-scale coupling, the long-mid-term, the short-term and real-time-term ecological reservoir scheduling were constructed. Then, the solution technology of multi-objective non-linear reservoirs group scheduling for multi-timescale coupling and the infiltration irrigation system were proposed. The infiltration irrigation was defined, and the infiltration irrigation system was developed. With the application of the above system, model and method, the results show that the long-mid-term scheduling model met the water supplement and guaranteed rate requirements of the comprehensive utilization of water resources in the Irtysh River Basin, especially the destruction depth of the ecological water supply in the valley and forest and the maximum continuous year numbers of water shortage. Regarding to the real-time-term ecological reservoir scheduling model, the model calculation and the measured value of the reservoir artificial ecological flood process for the river valley grassland, wetland are similar, the relative error was 0.04%, indicating that the result is reasonable. The effect of the river valley grassland, wetland is monitored including the range, area and water depth by real-time. The artificial ecological flooding process of the reservoir basically satisfied the requirement of irrigation area and water depth. It is of important theoretical significance and application value for the research results in maintaining river health in Irtysh River Basin, protecting the ecological security, solving the international river water resources utilization, and developing the reservoir group ecological scheduling theory and methods, which could provide an experience for ecological scheduling in north China.

**Keywords:** the ecological operation of reservoir group; multiple utilization of water resources; ecological operation system; multi-scale coupling scheduling model; artificial flood process

(责任编辑:祁伟)