

基于熵权法的跨省水生态补偿标准测算与资金分配 ——以东江流域为例

高慧忠¹, 刘 慧¹, 许凤冉¹, 张春玲², 李 想¹

(1. 中国水利水电科学研究院水力学研究所, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要:生态补偿标准测算与资金分配是建立跨省水生态补偿机制的难点和关键问题, 需要结合试点以来的实际保护投入和保护效果, 根据补偿性质的不同, 分别计算直接成本补偿量和机会损失补偿量, 再将直接成本补偿量分配到水源区各区县。建立基于跨省断面水量水质和投入效益的补偿量计算模型与资金分配的熵权模型, 以东江流域跨省生态补偿试点为例, 计算得到江西省东江源区水生态保护年补偿量 31.86 亿元, 其中直接成本补偿量 11.06 亿元, 并按 37.2%、32.2%、30.6% 的比例分配给源区寻乌、安远、定南三县。此结果高于《东江流域上下游横向生态补偿的协议》的补偿金额, 可为我国实施跨省水生态补偿中优化补偿标准和资金使用, 实施差别化补偿方式提供支撑。

关键词:跨省水生态补偿; 补偿标准; 资金分配; 东江流域

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2021)04-0072-05

流域内一定质量和数量水资源的开发利用具有不同程度的竞争性。上游水源区水资源利用或保护存在正负两方面的外部效应, 它会随着水循环从上游向下游转移, 一方面, 上游水源保护在下游产生正的外部效益; 另一方面, 上游水资源过度开发可能造成下游水资源短缺或水污染加剧。实施流域生态补偿是解决这些问题的有效手段。近些年, 国家高度重视推进水生态补偿机制建设, 先后出台《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》等重要文件, 明确在江河源头区、重要河流敏感河段和水生态修复治理区等七大类型水域开展流域水生态保护补偿。

自 2011 年以来, 我国先后在新安江、东江实施跨省流域生态补偿试点, 补偿量的科学测算和补偿资金的有效分配直接关系到补偿试点的实施成效。相关学者对此的研究可归为两类^[1-7]: 一是从保护生态环境的直接投入和发展机会损失测算; 二是通过生态系统服务价值和水资源价值测算。这些成果可为建立生态补偿机制提供依据, 但缺少结合试点实施情况的研究。本文以东江流域跨省生态补偿试

点为例, 结合试点以来的实际投入和保护效果, 建立基于跨省断面水量水质和投入效益的补偿量测算模型, 测算直接成本补偿量和机会损失补偿量, 并构建熵权模型, 将测算的直接补偿量分配到水源区各区县, 为进一步的试点工作中优化调整标准, 实施资金和政策等多样化补偿措施提供参考。

1 跨省水生态补偿标准测算与资金分配方法

1.1 水生态保护与建设成本分析

江河源区水生态保护与建设成本包括直接保护成本和限制产业发展的间接机会损失。

1.1.1 直接保护成本测算方法

直接保护成本是指江河源区为保护源区水生态环境所付出的保护与建设投入, 包括植树造林、封山育林、水源涵养、水质监测站建设、水土保持、生态移民等项目资金, 以及进一步改善水环境质量而新建的城市垃圾和污水处理设施、环境污染综合整治项目、水利设施等项目的投资。本次计算以东江源区为例, 直接保护成本 $C_{i直接}$ 考虑林业建设与保护 $C_{i林业}$ 、生态移民 $C_{i移民}$ 和水土保持 $C_{i水保}$ 3 类实际投入:

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401401); 水资源节约项目(HY0149B012020)

作者简介: 高慧忠(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源管理研究。E-mail: 1192619808@qq.com

通信作者: 许凤冉(1981—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源管理与保护研究。E-mail: xufengran@126.com

$$C_{i直接} = C_{i林业} + C_{i移民} + C_{i水保} \quad (1)$$

1.1.2 间接发展机会损失测算方法

间接发展机会损失是为保护源区水生态环境而限制部分行业发展,进行产业结构调整,关、停、否定高污染行业所带来的发展机会损失。在测算发展机会损失时可采用实证调查法、经验对比法^[8-9],在缺乏足够的实证调查数据情况下,通常采用经验对比法,通过比较江河源区与邻近受水源保护影响较小区域的经济发展水平之间的差异,作为评价水生态保护与建设的间接发展机会损失测算依据,见式(2)。本文将2017年赣州市东江源区三县(寻乌县、安远县、定南县)与江西省整体人均生产总值对比分析,计算间接机会发展损失。

$$C_{i间接} = (G_0 - G_1)\alpha N_1 \quad (2)$$

其中
$$\alpha = \frac{R_s}{G_s} \times 100\%$$

式中: $C_{i间接}$ 为间接发展机会损失; G_0 为邻近参照地区人均生产总值; G_1 为江河源区人均生产总值; α 为补偿系数,即水资源对经济的影响系数; N_1 为江河源区人口数; G_s 为江河源区的地区生产总值; R_s 为江河源区的财政收入。

因此,水生态保护与建设成本的计算公式表示为

$$C_i = C_{i直接} + C_{i间接} \quad (3)$$

1.2 基于水量水质与投入效益的跨省补偿量测算模型

江河源区为水生态保护和建设所做的工作,在整个流域内发挥着巨大效益,因此在源区水量水质得到合理开发和有效保护的前提下,源区保护成本应得到补偿。江河源区水生态保护与建设产生的效益,一部分由源区享受,一部分转移到下游。源区水生态保护与建设成本、水量、水质以及产生的效益是补偿量计算的主要因子,因此,建立跨省断面水量水质和投入效益的补偿量测算模型^[8-10],引入水量分摊系数 V_i 、水质修正系数 Q_i 和效益修正系数 E_i ,测算下游对源区水生态保护与建设的补偿量。

a. 水量分摊系数。根据流域上下游水资源利用状况,将 V_i 确定为源区提供给下游水量 $W_{下}$ 占源区总水量 $W_{总}$ 的比值,即:

$$V_i = \frac{W_{下}}{W_{总}} \quad (0 < V_i < 1) \quad (4)$$

因此,下游因利用源区水量而需承担源区水生态保护与建设成本 C_i 的分担量为 $C_i V_i$ 。

b. 水质修正系数。源区的水质优劣直接影响下游的用水效益,因此引入水质修正系数 Q_i 对下游分摊的成本 $C_i V_i$ 进行修正。以常用的水质指标

COD质量浓度作为交界断面处的代表性指标,假设交界断面处要求的水质标准为 S :①当交界断面处的水质 Q 等于 S 时,下游只需分摊利用源区水量的成本 $C_i V_i$;②当交界断面处的水质 Q 优于 S 时,下游除需分摊成本 $C_i V_i$ 外,还需对水质优于 Q 时少排放的COD量 P_i 进行补偿,采用源区环境保护中削减单位COD排放量的投资 M_i 估算,则下游因得到更优水质需向源区补贴 $P_i M_i$;③当交界断面处的水质 Q 劣于 S 时,断面水质没有达到所要求的标准时,源区在得到下游分摊的水量成本 $C_i V_i$ 外,还需向下游地区就多排放的COD量赔偿 $P_i M_i$ 。

考虑水量分摊和水质修正后下游对源区水生态保护与建设的补偿量为

$$C_i V_i Q_i = C_i V_i + P_i M_i = C_i V_i \left(1 + \frac{P_i M_i}{C_i V_i}\right) \quad (5)$$

$$Q_i = 1 + \frac{P_i M_i}{C_i V_i} \quad (6)$$

c. 效益修正系数。根据经济学的生产者行为理论,确保水生态保护与建设投入效益大于成本,以保持投资的积极性,应引入效益修正系数,对下游承担的水生态保护与建设补偿量进一步修正,并且应使效益修正系数 $E_i > 1$ 。水资源对于下游地区经济、生态具有长期效益,参照《建设项目经济评价方法与参数》(第三版),取社会折现率6%,得到 E_i 为1.06。在实际补偿机制建立的过程中,应对 E_i 值有一个协商和逐步调整的过程。

综上所述,得到江河源区跨省断面水量水质和投入效益因素的补偿量 C_{di} 计算公式为

$$C_{di} = C_i V_i Q_i E_i \quad (7)$$

1.3 水源区资金分配的熵权模型

补偿资金的分配是生态补偿机制实施中的重要环节,补偿资金一般用于弥补水生态保护与建设成本,目的在于激励生态保护行为,体现补偿机制的社会公平和生态保护积极性。因此,提高生态补偿资金的使用效率与分配合理性,将成为解决水生态保护与建设成本、均衡保护责任、分享水资源效益的关键节点。

本文通过构建熵权模型,根据指标变异性的的大小客观确定权重,进而对补偿资金进行分配^[11]。在熵权模型的构建中,补偿资金分配指标的选取是重要一环。补偿资金一般用于分享生态资源效益、体现生态保护贡献度、弥补发展机会成本损失等,因此,补偿资金分配指标的选取应体现其用途。指标的选取分为正向指标和逆向指标,正向指标是代表向上或向前发展、增长的指标,指标值越大评价越好;逆向指标是用于弥补发展机会损失的指标,指标

值越小评价越好。一般来说,若某个指标的信息熵越小,表明指标值的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中所能起到的作用也越大,其权重也就越大。应用熵权模型确定权重包括:指标的标准化处理、定义熵信息、确定熵权重。

a. 指标的标准化处理。由于各项指标的计量单位不统一,因此,在计算指标权重前,需要进行标准化处理,即把指标的绝对值转化为相对值,解决各项不同指标值的同质化问题。假定 m 个评价对象, n 个指标, x_{ij} 为第 j 个对象的第 i 个指标值。对于正向、逆向指标分别采用以下公式进行数据标准化处理

$$r_{ij} = \frac{100[x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})]}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{100[\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) - x_{ij}]}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})} \quad (9)$$

式中: $x_{j\max}$ $x_{j\min}$ 分别为第 j 个对象的最大、最小指标值。

b. 定义熵。在有 m 个评价对象、 n 个评价指标的评估问题中,第 j 个对象的熵为

$$h_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (10)$$

其中
$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + r_{ij})} \quad k = \frac{1}{\ln n}$$

c. 确定熵权重。定义了第 j 个对象的熵后,可得到第 j 个对象的熵权重为

$$u_j = \frac{1 - h_j}{m - \sum_{j=1}^m h_j} \quad (0 \leq u_j \leq 1; \sum_{j=1}^m u_j = 1) \quad (11)$$

2 水生态保护补偿标准测算与资金分配

2.1 东江源区概况和补尝试点实施进展

东江是珠江三大水系之一,横跨江西和广东两省,发源于江西省赣州市寻乌县,源区有寻乌水和定南水两大水系。江西省东江源区流域面积为 3613.77 km²,占东江全流域面积的 1/10,是东江的水源涵养地。源区内钨、铅、锌和稀土资源等矿产资源丰富,素有“世界钨都”和“稀土王国”之美称。2017 年江西省东江源区水资源总量 53.42 亿 m³,其中输入广东境内 32.75 亿 m³,占东江全流域年平均径流量的 12.7%,为下游东深供水等水资源开发利用工程提供了优质水源。江西省东江源区主要涉及

寻乌、定南、安远三县,2017 年末常住人口 95.67 万人,其中农业人口 74.55 万人,城镇化率仅为 22.1%,大部分以农业种植为生,地区人均生产总值为 2.25 万元,人均收入较低。寻乌、安远两县为国家级贫困县,定南县为省级贫困县,贫困人口占源区三县总人口的 44.1%。

为深入贯彻落实《国务院办公厅关于健全生态保护补偿机制的意见》,保护和改善东江流域生态环境,赣粤两省于 2016 年 10 月签署了《关于东江流域上下游横向生态补偿的协议》,以“成本共担、效益共享、合作共治”的原则,以流域跨省断面水质考核为依据,建立东江流域上下游两省横向生态补偿机制,确保流域水环境质量稳定和持续改善。协议补偿期限三年(2016—2018 年),以两省跨省断面水质年均值达到 III 类标准并逐年改善为考核目标,补偿资金额度为每年 5 亿元,其中中央财政出资 3 亿元,江西、广东两省各出资 1 亿元,专用于东江源头江西省水污染防治和生态环境保护与建设工作。2020 年 1 月,赣粤两省正式签署第二轮东江流域生态补偿协议,继续第二轮三年试点阶段。首轮试点三年来,江西省累计投入超 33 亿元用于东江源区保护与治理,取得了阶段性成果。源区生态环境明显改善,水质达标率 100%,森林覆盖率达 80% 以上^[13],绿色发展取得成效,加快了绿色特色农业发展,实现“废弃矿山”变“金山银山”。本文在开展东江源区生态补尝试点的基础上,重点考虑赣州市寻乌、安远、定南三县的水源保护投入,建立补偿标准测算模型与补偿资金分配模型,为进一步试点工作的开展提供理论依据。

2.2 水生态保护与建设成本测算

以 2017 年为例,测算江西省东江源区直接保护成本与间接机会损失。源区直接保护成本包括林业建设与保护、水土保持与生态移民等直接投入。

a. 林业建设与保护方面,包括植树造林、封山育林、森林生态效益保护以及护林人费用。据赣州市林业局数据显示,东江源区三县 2017 年投入资金 21837.84 万元,其中林业建设投入 11577.1 万元,运行维护投入 10260.74 万元。

b. 水土保持方面,据相关数据显示,截至 2017 年累计治理水土流失面积 277.79 km²,其中 2017 年治理 87.9 km²,投入资金 19735.5 万元,从 2013 年以来,寻乌县废弃稀土矿山治理面积约 14 km²,建设投资约 10 亿元,平均每年投资 2 亿元,总投资 3.97 亿元。

c. 生态移民方面,包括生态移民的补助和移

民的安置投入。据赣州市扶贫办数据统计 2017 年共投入资金 3.90 亿元。因此,直接保护成本为 10.05 亿元。

江西省东江源区始终把在“在发展中保护、在保护中发展”贯穿于经济社会发展全过程,严把项目准入门槛,把保护生态环境作为项目准入的前置条件,严格执行国家产业政策,坚决落实环保、水保“三同时”制度,工业园区入园项目环评率达到 100%。2016 年以来,江西省东江源区共拒绝不符合国家产业政策和高污染、高能耗等不利于环保的项目 462 家;累计拆除、关停、整治畜禽养殖场(户) 1488 家;寻乌县出台了《寻乌县国家重点生态功能区产业准入负面清单制度(试行)》,共拆除、关停、整治畜禽养殖场(户) 415 家,整治率约 30.9%。本文应用经验对比法,将江西省东江源区与江西省平均经济发展水平对比分析,应用式(2)计算源区 2017 年发展机会损失。由东江源区赣州市三县 2017 年的生产总值与财政收入得到生态补偿系数为 12.80%,结合赣州三县与江西省人均 GDP 的差距,可知具体源区的间接发展机会损失,为 18.91 亿元。因此,江西省东江源区水生态保护与建设总成本为 28.96 亿元。

2.3 基于跨省补偿机制实施成效的补偿量测算

a. 水量分摊系数 V_i 。东江流域担负着香港、广州、深圳、河源、惠州、东莞等多个地区的供水任务。根据相关数据显示,2017 年江西省东江源区水资源总量 53.42 亿 m^3 ,输入广东境内 32.75 亿 m^3 ,则水量分摊系数 V_i 为 0.613。

b. 水质修正系数 Q_i 。根据《东江流域上下游横向生态补偿协议》,东江流域江西、广东两省行政跨省界面庙咀里、兴宁电站为两个水质考核断面。考核指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[14] 中 pH 值、 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP 等 5 项指标,水质年均值达到 III 类即为达标。其中 COD_{Mn} 为主要监测指标,因此本文以常用的 COD_{Mn} 质量浓度作为跨省界面断面处的代表性指标。根据 2017 年两个跨省界考核断面 COD_{Mn} 质量浓度的监测值与地表水环境质量 III 类标准值的对比分析,2017 年省界面断面 COD_{Mn} 质量浓度检测值优于水环境质量 III 类标准值。与 III 类标准值相比,省界面

面减少 COD_{Mn} 负荷量约 106 616.5 t。根据相关研究^[14-15], COD_{Mn} 的单位污染物平均治理成本为 1.25 万元/t。由式(6)可估算水质修正系数 Q_i 为 1.693。

因此,由式(7)可计算江西省东江源区水生态保护年补偿量,结果为 31.86 亿元,其中直接成本补偿量 11.06 亿元,机会损失补偿量 20.80 亿元。在实际对江西省东江源区水生态补偿中,由于直接成本与发展机会损失的性质不同,补偿方式也有所不同。直接成本是源区为保护、维持或恢复生态环境而投入的成本,是实际发出的支出和费用,因此在补偿过程中应以资金和项目投资的形式为主,加大资金的投入与管理。发展机会损失是因选择某一决策而放弃另一决策造成的损失,是一种潜在的收益,在补偿过程中应以国家的支持政策和下游对上游的技术与经济合作为主,如在税收方面,对源区产业结构调整过程中实行有期限的减免政策,以帮助源区实现产业转型。

2.4 补偿资金分配

江西省东江源区补偿资金主要分配给为源区水生态保护做出贡献的三县,即寻乌县、安远县、定南县。采用式(8)~(11),应用熵权模型来分配补偿资金。本文涉及 3 个补偿对象($m=3$,寻乌县、安远县、定南县),根据生态补偿资金分配指标选取的科学性、一致性、可行性原则以及影响因素,再结合江西省东江源区实际情况选取补偿资金分配指标,指标的选取应能够体现江西省东江源区生态环境资源情况、社会经济发展情况以及生态环境治理情况,因此就每个补偿对象选取 6 个指标($n=6$),分别为人均水资源量、森林覆盖率、流域集水区面积、人均 GDP、人均财政收入、污染治理投入(不含稀土矿山治理),具体各指标数值如表 1 所示。

根据各区县选取指标的数值确定三个县的补偿资金分配百分比,将直接成本补偿量 11.06 亿元分配给各个县,其中寻乌县应得补偿资金最高,占比为 37.2%,补偿金额为 4.12 亿元;其次是安远县,占比 32.2%,补偿金额为 3.56 亿元;定南县应得补偿资金最少,为 3.38 亿元。具体计算结果如表 2 所示。

表 1 补偿对象资金分配计算参数指标值

补偿对象	人均水资源量/ m^3	森林覆盖率/%	流域集水区面积/ km^2	人均 GDP/万元	人均财政收入/万元	污染治理投入/万元
寻乌县	6491.21	81.5	2074.37	2.4	0.24	17083.37
安远县	4870.71	84.3	614.92	1.91	0.2	5783.00
定南县	5530.71	83.01	924.48	4.09	0.52	6639.36
属性	正向指标	正向指标	正向指标	反向指标	反向指标	正向指标

表2 补偿资金分配计算结果

补偿对象	熵	熵权重/%	补偿资金分配/亿元
寻乌县	0.814	37.20	4.12
安远县	0.839	32.20	3.56
定南县	0.847	30.60	3.38

3 结 语

本文考虑江西省东江源区补偿试点实施过程中实际保护投入及发展机会损失,以权威公开的水量、水质监测体系为基础,提出基于跨省断面水量水质和投入效益的补偿测算模型与资金分配的熵权模型,使补偿标准的测算与资金分配有据可循。经估算,测算的直接成本补偿量为11.06亿元,其中寻乌县4.12亿元,安远县3.56亿元,定南县3.38亿元,该计算结果高于《东江流域上下游横向生态补偿协议》中的补偿金额(中央和下游广东省每年补偿4亿元),因此,随着试点工作的深入开展,应加大对源区水生态的保护投入和补偿力度。

为更有效地弥补限制发展的机会损失,建议加强上下游经济合作,促进流域可持续发展。针对东江流域产业布局现状,实现江西省东江源区与东江下游的产业衔接,创建流域投资共建的经济产业链,实现全流域“生态共建、利益共享”。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 马志鹏,严黎,万东辉,崔树彬.东江全流域生态补偿标准动态研究[C]//河海大学,中国水利经济研究会,黑龙江省水利科学研究院.2017中国水资源高效利用与

节水技术论坛论文集.北京:北京沃特咨询有限公司,2017:8.

[3] 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.
 [4] 高振斌,王小莉,苏婧,等.基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J].生态与农村环境学报,2018,34(6):563-570.
 [5] 刘观香.江西东江源区生态补偿研究[D].江西:南昌大学,2007.
 [6] 胡小华,史晓燕,邹新,等.东江源省际生态补偿模型构建探讨[J].安徽农业科学,2011,39(15):9169-9171.
 [7] 刘洋,毕军.流域生态补偿理论及其标准研究综述[J].水利经济,2018,36(3):10-15.
 [8] 许凤冉,阮本清,王成丽.流域生态补偿理论探索与案例研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
 [9] 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.
 [10] 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.
 [11] 汪义杰,穆贵玲,谢宇宁,等.水源地生态补偿资金分配模型及其应用:以鹤地水库为例[J].生态经济,2019,35(11):194-200.
 [12] 赣州市人民政府.东江流域生态环境保护和治理实施方案[R].赣州:赣州市人民政府,2017.
 [13] GB 3838—2002.《地表水环境质量标准》[S].
 [14] 王浩,马静.水利与国民经济协调发展研究[J].中国水利,2006(8):73-75.
 [15] 刘晓红,虞锡君.基于流域水生态保护的跨省水污染补偿标准研究:关于太湖流域的实证分析[J].生态经济,2007(8):129-135.

(收稿日期:2020-10-22 编辑:许宇鹏)

· 简讯 ·

河海大学出版社出版的《长江保护与绿色发展研究系列2019》(5卷) 获“中国出版政府奖提名奖”

2021年7月29日,第五届中国出版政府奖表彰大会在北京举行,会上对获第五届中国出版政府奖的123种出版物、50家先进出版单位和69名优秀出版人物进行了表彰。

由河海大学出版社出版的《长江保护与绿色发展研究系列2019》(5卷)荣获“中国出版政府奖图书奖提名奖”。该丛书由长江保护与绿色发展研究院和江苏长江保护与高质量发展研究基地联合推出,张建云院士、唐洪武教授、徐辉教授等任编委会主任、副主任,张兵教授、史安娜教授任丛书主编。此外,《长江保护与绿色发展研究系列2019》还入选“2020年全国高校出版社主题出版选题”和“2020年江苏省主题出版重点出版物”,并在中共江苏省委宣传部“礼赞全面小康 致敬建党百年”主题出版重点出版物发布会亮相。

中国出版政府奖由国家新闻出版署组织评选,是我国出版行业的最高奖项,旨在通过奖励、表彰优秀出版物和在出版领域作出突出贡献的先进单位、优秀人物,推动出版业高质量发展,助力社会主义文化强国建设。

(本刊编辑部供稿)