

水网格局下的水资源价值流理论及调水生态 补偿标准计算

许凤冉¹, 丁昌峰^{1,2}, 白音包力皋¹, 阮本清¹, 张春玲¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要:针对水网格局下调水生态补偿理论基础薄弱和标准难以计算的问题,探讨了水网格局下的水资源价值流理论,分析了水量平衡和水资源价值流运移规律,结合外部效应内部化原理,建立了调水对上游源区水量分摊系数与对下游影响贡献系数矩阵,提出了多调水工程叠加效应下的生态补偿标准计算方法。将实际保护成本作为补偿量下限,叠加限制发展机会损失计算补偿量上限,以支持实施区域协商和差别化补偿措施。汉江流域的应用结果表明:引汉济渭工程、南水北调中线工程、鄂北水资源配置工程受水区年调水生态补偿量下限分别为 4. 08 亿、42. 53 亿、3. 45 亿元,上限分别为 6. 59 亿、65. 77 亿、5. 34 亿元;现行补偿资金较大程度缓解了水资源保护资金压力,还需进一步完善资金补偿和多元化补偿措施,弥补发展机会损失。

关键词:水网格局;水资源价值流;调水生态补偿;汉江流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2026)05 - 0139 - 08

Water resources value flow theory and ecological compensation standard calculation for water diversion under water network pattern//Xu Fengran¹, Ding Changfeng^{1,2}, Baiyinbaoligao¹, Ruan Benqing¹, Zhang Chunling¹ (1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: In response to the weak theoretical foundation and the difficulty in calculating standards of ecological compensation for water diversion under water network pattern, the water resource value flow theory under water network pattern was explored, the water balance and laws of water resource value flow movement were analyzed. Combining the principle of internalization of external effects, a matrix of water allocation coefficients for upstream source areas and contribution coefficients for downstream impacts of water diversion was established. A calculation method of ecological compensation standards under the superposition effect of multiple water diversion projects was proposed. Using the actual protection cost as the lower limit of compensation, and adding restrictions on development opportunity losses to calculate the upper limit of compensation, in order to support the implementation of regional negotiations and differentiated compensation measures. The application results in the Hanjiang River Basin show that the lower limit of annual ecological compensation for water diversion in the receiving areas of the Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project, the South-to-North Water Diversion Middle Route Project, and the North Hubei Water Allocation Project are 408 million yuan, 4. 253 billion yuan, and 345 million yuan, respectively, and the upper limit are 659 million yuan, 6. 577 billion yuan, and 534 million yuan, respectively. The current compensation funds have largely alleviated the financial pressure on water resources protection, and further improvement and diversification of compensation measures are needed to compensate for the loss of development opportunities.

Key words: water network pattern; water resources value flow; ecological compensation for water diversion; the Hanjiang River Basin

我国水资源短缺且时空分布不均,与经济社会发展布局不匹配,建设调水工程是破解这一难题的重要途径。随着南水北调东、中线一期等重大引调水工程相继建成,跨流域跨区域水网格局逐步形成。

2023 年,《国家水网建设规划纲要》明确了国家水网总体布局 and 重点任务,加快了构建国家水网的进程。调水工程优化和调整了水资源配置格局,对受水区缓解水资源短缺问题、改善生态环境发挥了重要作

用,产生了显著的经济、社会和生态效益,同时对水源流域经济社会发展和生态环境也产生了一定影响。水源区面临着相对更高的水资源保护要求,经济发展受到一定程度的限制;下游河道流量减少和环境容量缩小,对取水、航运、生态环境等用水产生影响,实施水生态补偿是解决这些问题的重要手段。

近年来,我国加快推进建立水生态补偿机制,并将其作为生态文明制度建设的重要内容,先后出台了《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》等政策文件,明确在江河源头区、重要河流敏感河段、重要饮用水源地等七大类型水域开展水流生态保护补偿。《国家水网建设规划纲要》提出在国家水网建设过程中要推动健全流域区域横向生态保护补偿机制。《生态保护补偿条例》明确提出要在“重大引调水工程水源地以及沿线保护区”开展地区间横向生态保护补偿。

补偿标准的确定是建立生态补偿机制的关键技术和难点所在。目前,已有学者分别采用保护成本与机会损失、支付意愿、生态资产价值提升、水质水量指标、水足迹、博弈论等方法^[1-8]计算了调水工程的水源区补偿标准。同时,调水在一定程度上会造成水源流域下游水量衰减、环境容量下降、水华风险升高^[9-10],对水资源开发利用、水质、生态质量及航运等产生影响。在国家构建水网格局的背景下,流域水量调入、调出关系日趋复杂,水生态补偿与单一调水工程水源区补偿有所不同。在研究范围上,补偿对象不仅是上游水源区,还包括整个水源流域上下游相关区域,需系统考虑上游保护成本与下游损失;在补偿关系上,多项调水工程会出现不同工程的水源区相互包含、对下游产生叠加影响等复杂情况。因而,在复杂水网格局下,生态补偿不能直接沿用以往水源区补偿的计算思路,面临着补偿关系界定和补偿标准计算的难题。

鉴于此,本文拟分析水网格局下的水量平衡和水资源价值流的运移规律,考虑不同调水工程水源区相互包含、对下游产生叠加影响的情况,界定补偿主体与补偿对象,探究适用的调水生态补偿标准计算方法,以为水网格局下生态补偿的研究与实践提供科学基础和技术支撑。

1 研究方法

1.1 水网格局下的水资源价值流理论

水资源价值包括天然水资源价值和经过人类劳动改变水资源时空分布或质量后所产生的价值。水在向下游流动的过程中会产生机会效益价值,调水

工程会改变这种机会效益价值的实现区域,在受水区产生价值增值,在水源流域调水断面下游造成价值衰减。这种水资源价值产生、增减、转化、转移、外溢的动态流动全过程称为水资源价值流。水资源价值流具有连续传递特性,某一地点的水资源价值流是该点的水资源价值及该点以下水流流动过程所产生的水资源价值的总和^[11]。

对于某流域,若存在 n 个调水工程 $D_1、D_2、\cdots、D_n$,根据各工程取水点位置将流域划分为 m 个区域 $B_1、B_2、\cdots、B_m$,如图 1 所示。对于位于调水工程 D_j ($j=1,2,\cdots,n$) 取水点上游的区域 B_i ($i=1,2,\cdots,m$),其水量平衡方程为:

$$W_i+W_{li}+W_{S,i-1}=W_{Ci}+W_{Qj}+W_{Dj}+\Delta W_{Ri} \tag{1}$$

式中: W_i 为区域 B_i 的本地地表径流量; W_{li} 为区域 B_i 取水点上游的调入水量; $W_{S,i-1}$ 为区域 B_i 上游入流径流量; W_{Ci} 为区域 B_i 的耗水量; W_{Qj} 为调水工程 D_j 取水点断面的下泄水量; W_{Dj} 为调水工程 D_j 的调出水量; ΔW_{Ri} 为河道槽蓄变化量(包括水库蓄水变化量),多年平均尺度下可认为 $\Delta W_{Ri}=0$ 。

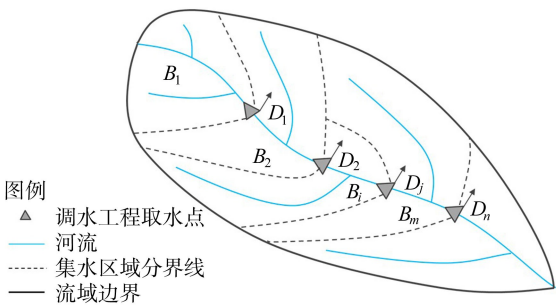


图 1 调水工程分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of water diversion projects

在水量平衡分析的基础上分析水资源价值的运移,设调水工程 D_j 对区域 B_i 水资源价值的影响为 V_{ij} ,对取水点上游水源区,主要表现为水源保护投入和限制发展形成的外部价值;对取水点下游影响区,则主要表现为调水引起的水资源机会价值损失。由此可形成调水工程对水源流域水资源价值影响的关系矩阵(式(2)),矩阵右上方的 V 值反映对上游水源区的补偿,左下方的 V 值反映对下游影响区的补偿。

$$\begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ V_{m1} & \cdots & V_{mn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

调水会对取水点下游产生不利影响,在调水工程取水点上游水源区水质达标的情况下,以调水工程受水区为补偿主体,水源流域内承担水源保护责任或受到调水不利影响的相关区域为补偿对象。在水网格局下,多项调水工程对应水源流域不同的上

游水源区和下游影响区,根据外部效应内部化原理,纵向列的和为某一调水工程对水源流域的总补偿量,横向行的和为水源流域某一区域应获得的所有调水工程对其的总补偿量。

1.2 水网格局下调水生态补偿标准计算

调水的水资源价值包括天然水资源价值、调水工程成本、水源流域保护成本和机会成本,其中天然水资源价值和调水工程成本在受水区水价中得到补偿,而水源流域保护成本和机会成本则需要依靠生态补偿实现外部效应的内部化,并以此为基础计算对水源流域的生态补偿标准。首先,计算水源保护产生价值和调水工程取水点下游机会损失,作为补偿量分摊计算的基础;其次,基于水量平衡和调水工程对水源流域水资源价值影响的关系矩阵,建立调水对上游水源区水量分摊系数与对下游影响贡献系数矩阵;最后,计算水源流域各区域应获得的补偿量及各调水工程所需分担的补偿量,进而计算受水区各区域应分担的补偿量。

a. 上游源区水源保护产生价值和取水点下游损失计算。①应用成本价值法^[12],计算取水点上游源区水源保护成本与发展机会损失,进而得到水源保护产生价值。水源保护成本包括水源涵养林建设、水土流失治理、生态清洁小流域、水污染防治、环境风险管控等投入。流域水源区面临着相对较高的水质保护要求,必须对耗水量大、污染较重和具有水土流失风险的产业采取更严格的限制措施,这在一定程度上限制了水源区经济社会发展,导致水源区发展速度落后于其他邻近地区。采用丁昌峰等^[13]基于人均 GDP 累计增速对比的限制发展机会损失计算方法,比较水源区与未受影响的邻近对照区人均 GDP 和财政收入的差异,测算水源区因限制发展造成的机会损失。②考虑水量、水质、生态要素计算取水点下游损失。调水工程可使水源流域取水点下游发电、供水、治污、航运、生态等产生影响和损失。对于发电效益损失,通过受影响电站损失的发电量及上网电价进行计算;对于受影响河段河道内取水成本增加、环境容量下降、航运费用增加等经济损失,采用替代成本法^[14-15]进行计算。

b. 调水对上游源区水量分摊系数与对下游影响贡献系数矩阵建立。①调水工程的调出水量来源于取水点断面上游流域产生的径流量,根据式(3)计算调水工程 D_j 对取水点上游区域 B_i 的水量分摊系数。②根据式(4)计算调水对下游影响贡献系数。③将调水对上游源区水量分摊系数和调水对下游影响贡献系数进行组合,构成调水对上游源区水量分摊系数与对下游影响贡献系数矩阵(式(5))。

$$\beta_{ij} = \alpha_{ij} W_{Dj} / (W_{Ui} + \sum_{k=j}^n \alpha_{ik} W_{Dk}) \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = W_{Dj} / \sum_{h=1}^{i-1} W_{Dh} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \gamma_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{m1} & \gamma_{m2} & \cdots & \gamma_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\alpha_{ij} = W_i / (W_{Qj} + W_{Dj})$$

式中: β_{ij} 为调水对上游源区水量分摊系数; α_{ij} 为区域 B_i 的本地径流量占调水工程 D_j 取水断面径流总量的比例; W_{Ui} 为区域 B_i 的本地用水; γ_{ij} 为调水对下游影响贡献系数; $\sum_{h=1}^{i-1} W_{Dh}$ 为区域 B_i 上游合计调出水量。

c. 调水工程对水源流域的补偿量计算。将区域 B_i 的水源保护产生价值 V_i 与调水对上游源区水量分摊系数相乘,将调水工程造成区域 B_i 的下游损失 L_i 与调水对下游影响贡献系数相乘,得到如式(6)所示矩阵,进而根据式(7)计算调水工程对水源流域的补偿量。根据保护成本和机会损失性质的不同,可将实际保护成本作为调水生态补偿量的下限,叠加发展受到限制的机会损失后计算补偿量的上限,以支持区域协商、资金补偿和多元化补偿措施的实施。

$$\begin{bmatrix} V_1 \beta_{11} & V_1 \beta_{12} & \cdots & V_1 \beta_{1n} \\ L_2 \gamma_{21} & V_2 \beta_{22} & \cdots & V_2 \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_m \gamma_{m1} & L_m \gamma_{m2} & \cdots & L_m \gamma_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_j = \sum_{i=1}^j V_i \beta_{ij} + \sum_{i=j+1}^m L_i \gamma_{ij} \quad (7)$$

式中: C_j 为调水工程 D_j 对水源流域的补偿量; $\sum_{i=1}^j V_i \beta_{ij}$ 为调水工程 D_j 对上游水源区的补偿量; $\sum_{i=j+1}^m L_i \gamma_{ij}$ 为调水工程 D_j 对下游影响的补偿量。

d. 受水区各区域分摊补偿量计算。对于受水区各补偿主体区域,可考虑配置的调水量、产生效益、经济规模、受益人口、支付能力等因素,采用离差平方法^[16]计算受水区各区域的分摊比例,进而得到受水区各区域的分摊补偿量。

2 实例应用

2.1 汉江流域水网格局及调水生态补偿计算基础

2.1.1 水网格局

汉江流域跨及陕、豫、鄂3省,面积15.9万 km²,

多年平均水资源量为 573 亿 m^3 。已建成的南水北调中线、引汉济汉、引汉济渭、鄂北水资源配置等调水工程,与在建的引江补汉工程,形成典型的水网格局(图 2)。南水北调中线工程从丹江口水库向京津冀豫 4 省市调水,设计年供水量 95 亿 m^3 ^[17];引汉济渭工程从汉江上游干流黄金峡和支流子午河三河口调水至陕西关中地区,平均调水规模近期 2025 年为 10 亿 m^3 ,远期 2030 年为 15 亿 m^3 ^[18];鄂北水资源配置工程从丹江口水库调水至鄂北的襄阳、随州和孝感市大悟县,年调水量 7.7 亿 m^3 ,解决了城乡生活、工业供水和唐东地区农业供水问题^[19];已建成的引江济汉工程从长江引水至汉江兴隆水利枢纽至河口段和东荆河灌区,补充该河段灌溉、航运和生态用水,在建的引江补汉工程从长江向丹江口水库下游调水。根据上述工程规划,汉江流域水资源开发利用量将超 290 亿 m^3 ,流域水资源利用率将达 50% 以上,水资源供需矛盾日益突出。

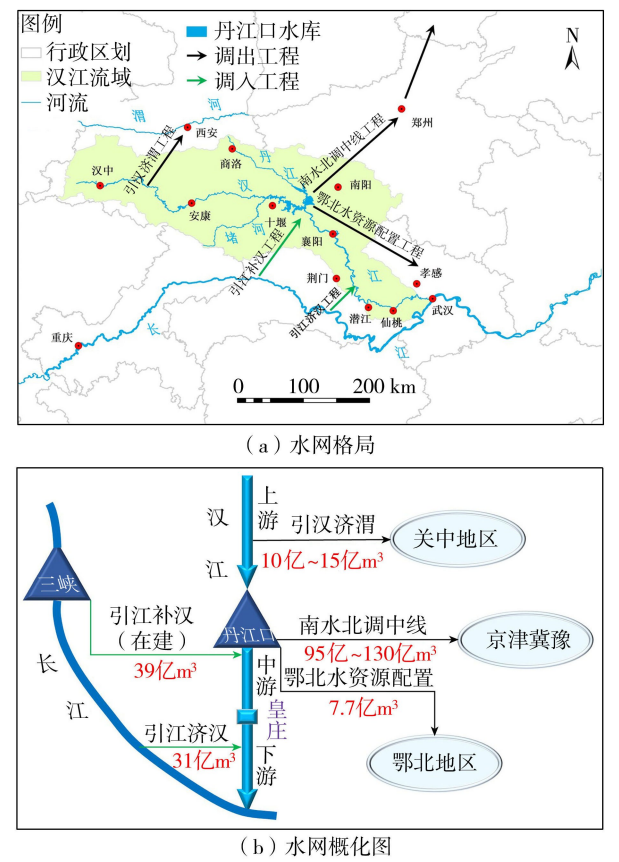


图 2 汉江流域水网格局和水网概化图
Fig. 2 Water network pattern and generalized map of the Hanjiang River Basin

2.1.2 调水生态补偿计算基础

汉江流域作为调水工程的水源地,关系到华北地区、关中地区、鄂北地区等受水区的水资源安全,其水源保护极其重要,要求丹江口水库水质稳定在 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的 II 类标

准,直接汇入丹江口水库的各主要支流水质不低于 III 类标准(现状水质优于 III 类水质的入库河流不得降级),并加强水土流失治理,提高林草覆盖率,增强水源涵养能力。同时,国家高度重视调水工程对汉江中下游的影响,在南水北调中线一期工程同步实施部分闸站改造、局部航道整治、兴隆水利枢纽修建和引汉济汉 4 项治理工程,2014 年底全部建成并投入运行,在一定程度上缓解了调水对汉江中下游的影响。

经过多年治理,汉江流域水质条件优越,各调水工程取水点水质持续达标,优质的水资源有效缓解了华北地区、关中地区和鄂北地区的水资源短缺问题,促进了地下水超采治理和生态环境改善,取得了巨大的经济社会效益和生态效益。同时,水源流域也面临着水资源保护和经济发展的双重压力。丹江口水库上游地区投入大量资源进行水污染防治和水土保持工作,社会就业和产业发展受到一定程度限制,地方财政收入受到影响。从区域均衡性角度看,实施调水生态补偿的基础是水源区与受水区水资源禀赋和经济发展水平的差异。在追求水源区与受水区综合效益最优的情况下,汉江流域需要具备源区水质达标、政府协调有效、补偿标准合理可行、受水区补偿能力充足等基础条件,通过实施补偿机制促进区域发展与水资源保护的双赢。

2.2 汉江流域调水生态补偿标准计算

2.2.1 研究分区

根据汉江水系与调水工程布局,作为水源区的汉江流域为补偿对象区域,各调水工程受水区为补偿主体区域。

a. 补偿对象分区。引汉济渭工程取水点黄金峡和三河口水库位于汉中市与安康市交界区域,丹江口水库大坝位于十堰市与襄阳市交界区域,因此将水源区划分为引汉济渭工程以上的汉中市,引汉济渭工程至丹江口水库的安康市、商洛市、十堰市、南阳市以及丹江口水库以下区域,共 6 个区域。

b. 补偿主体分区。根据各调水工程受水区水资源配置情况,引汉济渭工程受水区包括西安市、咸阳市、西咸新区等区域;南水北调中线工程受水区包括河南省、河北省、北京市、天津市;鄂北水资源配置工程受水区包括襄阳市(唐东地区)、随州市(府澧河北区)、孝感市(澧水区)。

2.2.2 水源流域保护成本和下游损失

a. 上游源区水源保护产生价值。主要考虑丹江口库区及上游流域水生态保护投入和发展机会损失。采用“十三五”期间的经济数据^[20-22]计算源区水源保护产生价值,利用《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划》^[23-24]中的保护投资数据作

为源区各地市保护投入。根据丁昌峰等^[13,25]基于人均 GDP 累计增速对比的限制发展机会损失计算方法,比较汉江水源区各地市与所在省人均 GDP 平均水平的发展差异,测算水源区因限制发展造成的机会损失。目前生态补偿政策以转移支付资金补偿为主,因此主要考虑限制发展造成的财政收入损失。2006 年国家加强南水北调水源地保护后,水源区与对照区发展差距逐渐增大,以核心水源地十堰市为例,十堰市与湖北省的人均 GDP 差距由 2005 年的 1910 元增加到 2019 年的 10 372 元(按照 2015 年不变价计算),人均 GDP 累计增速差呈先增加后趋于稳定的趋势,2016—2019 年的年均损失财政收入为 12.03 亿元,加上水源保护实际投入 13.82 亿元,十堰市年均水源保护产生价值为 25.85 亿元。同样地,计算得到汉中市、安康市、商洛市、十堰市、南阳市的年均水源保护产生价值分别为 14.00 亿、14.45 亿、10.09 亿、25.85 亿、10.77 亿元,占所在区域 GDP 比例分别为 1.14%、1.60%、1.52%、1.65%、1.75%。

b. 取水点下游损失。主要考虑已建调水工程对汉江干流发电、水质、航运造成的经济损失。根据李天昊等^[26-27]的研究,引汉济渭工程会造成下游梯级电站发电损失,南水北调中线工程运行后对下游发电的影响主要集中在王甫洲水电站,石泉、喜河、安康、王甫洲 4 个水电站年发电损失分别为 0.47 亿、0.25 亿、0.84 亿、0.40 亿元。汉江水环境容量下降造成的损失根据环境容量缩减量和排污权价值进行计算。根据周晨路^[15]的计算结果,在考虑南水北调中线工程、引汉济渭工程、鄂北水资源配置工程、引江济汉工程的条件下,汉江中下游多年平均化学需氧量、氨氮水环境容量分别缩减 16.33 万、1.09 万 t/a,降幅分别为 40.7%、39.5%。按照湖北省 2021 年排污权交易挂牌价格,化学需氧量、氨氮水环境容量分别为 8 790、14 000 元/t,每年造成的水环境容量下降的经济损失为 15.88 亿元。受调水工程影响,2013 年特枯水年汉江兴隆水利枢纽下游河段碍航出浅情况严重^[28],制约了汉江航运发展。调水后河道的自然演变难以达到设计航槽尺度要求,汉江下游河道必须实施航道整治工程进行人工干预,才能实现并维持设计航槽尺度^[29]。2010—2018 年湖北省实施汉江航道整治工程(碾盘山至汉川段),全长 299.7 km,总投资 17.08 亿元,实现了 1 000 t 级船舶不间断通航^[30]。将投资按 15 a 摊销计算,航道整治的年分摊成本为 2.00 亿元。综合以上发电、水环境容量下降、航运 3 方面,调水工程造成安康市、十堰市、丹江口水库以下区域的损失分别

为 1.56 亿、1.21 亿、17.07 亿元。

2.2.3 调水对上游源区水量分摊系数和对下游影响贡献系数矩阵

基于陕西省、湖北省、河南省相关地市《水资源公报》《第三次水资源调查评价》中的数据,得到丹江口水库上游流域内汉中市、安康市、商洛市、十堰市、南阳市多年平均地表水资源量分别为 127.83 亿、86.25 亿、51.33 亿、75.11 亿、19.68 亿 m³。按照引汉济渭工程、南水北调中线工程、鄂北水资源配置工程设计调水规模分别为 10 亿、95 亿、7.7 亿 m³,对于汉中市、安康市、商洛市、十堰市、南阳市、丹江口水库以下区域 6 个区域和 3 个调水工程,可得调水对上游源区水量分摊系数与对下游影响贡献系数的 6×3 阶矩阵:

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \gamma_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \gamma_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \\ \gamma_{41} & \beta_{42} & \beta_{43} \\ \gamma_{51} & \beta_{52} & \beta_{53} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.56 & 0.05 \\ 1 & 0.72 & 0.06 \\ 1 & 0.80 & 0.07 \\ 1 & 0.63 & 0.05 \\ 1 & 0.81 & 0.07 \\ 0.09 & 0.84 & 0.07 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2.4 调水生态补偿量

根据水源保护成本与机会损失性质的差异,将汉江流域源区保护成本、发电损失、航道整治工程年均成本合计 63.03 亿元,用于计算调水生态补偿量下限,叠加水源流域发展机会和环境容量下降导致的排污权机会损失后合计 94.99 亿元,用于计算调水生态补偿量上限,得到引汉济渭工程、南水北调中线工程、鄂北水资源配置工程调水后,汉中市、安康市、商洛市、十堰市、南阳市、丹江口水库以下区域应获得的年调水生态补偿量下限和上限,如表 1、表 2 所示。

表 1 汉江流域水源区各区域年调水生态补偿量下限
Table 1 Lower limit of annual ecological compensation for water diversion from each region of water source area in the Hanjiang River Basin

水源区	调水工程分摊补偿量/亿元			区域合计/亿元
	引汉济渭工程	南水北调中线工程	鄂北水资源配置工程	
汉中市	2.31	7.78	0.63	10.72
安康市	1.56	10.46	0.85	12.87
商洛市	0.00	8.10	0.66	8.76
十堰市	0.00	8.71	0.71	9.42
南阳市	0.00	5.46	0.44	5.90
丹江口水库以下区域	0.21	2.02	0.16	2.39
各调水工程合计	4.08	42.53	3.45	50.06

表 2 汉江流域水源区各区域年调水生态补偿量上限

Table 2 Upper limit of annual ecological compensation for water diversion from each region of water source area in the Hanjiang River Basin

水源区	调水工程分摊补偿量/亿元			区域合计/亿元
	引汉济渭工程	南水北调中线工程	鄂北水资源配置工程	
汉中市	2.31	7.78	0.63	10.72
安康市	1.56	10.46	0.85	12.87
商洛市	0.00	8.10	0.66	8.76
十堰市	1.21	16.29	1.32	18.82
南阳市	0.00	8.75	0.71	9.46
丹江口水库以下区域	1.51	14.39	1.17	17.07
各调水工程合计	6.59	65.77	5.34	77.70

2.2.5 受水区分摊补偿量

综合各调水工程受水区配置水量^[17-19]、经济产出、受益人口、支付能力^[20-22]等因素计算引汉济渭工程、南水北调中线工程、鄂北水资源配置工程受水区各区域年分摊补偿量,如表 3~5 所示。

表 3 引汉济渭工程受水区各区域年分摊补偿量

Table 3 Annual apportion compensation amount to each region of water receiving area of the Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project

受水区	下限/亿元	上限/亿元
西安市	2.50	4.03
咸阳市	0.78	1.27
西咸新区	0.80	1.29
合计	4.08	6.59

表 4 南水北调中线工程受水区各区域年分摊补偿量

Table 4 Annual apportion compensation amount to each region of water receiving area of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project

受水区	下限/亿元	上限/亿元
河南省	11.74	18.16
河北省	9.35	14.46
天津市	8.53	13.18
北京市	12.91	19.97
合计	42.53	65.77

表 5 鄂北水资源配置工程受水区各区域年分摊补偿量

Table 5 Annual apportion compensation amount to each region of water receiving area of the North Hubei Water Allocation Project

受水区	下限/亿元	上限/亿元
襄阳市(唐东地区)	1.67	2.58
随州市(府澧河北区)	1.21	1.88
孝感市(澧水区)	0.57	0.88
合计	3.45	5.34

2.3 结果分析

根据调水生态补偿量计算结果,基于实际保护成本的汉江流域年调水生态补偿量下限为

50.06 亿元,进一步考虑发展机会损失和水环境容量下降导致的排污权机会损失后得到年调水生态补偿量上限为 77.70 亿元。根据相关资料^[31-33],汉江流域“十三五”期间年均实际获得补偿资金 45.4 亿元,其中水源区转移支付资金 31.4 亿元、对口协作资金 8 亿元、汉江中下游地区补助 6 亿元。在现有补偿水平下水源区水质达标,但从经济发展数据与对照区比较来看仍存在一定的机会损失^[13,25]。

本文计算的调水生态补偿量下限接近现行的实际补偿额度,上限高于现行补偿额度,说明计算结果具有合理性和可行性,与实际的补偿资金和经济统计数据在量值上较为匹配,对提高补偿资金额度和完善多元化补偿措施具有借鉴作用。现有补偿资金较大程度上缓解了汉江流域水源保护成本压力,通过适当提高并合理分配补偿资金,再结合多元化补偿措施,可提高对发展机会损失的补偿水平。

3 结 语

本文针对水网格局下调水工程水源区相互包含、工程叠加影响、补偿关系复杂等问题,分析了水量平衡和水资源价值流运移规律,基于外部效应内部化原理,提出了调水生态补偿标准计算方法,主要包括水源保护产生价值计算、取水点下游损失计算、水资源价值关系矩阵建立、多线路调水对水源区各区域补偿量计算、受水区各区域分摊补偿量计算。将该方法应用于汉江流域,基于经济社会发展统计资料和有关规划数据,计算得到水源流域的汉中市、安康市、商洛市、十堰市、南阳市、丹江口水库以下区域应获得的年调水生态补偿量下限分别为 10.72 亿、12.87 亿、8.76 亿、9.42 亿、5.90 亿、2.39 亿元,上限分别为 10.72 亿、12.87 亿、8.76 亿、18.82 亿、9.46 亿、17.07 亿元;引汉济渭工程、南水北调中线工程、鄂北水资源配置工程受水区的年分摊补偿量下限分别为 4.08 亿、42.53 亿、3.45 亿元,上限分别为 6.59 亿、65.77 亿、5.34 亿元,并将其分摊到各区域。通过与现行补偿资金进行对比,发现现行补偿尚不够充分,需结合多元化补偿措施弥补发展机会损失。

参考文献:

[1] 苏荟琰,李金燕,魏怡敏,等. 基于机会成本的宁夏中南部调水工程水源区生态补偿标准研究[J]. 水利经济, 2023,41(6):45-50. (Su Huiyan, Li Jinyan, Wei Yimin, et al. Study on ecological compensation standards in the water source area of the water diversion project in Central and Southern Ningxia based on opportunity cost [J].

- Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(6): 45-50. (in Chinese))
- [2] 王辉, 许松, 王嘉清, 等. 基于生态资产价值核算的跨流域调水水源地生态补偿标准估算[J]. 人民珠江, 2026, 47(5): 125-135. (Wang Hui, Xu Song, Wang Jiaqing, et al. Payments for ecological services of water sources for inter-basin water transfer based on ecological asset value [J]. Pearl River, 2026, 47(5): 125-135. (in Chinese))
- [3] 孟钰, 魏剑林, 管新建, 等. 流域水生态环境补偿研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 215-223. (Meng Yu, Wei Jianlin, Guan Xinjian, et al. Research progress in watershed water ecological environment compensation[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 215-223. (in Chinese))
- [4] 寇青青, 运剑苇, 刘淑婧, 等. 南水北调中线工程生态补偿计算研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 112-117. (Kou Qingqing, Yun Jianwei, Liu Shujing, et al. A study of eco-compensation calculation for the middle route project of South-to-North water diversion [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(1): 112-117. (in Chinese))
- [5] 孙玉环, 张冬雪, 丁娇, 等. 跨流域调水核心水源地生态补偿标准研究: 以丹江口库区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1262-1271. (Sun Yuhuan, Zhang Dongxue, Ding Jiao, et al. Research on ecological compensation standard for core water source areas of inter-basin water transfer; taking Danjiangkou reservoir as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1262-1271. (in Chinese))
- [6] 毕建培, 刘晨, 林小艳. 国内水流生态保护补偿实践及存在的问题[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 114-119. (Bi Jianpei, Liu Chen, Lin Xiaoyan. Practice and problems of compensation for water flow ecological protection in China[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 114-119. (in Chinese))
- [7] 孙贤斌, 孙良萍, 刘乾坤, 等. 基于水足迹的引江济淮调水生态补偿标准研究[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 28(3): 63-68. (Sun Xianbin, Sun Liangping, Liu Qiankun, et al. Study on ecological compensation standard along the water diversion project from Yangtze River to Huaihe River based on water footprint method[J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 28(3): 63-68. (in Chinese))
- [8] 梁昊, 李丽, 何瑞, 等. 国家水网建设背景下水源地生态补偿标准确定方法[J]. 人民珠江, 2025, 46(10): 65-72. (Liang Hao, Li Li, He Rui, et al. Method for determining ecological compensation standards for water sources under the background of national water network construction[J]. Pearl River, 2025, 46(10): 65-72. (in Chinese))
- [9] 肖洋, 刘扬扬, 王中敏, 等. 引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 161-170. (Xiao Yang, Liu Yangyang, Wang Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 161-170. (in Chinese))
- [10] 曹圣洁, 夏瑞, 张远, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江下游水生态环境特征与响应规律识别[J]. 环境科学研究, 2020, 33(6): 1431-1439. (Cao Shengjie, Xia Rui, Zhang Yuan, et al. Characteristics and response of ecological environment in downstream of Hanjiang River before and after running of middle route of South-to-North water diversion project [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(6): 1431-1439. (in Chinese))
- [11] 高慧忠, 许凤冉, 陈娟, 等. 基于水资源价值流的跨区域横向生态补偿标准研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 203-211. (Gao Huizhong, Xu Fengran, Chen Juan, et al. Study on cross regional horizontal ecological compensation standard based on water value flow[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 203-211. (in Chinese))
- [12] 袁泉, 骆进仁. 基于机会成本法的引洮工程水源区经济补偿研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 34-37. (Yuan Quan, Luo Jinren. Study on economic compensation of water source area with Taohe River Water Diversion Project based on opportunity cost method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 34-37. (in Chinese))
- [13] 丁昌峰, 许凤冉, 白音包力皋, 等. 基于人均 GDP 累计增速对比法的水源保护限制发展机会损失研究: 以十堰市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(8): 1721-1728. (Ding Changfeng, Xu Fengran, Baoligao Baiyin, et al. Estimation on development opportunity cost due to water source protection restrictions based on the comparison of cumulative growth rates of per capita GDP: a case study of Shiyan City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(8): 1721-1728. (in Chinese))
- [14] 杨玉霞, 闫莉, 韩艳利, 等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 18-23. (Yang Yuxia, Yan Li, Han Yanli, et al. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 18-23. (in Chinese))
- [15] 周晨路. 南水北调中线工程运行下汉江中下游生态补偿标准研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- [16] 张国兴, 徐龙, 千鹏霄. 南水北调中线水源区生态补偿测算与分配研究[J]. 生态经济, 2020, 36(2): 160-166. (Zhang Guoxing, Xu Long, Qian Pengxiao. Study on ecological compensation fund calculating and allocation of

- the middle route of the South-North water transfer project [J]. Ecological Economy, 2020, 36 (2): 160-166. (in Chinese))
- [17] 马立亚,惠宇,马彪,等. 南水北调中线工程受水区年度水量分配方法研究[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 107-111. (Ma Liya, Hui Yu, Ma Biao, et al. Study on allocation method of annual water supply for Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Yangtze River, 2024, 55(5): 107-111. (in Chinese))
- [18] 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司. 陕西省引汉济渭二期工程环境影响报告书[R]. 北京: 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 2019.
- [19] 蔡元芳,黄绪臣,周铁军. 湖北省鄂北地区水资源配置模型研究[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(5): 76-79. (Cai Yuanfang, Huang Xuchen, Zhou Tiejun. The study of water resource allocation model for northern Hubei Province [J]. China Flood & Drought Management, 2015, 25(5): 76-79. (in Chinese))
- [20] 湖北省统计局,国家统计局湖北调查总队. 2025 湖北统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.
- [21] 陕西省统计局,国家统计局陕西调查总队. 2025 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.
- [22] 南阳市统计局. 2020 南阳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [23] 国家发展和改革委员会,水利部,环保总局和南水北调办. 丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划[EB/OL]. (2009-03-28) [2026-01-22]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2009-03/28/content_5000.htm.
- [24] 中华人民共和国国务院. 国务院关于丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划的批复[EB/OL]. [2026-01-22]. <https://www.gov.cn/xinwen/2018-01/05/5253642/files/3b2d95702a4436a2212be3e484fa82.pdf>.
- [25] Ding Changfeng, Cai Fulin, Liu Feng, et al. Assessing development opportunity loss in river source area based on comparison of cumulative growth rates of per capita GDP [J]. Sustainability, 2025, 17(19): 8723.
- [26] 李天昊,汪妮,彭方旭. 基于 P-PSO-SA 算法的调水区梯级水库发电影响模拟[J]. 西安理工大学学报, 2026, 42(2): 197-205. (Li Tianhao, Wang Ni, Peng Fangxu. Simulation of power generation impact of cascade reservoirs in water diversion areas based on P-PSO-SA algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 197-205. (in Chinese))
- [27] 程孟孟. 2014—2020 年丹江口水库综合利用效益分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(9): 64-69. (Cheng Mengmeng. Analysis of comprehensive utilization benefits of Danjiangkou reservoir from 2014 to 2020 [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(9): 64-69. (in Chinese))
- [28] 樊思月. 汉江航道整治工程对航运物流成本影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [29] 张俊宏. 丹江口水库下游河道对汉江调水响应机制及航道整治对策研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [30] 鲁寒宇,詹斌,罗轶,等. 汉江(湖北段)航道整治工程航运经济效益分析[J]. 水运管理, 2019, 41(5): 30-33. (Lu Hanyu, Zhan Bin, Luo Yi, et al. Shipping economic benefit analysis of Hanjiang (Hubei section) channel improvement project [J]. Shipping Management, 2019, 41(5): 30-33. (in Chinese))
- [31] 生态环境部. 对十三届全国人大一次会议第 2489 号建议的答复[EB/OL]. (2018-08-03) [2026-01-22]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk13/201810/t20181012_661996.html.
- [32] 生态环境部. 对十三届全国人大一次会议第 4306 号建议的答复[EB/OL]. (2018-08-01) [2026-01-22]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk13/201810/t20181012_661999.html.
- [33] 国家发展和改革委员会. 关于印发丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十四五”规划的通知[EB/OL]. (2021-12-01) [2026-01-22]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18384>.

(收稿日期: 2026-01-22 编辑: 王芳)

