

基于 SWAT-EFDC 模型的钦寸水库跨流域引水工程生态补偿标准研究

王一博¹, 陈思维¹, 许月萍¹, 王秀玲², 吴青松³, 俞剑锋³

(1. 浙江大学建筑工程学院; 2. 杭州智水工程咨询有限公司; 3. 新昌县水利水电局)

摘要: 基于 SWAT-EFDC 模型, 应用生态系统服务价值评估方法和合作博弈论方法, 对钦寸水库跨流域引水工程的生态补偿标准进行了对比分析。结果表明: 钦寸水库坝址处水资源量由基础情景下的 2.54 亿 m³ 下降至 1.28 亿 m³, 下游流域出口水资源量从 4.2 亿 m³ 下降至 2.94 亿 m³, 上游库区 COD_{Mn} 纳污能力降低 43.66%, NH₃-N 纳污能力降低 42.68%, 下游河道 COD_{Mn} 纳污能力降低 40.67%, NH₃-N 纳污能力降低 18.57%; 基于生态系统服务价值评估方法计算得出水源区生态补偿上限标准为 2.41 亿元, 而基于合作博弈论方法计算确定受水区生态补偿总额为 2.04 亿元, 其中水源区补偿额度为 15932 万元, 下游区补偿额度为 4419 万元。

关键词: 跨流域引水工程; 生态补偿; 生态系统服务价值; 合作博弈论; SWAT-EFDC 模型; 钦寸水库

Study on ecological compensation standards for inter-basin water diversion project of Qincun Reservoir based on SWAT-EFDC model// Wang Yibo¹, Chen Siwei¹, Xu Yueping¹, Wang Xiuling², Wu Qingsong³, Yu Jianfeng³
(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University; 2. Hangzhou Zhishui Engineering Consulting Co., Ltd.; 3. Xinchang County Water Resources and Hydropower Bureau)

Abstract: Based on SWAT-EFDC model, ecosystem service value assessment method and cooperative game theory were applied to conduct a comparative analysis of ecological compensation standards for inter-basin water diversion project of Qincun Reservoir. The results show that, water resource volume at dam site of Qincun Reservoir decreased from 254 million m³ in baseline scenario to 128 million m³, and water resource volume at outlet of downstream basin decreased from 420 million m³ to 294 million m³. Pollutant carrying capacity of COD_{Mn} and NH₃-N in upstream reservoir area decreased by 43.66% and 42.68%, respectively, while that in downstream river channel decreased by 40.67% and 18.57%, respectively. Upper limit of ecological compensation for water source area calculated by ecosystem service value assessment method is 241 million yuan, and total ecological compensation for water receiving area determined by cooperative game theory method is 204 million yuan, including 159.32 million yuan for water source area and 44.19 million yuan for downstream area.

Key words: inter-basin water diversion project; ecological compensation; ecosystem service value; cooperative game theory; SWAT-EFDC model; Qincun Reservoir

在全球气候变化与人类活动加剧的背景下, 水资源短缺、时空分布不均及水环境污染已成为威胁区域可持续发展的核心问题^[1]。据统计, 全球约 40% 的人口面临水资源短缺问题, 而我国水资源总量居世界第 6 位, 但人均水资源量仅为全球平均水平的 35%^[2]。跨流域引水工程作为解决水资源供需矛盾的有效途径, 虽然能够缓解水资源短缺的压力, 但也可能对生态系统产生重大影响, 其核心在于对自然水文情势的根本性改变。这种改变会引发连

锁反应, 包括下游流量减少与水位下降导致水体自净能力减弱, 污染物浓度升高; 上游水库蓄水淹没破坏并碎片化陆地及水生生境; 库区水流减缓、光照增强则助长藻类与病原体滋生等。工程建设引发的这些水文扰动与生态环境变化, 共同造成了生物多样性减少和水质波动加剧等问题。因此, 如何制定科学的生态补偿标准以平衡工程利益和生态保护, 成为当前研究的热点。

跨流域引水工程的生态补偿研究具有重要的现

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3201105); 浙江省科学技术厅尖兵领雁研发攻关计划项目 (2024C03255)

作者简介: 王一博 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: Wang_YB27@163.com

通信作者: 王秀玲 (1990—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水资源保护和节约用水管理研究。E-mail: 907264399@qq.com

实意义。一方面,近年来我国政府高度重视生态文明建设,推进生态补偿机制的建立,先后发布《关于健全生态保护补偿机制的意见》《关于加快建立流域上下游横向生态保护补偿机制的指导意见》《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》等文件,明确生态保护补偿的要求^[3];另一方面,人工引水工程的生态效应复杂,目前缺乏对工程驱动下水生态系统功能响应机制的系统认知。

目前,关于生态补偿标准的研究主要有4种方法:①基于生态保护成本的研究,聚焦于核算生态保护或恢复的直接投入。耿翔燕等^[4]提出了基于重置成本的差异化生态补偿标准模型,以小清河流域为例对各区域的补偿金额进行了测算;史晓燕等^[5]探讨了东江源区基于供给成本核定原则的生态补偿依据与核算方法,为东江源区生态补偿机制建立及实施提供了依据。②基于生态系统服务价值的研究,通过量化生态系统提供的服务价值来确定补偿标准。刘春芳等^[6]以石羊河流域为例,依据主要生态系统服务的特征,确定了受偿区和支付区的范围并明确了补偿标准;崔树彬等^[7]构建了东江流域生态补偿机制,通过量化水资源价值、生态系统服务价值及保护成本,确立了生态补偿标准框架。③基于补偿意愿与受偿意愿的研究,引入经济学和社会学视角,关注利益相关者的支付或接受意愿。李丽等^[8]提出一种基于博弈理论的流域生态补偿方法,以西江压咸补淡调度为例,利用水资源价值法和损失成本法计算补偿上下限,并通过讨价还价博弈模型确定最终补偿标准;李继清等^[9]基于演化博弈理论,构建了跨流域调水工程生态补偿演化博弈模型。④基于生态足迹的计算,将人类活动对自然资源的消耗纳入核算体系。李欣蔚^[10]基于水足迹视角,研究了2010—2020年长江经济带流域整体及各区域的生态补偿主体、客体及补偿标准;李继清等^[11]通过构建水足迹与生态补偿标准模型,对江西省及11地市水足迹与水生态补偿标准进行了估算。除此之外,Guo等^[12]构建了两阶段补偿标准分配模型,并采用优化的BiLSTM-multi-head attention方法建立了生态系统服务价值预测模型;Jiang等^[13]以湖南省湘江流域为例,通过引入生态补偿准则,建立了覆盖上下游地区的跨流域污染动态最优控制策略微分博弈模型。上述研究在方法和应用上均取得了显著进展,为生态补偿标准制定提供了重要基础,但仍存在一定局限:①空间异质性刻画不足,多数研究基于行政单元或较大流域尺度,难以精细反映流域内部不同区域在生态过程、成本与价值上的显著空间差异;②动态过程模拟欠缺,补偿标准核算未能充分整合

复杂的水文循环、污染物迁移转化等动态过程及其时空变异性。为了更科学、精细地核算流域生态补偿标准,亟须一种能够充分耦合水文与水环境动力过程的综合模型框架。

钦寸水库跨流域引水工程作为浙江省重点水利项目,旨在通过水资源调配缓解宁波等地区的水资源短缺问题,但工程实施会改变库区及下游的水文条件,引发水质波动、污染物迁移等生态风险。本文构建基于SWAT-EFDC模型的生态补偿标准研究框架,模拟钦寸水库跨流域引水工程建设前后水源区与下游区的水生态环境变化,结合生态系统服务价值评估方法与合作博弈论方法,从生态价值转移与利益主体博弈两个维度,建立差异化的钦寸水库跨流域引水工程生态补偿核算体系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

钦寸水库跨流域引水工程位于曹娥江水系的黄泽江流域,是向宁波引水的关键工程。黄泽江发源于宁海-新昌交界的望海岗,经新昌至嵊州浦口汇入曹娥江^[14]。钦寸水库坝址控制集水面积316 km²,主河道长40.5 km,工程于2010年9月动工兴建,2017年3月竣工,2019年12月通过完工验收。钦寸水库跨流域引水工程通过28.17 km输水隧洞(设计流量4.66 m³/s)向宁波年供水1.26亿 m³。黄泽江流域概况如图1所示。

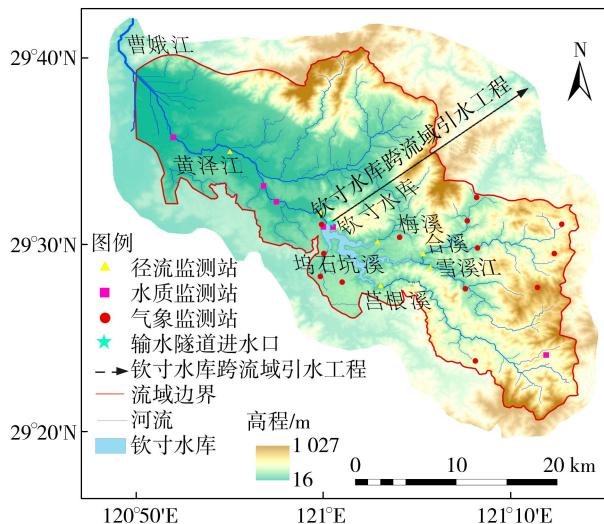


图1 黄泽江流域概况

Fig. 1 Overview of the Huangze River Basin

1.2 数据来源

a. SWAT模型、EFDC模型构建数据包括:

①30 m分辨率数字高程模型数据来源于中国科学院地理空间数据云平台;②土地利用数据取自中国科学院资源环境科学数据中心;③土壤质地、有机质

等土壤属性数据采用世界土壤数据库;④降水、气温、湿度等逐日气象观测数据由新昌县气象局提供;⑤合溪、苕根溪、梅溪、雪溪江 4 条入库支流、取水口的逐月流量、水位、水温等水文数据与总磷(TP)等水质监测数据由钦寸水库管理中心提供。

b. 生态系统服务价值评估模型构建数据包括:2005 年、2020 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;新昌县 2020 年粮食平均产量数据引自《新昌县统计年鉴(2021 年)》;全国粮食平均收购价格数据取自《中国农产品价格调查年鉴(2021)》。

2 研究方法

通过 SWAT 模型评估引水前后黄泽江下游水文与水质变化,运用 EFDC 模型解析库区水动力特征及水质响应;结合生态系统服务价值评估法,量化水源涵养等生态功能的经济损失,建立生态补偿核算基准。同时,引入合作博弈理论协调跨流域利益分配,构建多方协商机制设计补偿方案,最终形成统筹生态保护与区域发展的生态补偿标准体系。研究技术路线见图 2。

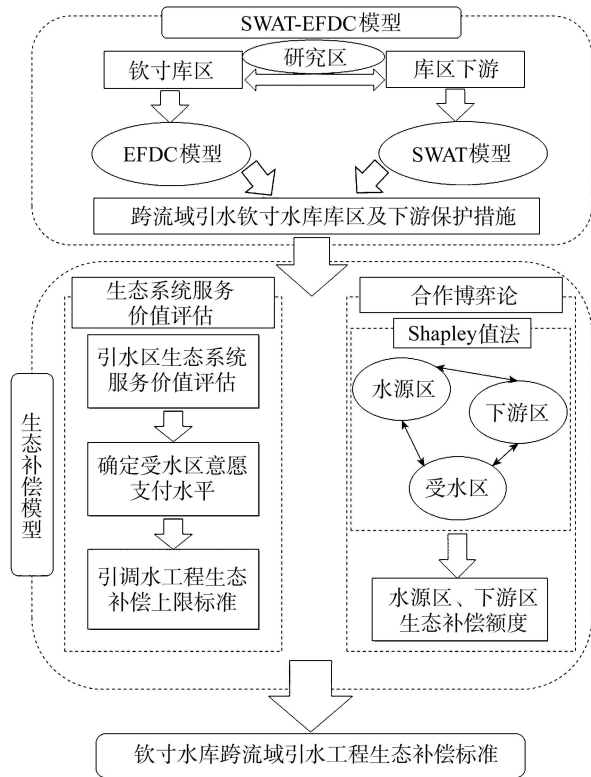


图 2 研究技术路线

Fig. 2 Technical route of research

2.1 SWAT-EFDC 模型的构建

采用 SWAT 模型对黄泽江下游河道进行一维模拟,以精确捕捉下游水质与流量的变化情况,揭示跨流域引水对下游水环境的影响^[15]。采用 EFDC

模型对钦寸水库范围开展二维模拟,精准模拟库区水质的时空变化过程^[16]。EFDC 模型的出库流量作为下游 SWAT 模型中钦寸水库坝址处的流量输入,有效连接了下游流量与库区库容变化的动态响应。

模型构建过程主要包括模型参数的输入、率定和验证。输入模型基本参数后,开展参数率定和验证。验证 SWAT-EFDC 模型水质模拟结果时,将模拟值与实测值相对误差小于等于 30% 的月份记作合格月,合格月数量占模拟总月份比例大于或等于 60% 即判定模拟结果良好^[17]。

a. 依托 ArcGIS 和 30 m 分辨率 DEM 数据构建 SWAT 模型并划分流域,划定 33 个子流域及 282 个水文响应单元(HRU),并设置关键点,如黄泽站、钦寸水库出口、流域出口等。在模型参数设置中,根据土地利用数据指定 HRU 类型,设置植被、蒸腾系数等参数。通过 SWAT 模型计算水文过程,使用污染源排放系数估算面源污染。借助 SWAT-CUP 软件、SUFI-2 算法,选取 28 个相关参数进行模型率定。以纳什效率系数作为率定目标函数,单次率定循环 2000 次,共计循环 3 次,逐步调整参数范围。

b. 依据库区卫星影像确定 EFDC 模型空间边界,划分 2891 个 50 m×50 m 矩形网格作为基本计算单元;采用重采样为 50 m 分辨率的 DEM 数据构建库区地形,边界条件包括合溪、苕根溪、梅溪、雪溪江 4 条支流入库流量数据、水质监测数据,以及逐日气象数据。模型干边界设为 0.05 m,湿边界设为 0.15 m。模型先率定水动力参数,其底部粗糙度取值 0.01 m,再进行水质参数率定。水动力参数率定过程中选取纳什效率系数、平均相对误差、平均误差作为目标函数。钦寸水库引水口水口实测总氮(TN)质量浓度均超出了 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅱ类水标准。将易超标的 TN 作为主要控制指标,选择模拟 COD_{Mn} 、TN、TP 3 个指标,并率定与之相关的 13 个参数。

c. 结合跨流域引水工程水质保障要求,以钦寸库区地表水Ⅱ类标准、下游Ⅲ类标准为双控目标,利用 SWAT-EFDC 模型开展多情景模拟分析,筛选达标污染削减治理方案。受库区水质数据的限制,选择以月尺度水质数据作为输出结果。为规避时间跨度不一致带来的分析偏差,将库区、下游模拟结果分别与基础情景(建库前、无引水)实测水质数据进行对比核算。

2.2 生态系统服务价值评估法

2.2.1 生态系统服务价值确定

以 Costanza 等^[18]构建的全球生态系统服务价值量化评估框架为基础,结合谢高地等^[19-20]提出的

中国生态系统服务价值当量因子法,构建研究区生态系统服务价值评估模型。研究区陆地生态系统服务总价值为:

$$V = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m A_j E_a e_{kj} \quad (1)$$

其中

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{A'_i p_i q_i}{M}$$

式中: V 为研究区生态系统服务总价值; A_j 为第 j 种土地类型总面积; e_{kj} 为第 j 种土地类型第 k 类生态系统服务功能的当量因子,参考中国生态系统单位面积生态系统服务当量表^[20]; m 为土地类型数; E_a 为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值; n 为粮食种类数; p_i 为粮食 i 平均价格; q_i 为粮食 i 单产; A'_i 为粮食 i 种植面积; M 为 n 种粮食作物种植总面积。

2.2.2 生态补偿资金量确定

a. 确定应予补偿的生态系统服务价值。确定受水区生态补偿对应的生态系统服务价值需分为两步进行^[21]:第一步,明确水源区提供的生态系统服务种类,主要包括水源涵养功能,如淡水过滤、持留、储存和供水^[22];第二步,确定受水区获益比例,受水区应根据实际获益支付补偿,通过计算受水区调水量与水源区水资源总量的比值来确定生态系统服务补偿价值^[23]。据此,受水区应补偿的生态系统服务价值 V' 为:

$$V' = [V_r + V_w(1 - I - S)] \frac{W_r}{W} \quad (2)$$

式中: V_r 为水生态系统的生态系统服务价值; V_w 为除水体外森林、草地、农田、湿地生态系统水源涵养生态系统服务价值; I 为林冠截留率; S 为林地蒸散率; W_r 为受水区每年的总调水量; W 为水源区水资源总量。

b. 确定受水区意愿支付水平。依据 Pearl 生长曲线模型^[24],计算生态系统服务价值调节系数 L :

$$L = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (3)$$

其中

$$t = \frac{1}{E_n} - 3$$

式中: t 为社会发展阶段; E_n 为恩格尔系数。

最终的生态补偿上限标准 V^* 为:

$$V^* = V' L \quad (4)$$

2.3 基于合作博弈论的跨流域引水补偿标准模型

合作博弈论考虑每个参与者之间的协作关系^[25]。钦寸水库上游在生态产品生产环节具有比较优势,而宁波市作为受水方则在实物产品生产方面占据优势。采用 Shapley 值法作为分配方法,依

据各方边际贡献率合理分配合作增量收益,实现合作共赢^[26]。

将钦寸水库上游保护方(以下简称“上游方”)记为 U ,钦寸水库下游保护方(以下简称“下游方”)记为 D ,受水方记为 R 。将三方作为一个整体,组成合作博弈关系 (N, v) , $N = \{U, D, R\}$, $v(S)$ 为集合 N 中任意子集 S 对应的特征函数,表示合作时联盟整体 S 所获得的收益。该联盟整体需满足以下两个条件^[27]:①若任意联盟 S_1 与 S_2 无交集,则 S_1 与 S_2 所构成新联盟的收益大于等于联盟 S_1 与 S_2 各自行动的收益之和,即群体理性原则。②各参与者在合作中获得的收益不少于单独行动时,即个体理性原则。记 $\varphi_l(v)$ 为参与者 l 因参与合作获得的收益。

对于 R 而言,其收益取决于调水资源在当地的社会经济价值。对于 U, D ,在未调水时享有较高的用水权和排污权,调水启动后,通过放弃部分权利和收益,换取更大的联合利益^[28]。钦寸水库生态补偿在不同合作联盟下的调水收益分配情况见表1。

表1 不同合作联盟下调水收益分配情况

Table 1 Allocation of water transfer benefits under different cooperative alliances

联盟组成情况	联盟调水收益增量
$\{U, D, R\}$	$v(U, D, R) = F_1 - C_U - C_D$
$\{U, R\}$	$v(U, R) = F_2 - C_U$
$\{D, R\}$	$v(D, R) = F_3 - C_D$
R	$v(R) = F_4$
缺少受水区	$v(U) = 0, v(D) = 0, v(U, D) = 0$

注: F_1, F_2, F_3, F_4 为联盟收益; C_U, C_D 为边际成本。

根据 Shapley 值法开展钦寸水库生态补偿利益分配分析,通过系统评估 U, D, R 3类主体在所有可能合作联盟中的边际贡献值,并结合各合作组合对应的权重系数,最终量化得出各利益相关方应得补偿额。

3 结果与分析

3.1 SWAT-EFDC 模型模拟结果

3.1.1 率定与验证结果

SWAT 模型径流率定和验证结果见图3。可见,率定期相关系数为0.8,纳什效率系数为0.76;验证期相关系数为0.78,纳什效率系数为0.65。整体表现良好,证明了模型的适用性。

基于2021—2023年实测数据分析,TN为关键因子,部分月份水质超地表水IV类标准。水质模拟结果显示,TN、TP、氨氮模拟合格率分别为63.9%、61.1%、61.1%,均满足要求。

EFDC 模型水力模拟验证选用2023年3月1日至12月31日逐日实测水位数据(图4),纳什效

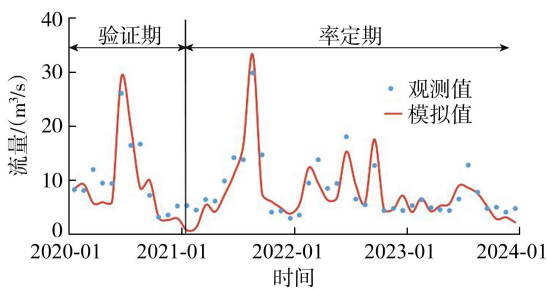


图3 SWAT模型流量率定与验证结果

Fig. 3 SWAT model streamflow calibration and validation results



图4 EFDC模型钦寸库区水位验证结果

Fig. 4 EFDC model calibration for water level verification results in Qinxu Reservoir

率系数达 98.9%，平均相对误差 0.177%，平均误差 0.089 m。验证结果表明，该模型可精准表征库区实际水动力变化规律，具备较高的可靠性和准确性。

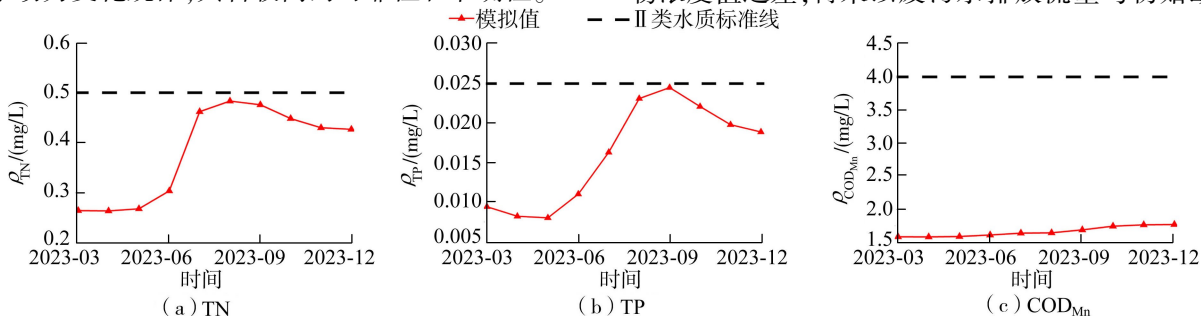


图5 治理情景下钦寸库区水质模拟结果

Fig. 5 Water quality simulation results of Qincun Reservoir under management scenarios

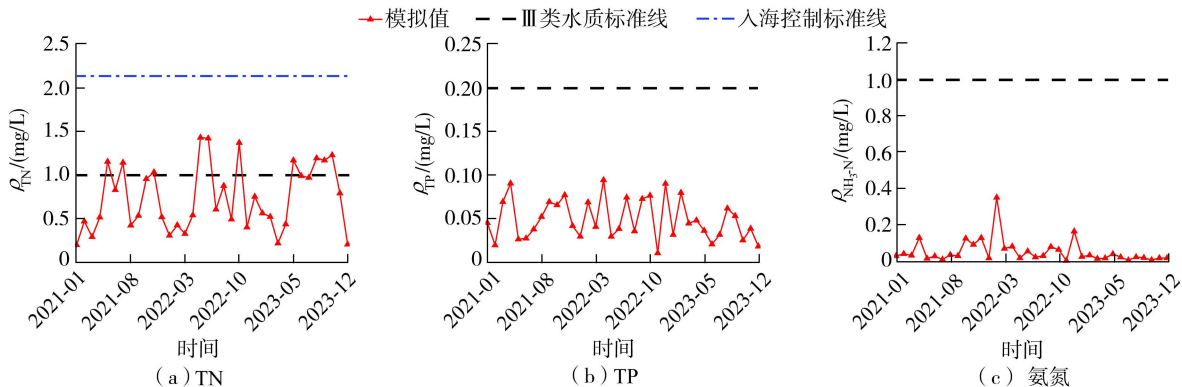


图6 治理情景下下游出口断面水质模拟结果

Fig. 6 Water quality simulated results at downstream outlet section under management scenarios

EFDC 模型水质模拟结果表明, COD_{Mn} 的合格月数量为 8, 合格率达 80%; TN 合格月数量为 6, 合格率为 60%; TP 的合格月数量为 6, 合格率达 60%。综上所述, 模拟结果均符合要求。

3.1.2 情景模拟结果

钦寸水库库区治理方案为: 农村污水处理达到 DB33/973—2021《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》一级标准, 一级、二级保护区以及苜根流域范围准保护区 30% 的农用地和林地全部流转, 不耕种。对应治理情景 TN、TP、 COD_{Mn} 模拟结果见图 5, COD_{Mn} 与 TP 质量浓度均未超过地表水 II 类标准, TN 最高值出现在 2023 年 8 月, 为 0.48 mg/L, 符合地表水 II 类标准。

钦寸水库库区下游治理方案为: 选定 50% 作为引水量占比, 截污纳管率为 100%, 农村生活污水治理控制在 DB 33/973—2021《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》二级标准。对应治理情景下下游出口断面 TN、TP 和氨氮质量浓度模拟结果见图 6, TP 和氨氮均未超过地表水 III 类标准, TN 最高值在 2022 年 5 月, 为 1.49 mg/L, 符合入海控制标准 (2.14 mg/L)。

根据《水域纳污能力计算规程》, 分别计算基础情景与治理情景下研究区纳污能力的变化。水域纳污能力由治理情景下污染物浓度值与初始断面污染物浓度值之差, 再乘以废污水排放流量与初始断面

入流流量之和求得。

钦寸水库建库前后坝址水资源量分别为 2.54 亿、1.28 亿 m³,建库后减少了 49.61%,说明工程引水致使坝址水资源量大幅缩减。流域出口水资源量建库前后分别为 4.2 亿、2.94 亿 m³,减少了 30.00%,表明全流域水资源在整体减少。治理情景下,上游库区因水质标准由Ⅲ类提升为Ⅱ类,排污权下降,其中 COD_{Mn} 排污权由基础情景的 594.93 t/a 降至治理情景的 335.16 t/a,纳污能力下降 43.66%;氨氮由 120.41 t/a 降至 69.02 t/a,纳污能力下降 42.68%。下游河道水量减少,排污权在治理情景下有所下降,其中 COD_{Mn} 排污权由基础情景的 1460.56 t/a 降至治理情景的 865.16 t/a,纳污能

表 2 钦寸水库引水工程水源区单位面积生态系统服务价值

Table 2 Unit-area ecosystem service value of water source region for Qincun Reservoir diversion project

因素	生态系统服务功能价值/(元/hm ²)					
	森林	草地	农田	湿地	水体	荒漠
气体调节	9296.27	3227.87	1549.38	5186.11	1097.48	129.11
气候调节	8758.29	3356.99	2087.36	29158.43	4432.948	279.75
水文调节	8801.33	3270.91	1656.97	28921.72	40391.43	150.63
水土保持	8650.69	4820.29	3163.31	4282.31	882.28	365.83
废物处理	3701.29	2840.53	2991.16	30987.56	31955.92	559.50
生物多样性保护	9705.13	4024.08	2194.95	7940.56	7381.07	860.77
食物供给	710.13	925.32	2151.91	774.69	1140.51	43.04
原材料供给	6412.70	774.69	839.25	516.46	753.17	86.08
文化娱乐	4475.98	1872.17	365.83	10092.48	9554.50	516.46

根据研究区森林、草地、农田、水体等土地利用类型的面积,通过式(1),计算得出 2005 年(工程建设前)与 2020 年(工程建设后)水源区生态系统服务总价值分别为 16.47 亿、16.79 亿元(表 3)。其中,森林与草地生态系统服务价值变化较小,农田生态系统服务价值变化较大,而水体生态系统服务价值变动最显著,增加了 0.712 亿元,这主要是因为钦寸水库的建设增加了研究区的水体面积,从而显著提升了水体生态系统的服务价值。

表 3 2005 年、2020 年钦寸水库引水工程水源区生态系统服务价值变化

Table 3 Changes in ecosystem service values of water source area of Qincun Reservoir diversion project in 2005 and 2020

年份	生态系统服务价值变化/亿元				合计/亿元
	森林	草地	农田	水体	
2005 年	15.370	0.190	0.876	0.034	16.470
2020 年	15.071	0.193	0.776	0.746	16.786

3.2.2 生态补偿资金总量

首先明确受水区应予补偿的生态系统服务价值,如表 4 所示,2020 年水体生态系统服务总价值为 0.75 亿元,而森林、草地和农田水源涵养生态系统服务价值总和为 16.04 亿元。

力降低 40.67%;氨氮由 243.43 t/a 降至 198.51 t/a,纳污能力下降 18.57%。

3.2 基于生态系统服务价值估算法的生态补偿计算

3.2.1 水源区生态系统服务价值评估

根据《新昌县统计年鉴(2021 年)》《中国农产品价格调查年鉴(2021)》,2020 年新昌县平均粮食产量为 5579.04 kg/hm²,全国粮食平均收购价格为 2.7 元/kg,根据式(1)计算得到单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值为 2151.91 元/hm²。依据谢高地等^[20]提出的中国生态系统服务价值当量因子法,计算得出钦寸水库引水工程水源区生态系统单位面积生态系统服务价值,见表 2。

表 4 2020 年钦寸水库引水工程水源区生态系统服务价值

Table 4 Ecosystem service value of water source area of Qincun Reservoir diversion project in 2020

因素	生态系统服务价值/亿元				合计/亿元
	森林	草地	农田	水体	
气体调节	2.32	0.02	0.07	0.01	2.42
气候调节	2.18	0.03	0.10	0.03	2.34
水文调节	2.19	0.03	0.08	0.31	2.60
水土保持	2.15	0.04	0.14	0.01	2.34
废物处理	0.92	0.02	0.14	0.24	1.32
生物多样性保护	2.42	0.03	0.10	0.06	2.60
食物供给	0.18	0.01	0.10	0.01	0.29
原材料供给	1.60	0.01	0.04	0.01	1.65
文化娱乐	1.11	0.01	0.02	0.07	1.22
合计	15.07	0.19	0.78	0.75	16.79

森林生态系统林冠截留率均值为 25%^[29-30],将其作为水源区林冠截留率的参考值;基于冯静怡等^[31]的研究成果,结合绍兴市多年平均降水量,得出研究区林地蒸散率约为 35%;水源区多年平均水资源量为 2.54 亿 m³,工程建设通水后,受水区多年调水量为 1.26 亿 m³,则根据式(2)得到受水区应补偿生态系统服务价值为 3.55 亿元。综合考虑受水区的经济发展水平与支付能力,受水区恩格尔系数为 0.27,根据式(3)确定调节系数为 0.68,最终得

到钦寸水库引水工程水源区生态补偿上限标准为 2.41 亿元。

3.3 基于合作博弈论的生态补偿模型计算

3.3.1 水源区损失

对钦寸水库上游引水过程中产生的取水权和排污权损失进行量化计算。总损失量等于取水权单价乘以引水前后取水权量的变化量,再加上排污权单价乘以引水前后排污权量的变化量。

以嵊州市为基准区,计算基准区与研究区人均可支配收入差值,以评估发展权受限的经济损失。经济与社会发展损失等于研究区城镇居民人口乘以基准区与研究区镇居民人均可支配收入的差值,再加上研究区农业人口乘以基准区与研究区农民人均可支配收入的差值。

钦寸水库跨流域引水工程上游总损失约 11 104 万元,其中资源性损失包括取水权损失(4 725 万元)和排污权损失(103.9 万元),合计 4 828.9 万元;经济与社会发展损失基于 4.2 万农村人口(人均可支配收入 41 914 元)及区域农村经济水平(参考值 43 408 元),经核算为 6 274.8 万元。

3.3.2 下游区损失

钦寸水库跨流域引水工程下游总损失约 1 814 万元,其中资源性损失包括取水权损失(1 575 万元)和排污权损失(238.16 万元);因下游发展权未受制约,区域经济损失值为 0。

3.3.3 计算结果

按照受水区用水结构和现行水价,计算不同联盟组合情况下受水区的收益情况。当联盟组成 $\{U, D, R\}$ 时,受水区收益为 5 670 万元;当联盟组成 $\{U, R\}$ 时,受水区收益为 4 253 万元;当联盟组成 $\{D, R\}$ 时,受水区收益为 1 418 万元;当联盟只有 R 时,受水区收益为 0 万元。按照表 1 计算受水区需支付的补偿金额为 9 452 万元(其中上游水源区补偿金额为 7 757 万元,下游区补偿金额为 1 695 万元)。

分析受水区收益的合理性,将受水区收益扣除应支付的补偿成本、水资源保护成本(6 950.11 万元),得到受水区实际收益为-10 732 万元,即受水区处于亏损状态,现状执行水价过低。以现状执行水价为基础,上调供水区综合水价,计算不同水价情况下受水区实际收益情况,将受水区实际收益大于 0 时的水价作为推荐的综合水价,见表 5。经计算,当综合水价达到 7.1 元/t 时,受水区实际收益大于 0,其中水源区补偿额度为 15 932 万元,下游区补偿额度为 4 419 万元。按照合作博弈论的协商交易法,确定受水区生态补偿总额为 2.04 亿元。

表 5 受水区不同售水价格(综合水价)联盟收益
Table 5 Alliance benefits under different water selling prices (comprehensive water prices) for water-receiving area

综合水价/ (元/t)	受水区需支付 生态补偿总 金额/万元	水源区获得 补偿资金总 额/万元	下游地区获得 补偿资金总 额/万元
5.37	9452	7757	1695
6.50	16571	13097	3474
7.00	19721	15459	4262
7.10	20351	15932	4419
综合水价/ (元/t)	三方联盟受水 区收益/万元	受水区收益、 补偿、保护费用 差值/万元	水源区收益 与损失费用 差值/万元
5.37	5670	-10732	-3346
6.50	19908	-3613	1993
7.00	26208	-463	4356
7.10	27468	167	4828

3.4 两种计算方法的结果分析

理论层面来看,生态系统服务价值评估法依托生态参数静态评估水源保护价值,侧重植被、水质等生态系统服务价值量的核算^[32],但易受数据缺失与主观估值影响;合作博弈论法基于 Shapley 值法模拟多方策略互动,通过联盟收益函数量化调水成本分摊与权益分配^[33-34],强调动态协商机制。生态系统服务价值评估法局限于水源区和受水区两方,而合作博弈论法则覆盖受水区、水源区及下游三方权益。

后续研究可考虑将二者在实践中结合使用,运用生态系统服务价值评估法对保护区的生态价值进行量化分析,借助合作博弈论法确定多方合作获益情况,并分摊补偿金额,这样既体现生态保护的经济意义,又通过博弈规则保障合作的可行性。

4 结 论

a. 从模拟结果看,钦寸水库库区坝址处水资源量由基础情景下的 2.54 亿 m^3 下降至 1.28 亿 m^3 ,减少了 49.61%,下游流域出口水资源量由基础情景下的 4.2 亿 m^3 下降至 2.94 亿 m^3 ,减少了 30.00%;上游库区因水质标准由 III 类提升为 II 类,排污权下降,其中 COD_{Mn} 纳污能力降低 43.66%, NH_3-N 纳污能力降低 42.68%。下游河道水量减少,排污权在治理情景下有所下降,其中 COD_{Mn} 纳污能力降低 40.67%, NH_3-N 纳污能力降低 18.57%。

b. 基于生态系统服务价值评估法的计算表明,水源区在 2005 年(工程建设前)、2020 年(工程建设后)的生态系统服务总价值分别为 16.47 亿元和 16.79 亿元。相较于 2005 年,水源区水体生态系统

服务总价值增加了 0.712 亿元,这一增长主要归因于钦寸水库的建设。结合考虑受水区的经济发展水平与补偿支付能力,计算得出钦寸水库引水工程水源区生态补偿上限标准为 2.41 亿元。

c. 基于合作博弈论法确定受水区生态补偿总额为 2.04 亿元。以现状执行水价为基础,上调供水区综合水价,计算不同水价情况下受水区实际收益情况。经计算当综合水价达到 7.1 元/t 时,受水区实际收益大于 0,且水源区和下游区损失得到合理补偿,其中水源区补偿额度为 15 932 万元,下游区补偿额度为 4 419 万元。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2022.

[2] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2022[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.

[3] 许凤冉,阮本清,张春玲,等. 跨流域调水生态补偿研究进展与关键技术[J]. 水利经济,2022,40(4):34-40. (Xu Fengran, Ruan Benqing, Zhang Chunling, et al. Research progress and key technologies of ecological compensation for inter-basin water diversion [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4):34-40. (in Chinese))

[4] 耿翔燕,葛颜祥,张化楠. 基于重置成本的流域生态补偿标准研究:以小清河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(1):140-147. (Geng Xiangyan, Ge Yanxiang, Zhang Huanan. Study on ecological compensation standard of watershed based on reset cost: a case study of Xiaoqing River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(1):140-147. (in Chinese))

[5] 史晓燕,胡小华,邹新,等. 东江源区基于供给成本的生态补偿标准研究[J]. 水资源保护,2012,28(2):77-81. (Shi Xiaoyan, Hu Xiaohua, Zou Xin, et al. Ecological compensation criteria based on supply cost in source area of Dongjiang River [J]. Water Resources Protection, 2012,28(2):77-81. (in Chinese))

[6] 刘春芳,王佳雪,许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算:以石羊河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(8):157-165. (Liu Chunfang, Wang Jiaxue, Xu Xiaoyu. Regional division and standard accounting of ecological compensation from the perspective of ecosystem service flow: a case study of Shiyang River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(8):157-165. (in Chinese))

[7] 崔树彬,李杰,严黎. 珠江水系东江流域上下游生态补

偿机制[J]. 水资源保护,2015,31(6):27-31. (Cui Shubin, Li Jie, Yan Li. Upstream and downstream ecological compensation mechanism in Dongjiang River Basin in Pearl River water system [J]. Water Resources Protection,2015,31(6):27-31. (in Chinese))

[8] 李丽,黄伟杰,汪义杰,等. 基于讨价还价博弈的流域生态补偿标准:以西江压咸补淡为例[J]. 桂林理工大学学报,2024,44(3):561-566. (Li Li, Huang Weijie, Wang Yijie, et al. Watershed ecological compensation standard based on bargaining game analysis: taking recharging fresh water for repelling saltwater intrusion in Xijiang River as a case [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2024,44(3):561-566. (in Chinese))

[9] 李继清,薛智明,汪定盼. 基于演化博弈的南水北调东线工程生态补偿研究[J]. 中国农村水利水电,2022(12):31-38. (Li Jiqing, Xue Zhiming, Wang Dingpan. Research on the ecological compensation of the Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on the evolutionary game theory [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(12):31-38. (in Chinese))

[10] 李欣蔚. 基于水足迹的长江经济带流域生态补偿机制研究[J]. 水利科技与经济,2022,28(9):23-27. (Li Xinwei. Study on ecological compensation mechanism of Yangtze River Economic Belt basin based on water footprint [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022,28(9):23-27. (in Chinese))

[11] 李继清,赵新月,薛智明,等. 基于水足迹的南水北调中线工程水源区水资源利用评价[J]. 长江流域资源与环境,2025,34(4):769-780. (Li Jiqing, Zhao Xinyue, Xue Zhiming, et al. Evaluation of water resource utilization in source areas of Central Line Project of South-to-North Water Diversion based on water footprint [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(4):769-780. (in Chinese))

[12] Guo Fengqi, Hao Linru, Xin Chunhua. Integrating BiLSTM-multi-head attention model for eco-compensation allocation and prediction in transboundary watersheds [J]. Ecological Engineering, 2025, 219:107701.

[13] Jiang Ke, You Daming, Li Zhendong, et al. A differential game approach to dynamic optimal control strategies for watershed pollution across regional boundaries under eco-compensation criterion [J]. Ecological Indicators, 2019, 105:229-241.

[14] 秦琳琳,过寒超. 近 60 年黄泽江流域降雨径流变化趋势及突变分析[J]. 人民珠江,2019,40(7):30-36. (Qin Linlin, Guo Hanchao. Variation trend and mutation analysis of the rainfall and runoff in Huangze River Basin during the last 60 years [J]. Pearl River, 2019,40(7):30-36. (in Chinese))

[15] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):

- 42-49. (Zhang Ting, Gao Ya, Li Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [16] 唐天均, 杨晟, 尹魁浩, 等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 393-400. (Tang Tianjun, Yang Sheng, Yin Kuihao, et al. Simulation of eutrophication in Shenzhen Reservoir based on EFDC model[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 393-400. (in Chinese))
- [17] 冯麒宇, 胡海英, 刘俊达. 有限资料条件下基于 SWAT 模型的泗合水流域非点源污染模拟[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 128-133. (Feng Qiyu, Hu Haiying, Liu Junda. Simulation of non-point pollution in Siheshui Basin by use of SWAT model and limited data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 128-133. (in Chinese))
- [18] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008(5): 911-919. (Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008(5): 911-919. (in Chinese))
- [20] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. (Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746. (in Chinese))
- [21] 朱九龙, 王俊, 陶晓燕, 等. 基于生态服务价值的南水北调中线水源区生态补偿资金分配研究[J]. 生态经济, 2017, 33(6): 127-132. (Zhu Jiulong, Wang Jun, Tao Xiaoyan, et al. The allocation of ecological compensation funds in the water source area of the Middle Route scheme of South-North Water Diversion Project based on ecosystem services value [J]. Ecological Economy, 2017, 33(6): 127-132. (in Chinese))
- [22] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 585-593. (Li Shimei, Xie Gaodi, Zhang Caixia, et al. Flow Process of water conservation service of forest ecosystem [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(4): 585-593. (in Chinese))
- [23] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 等. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究: 以生态系统服务价值为视角[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 792-804. (Zhou Chen, Ding Xiaohui, Li Guoping, et al. Ecological compensation standards in the water source area of the middle route project of the South-North Water Transfer Project [J]. Resources Science, 2015, 37(4): 792-804. (in Chinese))
- [24] 李金昌. 价值核算是环境核算的关键[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(3): 11-17. (Li Jinchang. Value assessment is the key of environmental assessment [J]. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(3): 11-17. (in Chinese))
- [25] 许莉, 常雨晴, 柴霁轩, 等. 基于合作博弈 Shapley 值法的类激活映射算法[J]. 计算机工程与设计, 2025, 46(3): 795-803. (Xu Li, Chang Yuqing, Chai Jixuan, et al. Class activation mapping algorithm based on cooperative game Shapley value [J]. Computer Engineering and Design, 2025, 46(3): 795-803. (in Chinese))
- [26] Sundararajan M, Najmi A. The many Shapley values for model explanation [C]//Proceeding of the 37th International Conference on Machine Learning. New York: PMLR, 2020: 9269-9278.
- [27] 周申蓓, 李嘉欣, 张子霞. 跨流域调水三方合作博弈生态补偿研究: 以南水北调中线工程为例[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2371-2382. (Zhou Shenbei, Li Jiaxin, Zhang Zixia. Ecological compensation of tripartite cooperative game of inter-basin water diversion: a case study of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(11): 2371-2382. (in Chinese))
- [28] 王岳峰, 刘伟. 考虑权重的 Shapley 值法虚拟企业伙伴利益分配策略的改进[J]. 上海海事大学学报, 2005(4): 48-51. (Wang Yuefeng, Liu Wei. Innovation on strategies of profit allocation among partners in virtual enterprise based on Shapley value considering weight [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2005(4): 48-51. (in Chinese))
- [29] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005(4): 223-226. (Lu Shaowei, Mao Fuling, Jin Fang, et al. The water resource conservation of forest ecosystem in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005(4): 223-226. (in Chinese))
- [30] 邓雅丽, 赵新宇, 崔自杰, 等. 中国森林生态系统林冠层降雨截留特征[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2981-2992. (Deng Yali, Zhao Xinyu, Cui Zijie, et al. Canopy rainfall interception characteristics of forest ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2981-2992. (in Chinese))
- [31] 冯静怡, 景元书, 冉楚钰, 等. 利用 ESTARFM 模型获取南方红壤区高时空分辨率 MODIS 遥感蒸散估算数据[J]. 中国农业气象, 2024, 45(9): 953-967. (Feng Jingyi, Jing Yuanshu, Ran Chuyu, et al. Estimating high spatial and temporal resolution MODIS remote sensing evapotranspiration data in southern red soil region based

on ESTARFM Model [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(9) : 953-967. (in Chinese)

[32] 陈默, 林育青, 张建云, 等. 水生态系统生产总值核算体系及应用 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1) : 234-242. (Chen Mo, Lin Yuqing, Zhang Jianyun, et al. Accounting system of gross water ecosystem product and its application [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1) : 234-242. (in Chinese))

[33] 李旭杰, 虞玉诚. 基于博弈论的南水北调水资源调度算

法研究 [J]. 水利发展研究, 2013, 13(10) : 33-35. (Li Xujie, Yu Yucheng. Research on water resources dispatch algorithm of South-to-North Water Transfer Project based on game theory [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(10) : 33-35. (in Chinese))

[34] 刘伟莉. 博弈论在水资源配置中的应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

(收稿日期: 2025 - 05 - 12 编辑: 胡新宇)

(上接第 208 页)

[39] Yue Siyuan, Huang Jinlei, Zhang Yao, et al. Quantitative evaluation of the impact of vegetation restoration and climate variation on runoff attenuation in the Luan River Basin based on the extended Budyko model [J]. Land, 2023, 12(8) : 1626.

[40] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3) : 245-259.

[41] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1) : 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1) : 1-8. (in Chinese))

[42] Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K, et al. An analysis of climatic jump [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan; Series II, 1986, 64(2) : 273-281.

[43] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. Nature, 2005, 438(7066) : 303-309.

[44] Wang Xianwei, Gao Bing, Wang Xufeng. A modified ABCD model with temperature-dependent parameters for cold regions; application to reconstruct the changing runoff in the headwater catchment of the Golmud River, China [J]. Water, 2020, 12(6) : 1812.

[45] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. Nature, 2005, 438(7066) : 303-309.

[46] 李光轩, 赵钟楠, 李原园, 等. 气候变化下西北内陆河典型流域出山径流变化归因分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41(3) : 62-72. (Li Guangxuan, Zhao Zhongnan, Li Yuanyuan, et al. Analysis of mountain runoff evolution in

typical basins of northwest inland rivers under climate change [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3) : 62-72. (in Chinese))

[47] Luo Kai, Tao Fulu, Moiwo J P, et al. Attribution of hydrological change in Heihe River Basin to climate and land use change in the past three decades [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1) : 33704.

[48] 王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析 [J]. 水利学报, 2015, 46(9) : 1064-1071. (Wang Yuhan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9) : 1064-1071. (in Chinese))

[49] 司伟, 黄思琦, 王培霞, 等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53(3) : 1-7. (Si Wei, Huang Siqi, Wang Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3) : 1-7. (in Chinese))

[50] Triplett A, Condon L E. Climate-warming-driven changes in the cryosphere and their impact on groundwater-surface-water interactions in the Heihe River Basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(14) : 2763-2785.

[51] Ji Guangxing, Yue Shuaijun, Zhang Jincai, et al. Assessing the impact of vegetation variation, climate and human factors on the streamflow variation of Yarlung Zangbo River with the corrected Budyko equation [J]. Forests, 2023, 14(7) : 1312.

[52] Zheng Jiahao, Jiang Xiaohui. Attribution identification of runoff variation in Kuye River based on Budyko's theory of water and heat balance [J]. Journal of Water Resources Research, 2020, 9: 471.

(收稿日期: 2025 - 07 - 22 编辑: 胡新宇)