

跨行政区河流水环境生态补偿方法研究

张秀菊¹, 刘美辰¹, 罗煜宁¹, 赵艳红²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 沂沭泗水利管理局水文局(信息中心), 江苏徐州 221018)

摘要: 现行的水环境区域补偿方案存在补偿要素和范围不全面、补偿标准制定不合理及不到位、滞后于经济社会和生态环境的动态变化等不足。针对以上问题,以江苏省常熟市为研究对象,对现行的水环境区域补偿办法进行改进,结合区域经济发展与水环境管理要求,以行政区划为基本单元,根据断面水质浓度、区域用水与排污量等考核指标,提出了综合跨界断面水质类别、过量用水与超标排污等多要素的动态化阶梯水环境生态补偿测算方法。上述方法适用于跨区域之间及区域内,旨在解决现行补偿方案中存在的问题,使补偿标准更为科学合理,从而提升水环境治理水平和效果,促进水生态环境可持续发展。

关键词: 跨行政区河流; 区域水环境生态补偿; 水环境; 动态测算方法; 双向补偿

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0012-09

Ecological compensation methodology for water environment in transboundary rivers

ZHANG Xiuju¹, LIU Meichen¹, LUO Yuning¹, ZHAO Yanhong²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Information

Center of Yi-Shu-Si River Basin Administration Bureau, Xuzhou 221018, China)

Abstract: The existing regional ecological compensation policies for the water environment have deficiencies such as incomprehensive compensation factors and scope, unreasonable and inappropriate compensation standard setting, which made the policies lag behind the dynamic changes of the social economy and ecological environment. In view of these issues, the existing regional compensation method for the water environment in Changshu City, Jiangsu Province is improved. According to the requirements of regional economic development and water environment management, the administrative division is taken as the basic unit, factors such as the concentration of water quality, regional water use and sewage discharge at cross sections were considered to formulate new dynamic laddered calculation methods for water environment compensation based on the water quality category, excessive water use and excessive pollution discharge at transboundary river sections. These methods, which are applicable to inter-regional and intra-regional contexts respectively, are designed to address current compensation issues and to make the compensation standards more scientifically grounded, so as to enhance the level and effectiveness of water environment management and foster the sustainable development of water ecosystems.

Key words: transboundary river; regional water ecological environment compensation; water environment; dynamic calculation method; bidirectional compensation

1 研究背景

水环境污染及水资源不合理利用问题是国内外河流治理面临的重点与难点^[1-2]。研究与实践证明^[3-7],生态补偿是保护水环境的重要手段,通过制定相关政策并实施经济补偿等措施调整生态环境污

染者、保护者和受益者各方利益关系,可以有效实现生态系统的修复及生态环境的改善。国内外学者对水环境生态补偿的研究大多集中在水质、水量、水足迹以及水体提供的生态环境服务等方面,其中包括确定水环境生态补偿要素,并从多个角度测算补偿金额等。补偿标准测算方法通常要考虑成本价值与

收稿日期:2023-04-28; 修回日期:2023-09-18

基金项目:江苏省水利科技项目(2015070)

作者简介:张秀菊(1971—),女,河北藁城人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者:刘美辰(2000—),女,湖北十堰人,硕士研究生,研究方向为水生态保护。

水资源保护目标等因素。成本价值测算方法目前主要有机会成本法^[8]、条件价值法(支付意愿法)^[9-10]及生态系统服务价值法^[11-12]等;水足迹法^[13]和水量水质保护目标核算法则主要侧重于水资源保护目标,其中水量水质保护目标核算法具有计算依据充分和实用性强等特点^[14],在国内应用较多。补偿标准较为直接的测算方法是将流域水量水质要素纳入水环境生态补偿,通过测算不同地区的水量使用和水质情况得出水环境生态补偿标准,这种方法可以辨识流域上下游地区对于水量水质保护与管理的贡献程度^[15-16];还有学者将水文频率引入测算方法中,测算流域在不同来水情境下的水环境生态补偿标准^[17]。补偿标准较为间接的测算方法是从成本或价值的角度出发,测算水量水质要素的权重系数并将其与流域水环境生态补偿总成本或效益值相乘得到水环境生态补偿标准^[18-19]。我国的水环境生态补偿研究与实践多集中在流域层面,而流域通常包括多个部门与地区,导致水环境生态补偿的主客体系界定较为困难;流域层面的补偿金额往往通过协商谈判确定,难以形成具有执行力和法律效力的补偿标准,也影响了上下游地区保护生态环境的积极性与主动性。区域水环境补偿以行政区域为单元进行生态补偿,可以充分利用区域资源与政策优势,从利用主体角度出发,综合考虑水浪费、水污染、水保护及经济社会发展情况等多个方面,其补偿方案具有完整、动态调控、灵活多样、操作便利等特点。因

此研究区域层面的水环境生态补偿具有重要的意义,可以在区域层面实现横向与纵向相结合的补偿方案。

江苏省作为首个实施水环境区域补偿的省份,对于补偿断面水质实行“双向补偿”^[20],但在补偿要素、补偿范围、补偿形式等方面存在不足,补偿标准滞后于经济社会、生态环境的动态变化。本研究以“谁破坏,谁补偿”“谁保护,谁受偿”为原则,结合区域经济发展与管理要求,对江苏省现行的水环境区域补偿方案进行改进,提出了基于跨界断面水质类别、过量用水、超标排污的阶梯型区域水环境动态补偿方法,该方法适用于跨区域间及区域内的经济补偿。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

2.1.1 常熟市概况 常熟市为江苏省苏州市下辖的县级市,位于江苏省东南部,长江、太湖下游,长江三角洲前缘,属长江、太湖水系,地理坐标为 $120^{\circ}33' \sim 121^{\circ}03' E, 31^{\circ}31' \sim 31^{\circ}50' N$ 。全市总面积 $1\,276.32\text{ km}^2$ (含所属长江水域面积),下辖8个镇,6个街道。境内水网密布,河道纵横,湖荡众多。市域内有长江、望虞河2条流域性河道,8条区域性河道,包括常浒河、锡北运河和元和塘等,其中,元和塘南起苏州市姑苏区,流经相城区,北至常熟市。常熟市水域总面积为 253.86 km^2 ,水面率达 19.89% ,陆域部分水面率为 12.8% ,详见图1。

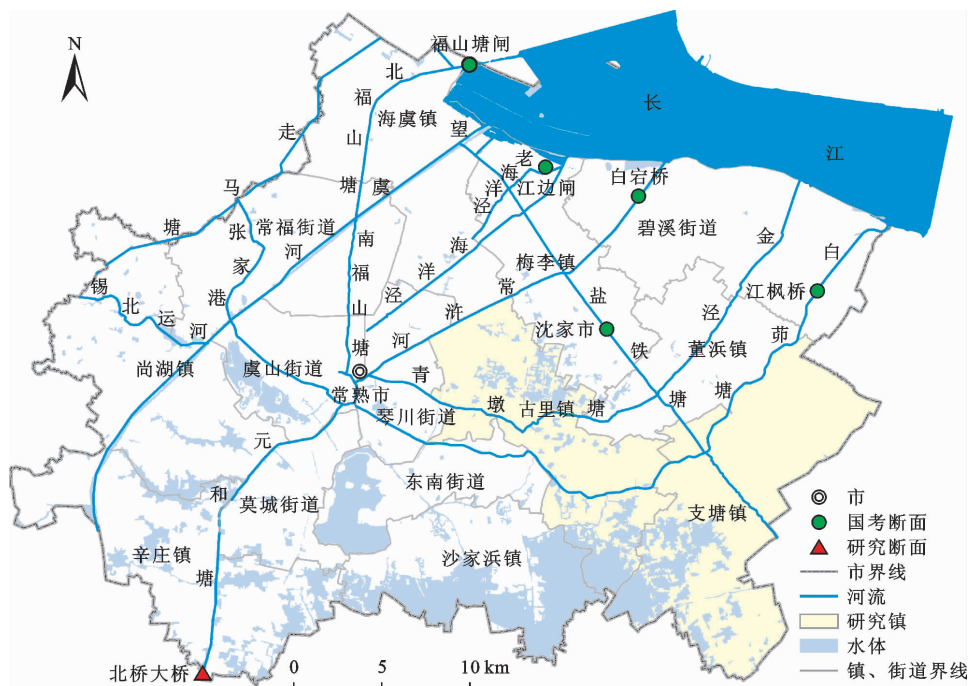


图1 常熟市主要水系及行政区划图

2.1.2 常熟市水环境补偿状况 目前常熟市水环境生态补偿方案按照《江苏省水环境区域补偿工作方案(2020年修订)》(以下简称《江苏补偿方案》)要求,实行“双向补偿”。根据考核断面(跨界考核断面、直接入海入湖入江考核断面)的水质是否达标,确定断面上、下游地区之间的补偿金额,若断面水质优于目标水质,补偿金额由下游地区支付上游地区,反之则由上游支付下游。该方案责任主体明确,也取得了一定的成效。但是,目前常熟市的水环境区域补偿仍存在一些问题:

(1)补偿形式为政府财政转移支付,形式较为单一,加重了政府财政的负担;

(2)方案中仅涉及补偿断面的水质,未体现区域内环境破坏、受损、保护、受益等情况的相关责任

和补偿关系,补偿要素和范围不全面;

(3)补偿标准类似于“定额补助”,缺少科学的量化测算方法,且补偿金额受限于政府财政预算,实际补偿量与应补偿量存在差距。

综上所述,常熟市水环境区域补偿方案未充分体现经济社会、环境的动态变化,制定的补偿标准不合理、不到位。本研究将根据河流水质类别、区域用水量、经济社会发展水平等要素,定量地、动态化地测算该市跨行政区河流水环境补偿标准。

2.2 数据来源

数据源自:地方年鉴数据,包括2017、2022年《常熟统计年鉴》;政府官方网站及生态环境局提供的相关资料,包括中国环境监测总站监测数据、常熟市生态环境局统计数据等。本研究所用数据情况见表1。

表1 本研究所用数据内容及来源

数据类型	内容	尺度	来源
水环境	2021年北桥大桥水质考核断面污染物浓度	月	中国环境监测总站
经济	各地区水质考核断面年补偿金额	年	各地方政府官方网站 2017、2022年《常熟统计年鉴》
	2016、2021年古里镇、支塘镇和常熟市的人均地区生产总值		
水资源管理	2016、2021年古里镇和支塘镇计划、实际用水量	年	常熟市生态环境局
	2016、2021年古里镇和支塘镇计划、实际污染物排放量		

2.3 研究方法

主要以相邻县级市(有跨界河流)及其所辖乡镇、街道为计算单元进行水环境生态补偿研究。如图2所示。

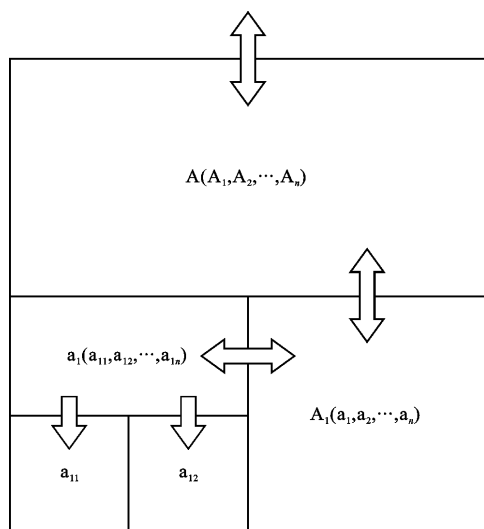


图2 跨行政区河流水环境生态补偿示意图

各行政级别从上至下依次为省级行政区A、地级行政区(A_1, A_2, \dots, A_n)、县级行政区(a_1, a_2, \dots, a_n)及乡级行政区($a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}$),同级别行政区不具有

隶属关系,相邻上下级行政区具有行政隶属关系。不具有行政隶属关系的地区之间可开展综合跨界断面水质类别、区域过量用水与超标排污等因素的双向水环境生态补偿,补偿方式为横向转移支付;具有行政隶属关系的地区可实施区域过量用水与超标排污的单向水环境生态补偿,补偿方式为上一级政府对下一级政府进行纵向财政转移支付。

2.3.1 跨界断面阶梯型水环境生态补偿标准计算方法 跨界断面水环境生态补偿将跨界河流断面的水质考核目标及污染物现状浓度纳入到水环境生态补偿计算方法中。图3为跨行政区水环境生态补偿断面示意图。河流上下游位置根据当前的河流流向确定。例如水流从断面I流向断面II时,行政区A为上游,行政区B为下游。

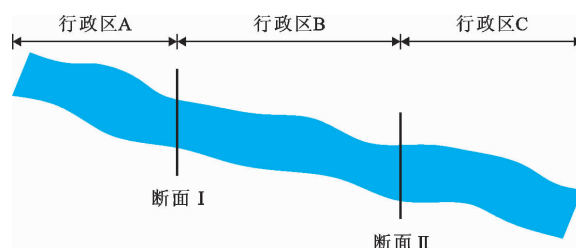


图3 跨行政区水环境生态补偿断面示意图

区域上游应承担保护河流水环境的主体责任,确保良好水质;而下游地区应当补偿上游地区,以支持其生态保护和资源共享行为。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2022)中各污染物指标不同类别标准上限值,将目标水质类别设为Ⅲ类水标准,依照单因子评价法,当污染物实际水质类别劣于目标水质时(水质类别越低,河流污染越严重),应进行补偿。针对不同水质类别的污染物采取阶梯型补偿额度,计算方法见公式(1)。

$$M = \sum_{j=1}^n (M_i^j + \frac{C_A^j - C_{i-1}^j}{C_i^j - C_{i-1}^j} \cdot \Delta M_i^j) \quad (1)$$

式中: M 为跨界断面水环境生态补偿标准, 10^4 元/月; n 为污染物类别总数; M_i^j 为第 j 类污染物在实际水质类别 i 类水对应的补偿基数, 10^4 元/月; C_A^j 为河道水质考核断面的第 j 类污染物实测浓度, mg/L ; C_i^j 为第 j 类污染物在实际水质类别 i 类水对应的标准上限值, mg/L ; C_{i-1}^j 为第 j 类污染物在 $i-1$ 类水对应的标准上限值, mg/L ; ΔM_i^j 为第 j 类污染物在实际水质类别 i 类水对应的阶梯补偿基数, 10^4 元/月。

不同水质类别对应的补偿基数以及阶梯补偿基数根据目标水质,并参照区域补偿方案或由专家评估获得,由于部分污染物指标的水质类别为劣V类时,在《地表水环境质量标准》(GB 3838—2022)中无对应的标准上限值,此时该类污染指标的补偿额度按公式(2)计算。

$$M_{劣V} = \sum_{j=1}^r (M_{劣V}^j + \frac{C_A^j - C_V^j}{C_V^j - C_N^j} \cdot \Delta M_{劣V}^j) \quad (2)$$

式中: $M_{劣V}$ 为污染物水质类别为劣V类时的补偿标准, 10^4 元/月; r 为水质类别为劣V类的污染物类别总数; $M_{劣V}^j$ 为第 j 类污染物水质类别为劣V类时对应的补偿基数, 10^4 元/月; C_A^j 为第 j 类污染物的实测浓度, mg/L ; C_V^j 为第 j 类污染物水质类别为V类时的标准上限值, mg/L ; C_N^j 为第 j 类污染物水质类别为IV类时的标准上限值, mg/L ; $\Delta M_{劣V}^j$ 为第 j 类污染物水质类别为劣V类时对应的阶梯补偿基数, 10^4 元/月。

随着水环境治理的不断推进,区域中部分污染物得到了有效控制,水体质量得以提升。对于此类区域,若根据目标水质类别测算水环境生态补偿量,会导致补偿金额偏低,无法起到激励作用;对于因个别水质指标改善难度大而导致水质差的区域,例如某区域的农业面源污染难以治理,部分污染物指标居高不下,在该情况下如果根据目标水质类别进行测

算,则会导致补偿金额过高,地方财政负担加重。因此,为避免补偿金额测算不合理,同时考虑到污染物的治理难度,本文引入污染物浓度修正系数 γ ,改进后的计算方法如公式(3)~(5)。

$$M' = \sum_{j=1}^n (M_i^j + \frac{\gamma^j \cdot C_A^j - C_{i-1}^j}{C_i^j - C_{i-1}^j} \cdot \Delta M_i^j) \quad (3)$$

$$M_{劣V}' = \sum_{j=1}^r (M_{劣V}^j + \frac{\gamma^j \cdot C_A^j - C_V^j}{C_V^j - C_N^j} \cdot \Delta M_{劣V}^j) \quad (4)$$

$$\gamma^j = \frac{C_i^j}{C_{st}^j} \quad (5)$$

式中: M' 为修正后的跨界断面水环境补偿标准, 10^4 元/月; γ^j 为第 j 类污染物浓度修正系数; $M_{劣V}'$ 为污染物水质类别为劣V类时修正后的补偿标准, 10^4 元/月; C_i^j 为水体中第 j 类污染物的目标浓度, mg/L ; C_{st}^j 为水体第 j 类污染物的设定目标浓度, mg/L ,根据第 j 类污染物的治理难度及水环境现状设定。

跨界断面阶梯型水环境生态补偿方向可分为3种情况,详见表2。

表2 跨界断面阶梯型水环境生态补偿方向

断面水质情况	补偿方向
$C_A^j > C_{st}^j$	上游行政区补偿下游行政区
$C_A^j = C_{st}^j$	不补偿
$C_A^j < C_{st}^j$	下游行政区补偿上游行政区

注:若第 j 类污染物无设定目标浓度,则表中 $C_{st}^j = C_i^j$ 。

2.3.2 基于区域过量用水与超标排污的水环境生态补偿标准计算方法 节约水资源与提高用水效率是保护和改善生态环境、促进区域经济社会可持续发展的必然要求。过量用水会导致下游地区的生活、生产与生态用水量减少;超标排污会影响区域所在河段及下游的水质。因此,区域水环境生态补偿应考虑水资源过度使用及污染物超标排放这两种情况。下文以行政区A为例进行阐述。

(1) 过量用水情况下的水环境生态补偿标准计算方法。行政区A的用水对其他地区产生的影响体现在两个方面,一是使用的水量超出允许或计划的用水量,导致其他地区用水量不足;二是过量取水挤占了河道内预留的生态环境用水,影响了河道的生态环境。过量用水水环境生态补偿计算见公式(6)。

$$M_1 = (Q_A - Q_0) \cdot \Delta V \quad (6)$$

式中: M_1 为过量用水情况下的水环境生态补偿标准, 10^4 元/a; ΔV 为强化节水的替代成本或被挤占用水的单位水量损失,由于 ΔV 数值较难确定,本文

以目前实施的水资源费替代,元/m³; Q_A 为行政区 A 实际用水量,10⁴ m³/a; Q_0 为正常情况下行政区 A 允许或计划的用水量指标,10⁴ m³/a。

根据公式(6),水环境生态补偿量分为3种情况:

①当 $Q_A - Q_0 > 0$ 时,行政区 A 的实际取水量超出其允许的水量限额,该行政区应对超出的用水量付费补偿;

②当 $Q_A - Q_0 = 0$ 时,行政区 A 的实际取水量等于其允许的水量限额,不需要补偿;

③当 $Q_A - Q_0 < 0$ 时,行政区 A 的实际取水量小于其允许的水量限额,节约了用水,由下游或上级行政区补偿该行政区。

(2) 超标排污情况下的水环境生态补偿标准计算方法。计算方法中选取区域各河流、水功能区限制排放的污染物指标为判别因子。超标排污对地区生态造成危害,提高了水污染治理成本。鉴于区域的经济社会发展水平及政府支付能力,在计算时引入补偿调节系数 α ,计算方法如公式(7)、(8)。

$$M_2 = \sum_{j=1}^m (P_A^j - P_0^j \cdot C_0^j) \cdot \alpha \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\max(P_A, P_0)}{\min(P_A, P_0)} \cdot \frac{PGDP_A}{PGDP} \quad (8)$$

式中: M_2 为超标排污情况下的水环境生态补偿标准,10⁴ 元/a; m 为区域限制排放的污染物类别总数; P_A^j 为上游行政区 A 所在河段的第 j 类污染物入河量,10⁴ t/a; P_0^j 为正常情况下行政区 A 所在河段允许(或能够分解)的第 j 类污染物入河量,10⁴ t/a; C_0^j 为第 j 类污染物的单位处理成本,元/t; α 为补偿调节系数, α 小于1时取 $\alpha = 1$; P_A 为行政区 A 污染物排放总量,10⁴ t/a; P_0 为行政区 A 允许的污染物排放总量,10⁴ t/a; $PGDP_A$ 为行政区 A 的人均 GDP,元/人; $PGDP$ 为区域人均 GDP,元/人。

根据公式(7),水环境污染生态补偿量可分为3种情况:

① $P_A^j - P_0^j > 0$ 时,行政区域 A 所在河段的第 j 类污染物入河量超过了该河段允许的入河排污量,行政区 A 应支付补偿费用;

② $P_A^j - P_0^j = 0$ 时,行政区域 A 所在河段的第 j 类污染物入河量等于该河段允许的入河排污量,该行政区无需进行补偿;

③ $P_A^j - P_0^j < 0$ 时,行政区域 A 所在河段的第 j 类污染物入河量低于该河段允许的入河排污量,行政区 A 为下游或区域提供了优良水质,下游或上级行政区应对行政区 A 做出补偿。

(3) 过量用水与超标排污阶梯型水环境生态补偿标准计算方法。超计划用水或排污量越大,对区域环境、经济社会的危害越大,越不利于区域的可持续发展。因此,本文制定“阶梯补偿标准”来反映过量用水、超标排放污染物的情况。参考《江苏省节约用水条例》(2016年)确定用水(节水)阶梯补偿系数 k_1 ;参考《城镇排水与污水处理条例》(2013年)确定排污(减污)阶梯补偿系数 k_2^j ,计算方法见公式(9)~(12)。

$$k_1 = \begin{cases} 1.0 & (5\% \leq n_1 < 10\%) \\ 2.0 & (10\% \leq n_1 < 20\%) \\ 3.0 & (20\% \leq n_1 < 30\%) \\ 5.0 & (n_1 \geq 30\%) \end{cases} \quad (9)$$

$$n_1 = \frac{(Q_A - Q_0)}{Q_0} \times 100\% \quad (10)$$

$$k_2^j = \begin{cases} 1.0 & (0 < n_2^j \leq 10\%) \\ 2.0 & (10\% < n_2^j \leq 30\%) \\ 3.0 & (n_2^j > 30\%) \end{cases} \quad (11)$$

$$n_2^j = \left(\frac{P_A^j - P_0^j}{P_0^j} \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中: k_1 为用水(节水)阶梯补偿系数; n_1 为实际用水量超过或低于计划用水量的百分比,%; k_2^j 为第 j 类污染物的排污(减污)阶梯补偿系数; n_2^j 为第 j 类污染物实际排放量超过或低于计划排放量的百分比,%。

综合过量用水与超标排污双重因素的补偿标准见公式(13)~(15)。

$$M'_1 = k_1 \cdot (Q_A - Q_0) \cdot \Delta V \quad (13)$$

$$M'_2 = \sum_{j=1}^m (k_2^j \cdot (P_A^j - P_0^j) \cdot C_0^j) \cdot \alpha \quad (14)$$

$$M'_3 = M'_1 + M'_2 \quad (15)$$

式中: M'_1 为过量用水情况下的阶梯型水环境生态补偿标准,10⁴ 元/a; M'_2 为超标排污情况下的阶梯型水环境生态补偿标准,10⁴ 元/a; M'_3 为过量用水-超标排污情况下的阶梯型水环境生态补偿标准,10⁴ 元/a。其余物理量含义同前。

依据河流量水质的不同状况,补偿标准可分为3类。

①水量型水环境生态补偿,即超量取用水资源,如工农业用水超标等,适用于 $Q_A > Q_0, P_A^j \leq P_0^j$ 的情况,按照公式(13)计算补偿标准;

②水质型水环境生态补偿,即水质污染,如发展工业导致废污水排放超标,农业过量施肥超排,突

发性水污染事故等,适用于 $Q_A \leq Q_0, P_A^j > P_0^j$ 的情况,按照公式(14) 计算补偿标准;

③ 水量水质型水环境生态补偿,即过量用水与超标排污的组合补偿,适用于 $Q_A > Q_0, P_A^j > P_0^j$ 的情况,按照公式(15) 计算补偿标准。

3 结果与分析

3.1 跨界断面阶梯型水环境生态补偿标准测算

测算实例为常熟市与苏州市相城区的跨界国考断面,即常熟市北桥大桥断面,该断面位于元和塘河道,属太湖流域。污染指标选择高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮。目标水质类别为Ⅲ类水。总氮、总磷是太湖流域主要的污染指标,根据《江苏补偿方案》,总磷的设定目标浓度为 0.15 mg/L,总氮的设定目标浓度为 3 mg/L,依据公式(5) 计算得到总磷浓度修正系数为 1.33,总氮浓度修正系数为 0.33。参考《江苏补偿方案》试算得到污染物在不同水质类别下的补偿基数及阶梯补偿基数,详见表 3。

表 3 各污染物因子补偿基数和阶梯补偿基数 10^4 元/月

污染物水质类别	补偿基数	阶梯补偿基数
Ⅲ类及以上	-25	0
Ⅳ类	0	40
Ⅴ类	65	55
劣Ⅴ类	150	125

注:正数表示正向补偿即为上游补偿下游,负数表示反向补偿即下游补偿上游。

北桥大桥断面 2021 年监测的污染物因子浓度变化如图 4 所示。高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮的设定目标浓度上限值分别为 6.00、1.00、0.15 和

3.00 mg/L。由图 4 可知,除缺测月份外,2021 年高锰酸盐指数、氨氮和总氮浓度均优于目标值;总磷浓度于 2021 年 2 和 6 月高于设定目标浓度上限值。

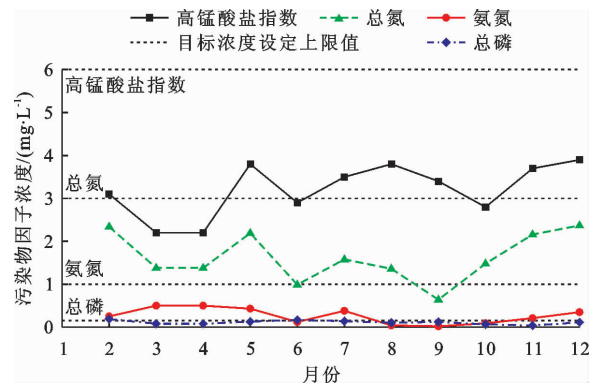


图 4 2021 年各月份北桥大桥断面污染物因子浓度

元和塘经苏州市相城区流至常熟市,正向补偿方式为相城区补偿常熟市,反向补偿方式为常熟市补偿相城区。根据北桥大桥断面各污染物浓度数据进行补偿金额测算,测算结果见表 4。

由图 4 和表 4 可以看出,2021 年 2 和 6 月该断面总磷浓度超标,且 2 月超标浓度较 6 月更高,根据“谁污染,谁付费”的原则,由相城区正向补偿常熟市,且 2 月的正向补偿金额高于 6 月;2021 年 3—5 月、7—12 月,各类污染物因子浓度均优于设定目标浓度,根据“谁保护,谁受益”的原则,相城区为下游常熟市提供了优良的水质,由常熟市反向补偿相城区。2021 年 2 和 6 月正向补偿金额为 29.33×10^4 元,2021 年 3—5 月、7—12 月反向补偿金额为 225.00×10^4 元。2021 年北桥大桥断面补偿金额为 195.67×10^4 元,补偿方向为反向补偿,即常熟市补偿相城区。

表 4 2021 年北桥大桥断面补偿测算结果

10^4 元

补偿方向	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总额
正向		19.73	0	0	0	9.60	0	0	0	0	0	0	29.33
反向		0	-25.00	-25.00	-25.00	0	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00	-25.00	-225.00

注:缺测 1 月数据。

补偿断面上游相城区长期重视水环境保护工作,多数月份水质良好。由图 4 可以看出,2021 年 3—5 月、7—12 月北桥大桥断面水质浓度均优于目标水质,因此由下游常熟市补偿相城区。然而北桥大桥断面周围分布着大量的林地,上游沿岸有居民区,在雨季面源污染不可避免。在多雨季节,雨水冲刷导致地面污染物进入河道,河流水质变差,此时补

偿方向为由上游相城区补偿下游常熟市,补偿金额集中在 2021 年 2 和 6 月。

为检验测算结果的合理性,本文通过地方官网收集到部分地区水质考核断面年补偿金额情况(表 5)。由表 5 可知,各断面年补偿金额在 $51 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$ 元之间,本研究测算结果与其相近且处于同一量级内。

表5 2021年不同水质考核断面补偿情况

断面名称	补偿金额/10 ⁴ 元
寒亭区流域横向生态断面	102
北环路白浪河大桥断面	51
兰溪将军岩断面	200

3.2 基于区域过量用水与超标排污的阶梯型水环境生态补偿标准测算

本文所用的用水、排污和经济数据根据2017年、2022年《常熟统计年鉴》和常熟市生态环境局统计数据收集或折算得到。依据前述计算公式得出:2016年古里镇、支塘镇节水阶梯补偿系数均为5.0;2021年两镇节水阶梯补偿系数分别为2.0和3.0。水资源费按照苏州市水资源费征收标准0.20元/m³计算,2016年古里镇、支塘镇节水补偿金额分

别为 141.35×10^4 和 59.29×10^4 元;2021年古里镇、支塘镇节水补偿金额分别为 35.00×10^4 和 25.56×10^4 元。

2016年古里镇的氨氮、总磷减污阶梯补偿系数分别为2.0与3.0,补偿调节系数为1.41;支塘镇的氨氮、总磷减污阶梯补偿系数均为3.0,补偿调节系数为1.68。2021年古里镇的氨氮、总磷减污补偿系数均为3.0,补偿调节系数为1.38;支塘镇的氨氮、总磷减污阶梯补偿系数均为3.0,补偿调节系数为2.67。参考戴家远^[21]的研究成果进行取值,单位氨氮、总磷减污成本分别按照1100和900元/t计算,则2016年古里镇、支塘镇减污补偿金额分别为 6.53×10^4 和 7.39×10^4 元;2021年古里镇、支塘镇减污补偿金额分别为 11.79×10^4 和 12.43×10^4 元。2016、2021年两镇补偿测算结果详见表6。

表6 2016、2021年古里镇和支塘镇补偿测算结果

乡镇	2016补偿金额/10 ⁴ 元			2021补偿金额/10 ⁴ 元			补偿方向
	节水	减污	总额	节水	减污	总额	
古里	141.35	6.53	147.88	35.00	11.79	46.79	常熟市补偿古里镇
支塘	59.29	7.39	66.68	25.56	12.43	37.99	常熟市补偿支塘镇

常熟市古里镇、支塘镇为相邻的镇,水系间相互连通。由表6测算结果可知,根据“谁节约,谁受偿”原则,2016和2021年古里镇、支塘镇在节水减污方面做出了贡献,两镇的用水量与排污量均小于计划额度,2016年常熟市财政应分别向古里镇、支塘镇支付补偿金额 147.88×10^4 和 66.68×10^4 元;2021年应分别支付两镇 46.79×10^4 和 37.99×10^4 元。2016年古里镇、支塘镇均获得节水减污补偿,由于节水多、水量基数大,节水补偿金额较减污补偿金额更高;2021年两镇所获节水、补偿金额比2016年有所减少,主要原因是2021年两镇用水量较2016年有所增多,节水量与节水补偿金额因此减少;2021年两镇减污补偿金额较2016年多,是由于两镇的污水、氨氮和总磷的减污量高于2016年,减污补偿金额因此增加。

2016、2021年古里镇的GDP分别为 154.86×10^8 和 120.02×10^8 元,支塘镇的GDP分别为 71.36×10^8 和 88.06×10^8 元。古里镇发展以第二产业为主,2021年经济指标低于2016年,污染物排放量也相应降低,所获减污补偿金额较2016年更高;支塘镇2021年GDP高于2016年,但污染物排放量下降,主要原因是支塘镇产业结构中第三产业

占比较大,污染物排放量受工业影响较小,因此所获减污补偿高于2016年。2021年古里镇、支塘镇用水量增多,节水量小于2016年,因此两镇节水补偿金额均低于2016年。

常熟市2016、2021年一般公共预算支出分别为 158.74×10^8 和 273.39×10^8 元,2016、2021年古里镇及支塘镇共获节水减污补偿金额分别为 214.56×10^4 和 84.78×10^4 元,其值占常熟市一般公共预算支出的比重很小,因此采用以政府为主体的纵向补偿方式是可行的。

4 讨论

测算跨界水质断面的补偿金额需要考量多方面的因素,包括入境与出境水质的指标浓度、断面水质考核指标与目标、当月河流是否断流、污染物治理成本与治理难度等。通常情况下,断面水质存在多个超标指标,若分别按照其实际浓度计算各超标因子补偿金额并求和^[22],则可能导致补偿金额偏大,加重地方财政压力。水环境生态补偿作为一种水环境保护与管理手段,具有奖惩性质,水质改善效果不仅与前期水质类别、污染治理的投入^[23]有关,还与污染物削减难度有关。本文根据断面水质考核目标、

实际污染物浓度、水流流向等因素构建阶梯补偿标准测算模型,从区域农业面源污染难以治理、总磷浓度降低缓慢的实际情况出发,提出了区分指标差异的污染物浓度修正系数。在跨界断面水环境补偿测算中提出的“阶梯补偿”“污染物浓度修正系数”等方法,考虑因素较为全面,资料易于获取,对于当前时期污染治理难点问题的处理方式也较为“灵活”。通过补偿可提升上下游地区减污的积极性及参与度,在相邻地区之间实行横向补偿能够体现权责对等,缓解了因水污染治理难而导致的水环境生态补偿财政压力。

过量用水与超标排污均会影响区域所在河段及下游的水质。因此,区域水环境生态补偿应包括水资源过度使用及污染物超标排放两种情况。工业污染排放量与地区经济水平有密切的关系^[20],由于区域内各行政单元的支柱产业及发展速度并不相同,在构建水环境测算模型时应综合权衡各行政单元GDP与区域经济的差异,以及经济结构中第二、三产业的占比。根据计算结果,古里镇经济以第二产业为主,2021年经济水平低于2016年,其污染物排放减少,2021年减污补偿金额较2016年多;支塘镇产业结构中第三产业占比大,2021年GDP高于2016年,但污染物排放量减少,所获减污补偿金额高于2016年。本文计算结果表明,排污、减污、用水、节水等皆是水环境生态补偿测算中应当考虑的重要因素,同时,衡量各行政单元的经济差异亦将增加水环境生态补偿额度动态变化的合理性。区域过量用水与超标排污的阶梯型补偿标准以乡级行政区划分补偿单元,兼顾地区经济水平及节水、减污的奖惩性,便于上级行政区划自上而下进行纵向生态补偿,有利于逐级细化区域水环境保护与管理。

纵向水环境生态补偿是以政府财政补贴的形式向下级行政区拨款,但仅靠政府纵向补偿无法衡量区域间经济发展与生态保护的冲突,因此,区域纵向补偿应与横向补偿(跨界断面水环境生态补偿标准)相结合,实现区域内与区域间的共同治理,构建“以横向水环境生态补偿为主,纵向水环境生态补偿为辅”的运作体系。通过纵、横向补偿相结合的方式,逐级开展水环境生态补偿,可避免因上级政府单一支付而导致财政压力过大等问题,促进环境保护地区与生态受益地区利益共享、互帮互助。

5 结 论

(1)根据断面水质类别、考核目标、污染物浓度

等参数,提出了跨界断面阶梯型水环境生态补偿测算方法,该方法较现行的水环境生态补偿方案更为合理。以北桥大桥断面为例,测算了2021年苏州市相城区-常熟市的水环境生态补偿金额。

(2)针对区域排污、减污、用水、节水、经济发展指标,以及部分污染因子治理难度大等实际情况,提出了基于过量用水与超标排污的阶梯型水环境动态补偿标准测算方法。以古里镇和支塘镇为例,测算并对比了2016、2021年常熟市乡镇的补偿金额。计算结果显示,减污、节水是影响水环境质量与补偿金额的重要因素,随着区域节水、减污的不断推进以及社会经济的发展,水环境生态补偿额度在时空上呈现动态变化。

(3)本文提出的补偿标准测算方法综合考虑了区域水环境特征及各行政单元的经济状况。社会生态系统具有异质性,不同区域水环境特征和社会经济状况均存在差异^[24]。因此,在运用结论(1)、(2)中的测算方法时,部分水环境补偿要素或系数(如污染物因子和修正系数等),应根据当地水环境现状及目标要求、地区财政支付能力等具体情况做出相应地调整。

参考文献:

- [1] 张维蓉,张梦然. 当前我国水污染现状、原因及应对措施研究[J]. 水利技术监督, 2020(6):93-98.
- [2] MELLAH T. Effectiveness of the water resources allocation institution in Tunisia [J]. Water Policy, 2018, 20(2): 429-445.
- [3] 蒋毓琪,陈珂. 流域生态补偿研究综述[J]. 生态经济, 2016,32(4):175-180.
- [4] CAPODAGLIO A, CALLEGARI A. Can payment for ecosystem services schemes be an alternative solution to achieve sustainable environmental development? A critical comparison of implementation between Europe and China [J]. Resources, 2018, 7(3): 40.
- [5] RAI R K, NEPAL M, BHATTA L D, et al. Ensuring water availability to water users through incentive payment for ecosystem services scheme: a case study in a small hilly town of Nepal [J]. Water Economics and Policy, 2019, 5(4): 1850002.
- [6] 黄亮,罗昊,许衡. 东江流域水资源管理与保护实践及思考[J]. 水利规划与设计,2020(7):56-58+161.
- [7] 何理,赵文仪,侯保俊,等. 地下水生态补偿机制的回顾与探索[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):1-6.
- [8] RAO Qinghua, LIN Xiuzhu, CHEN Fang, et al. Research into an ecological compensation standard in the Minjiang

- River Basin under the combined scenario of ‘clear property rights, water quality and quantity, and opportunity cost’ [J]. *Water Supply*, 2022, 22(10): 7873-7883.
- [9] MCGINNIS I, ATALLAH S S, HUANG J C. Households’ preferences for hydrological services in Veracruz, Mexico: the importance of outcomes vs. program design[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113763.
- [10] PENG Zhuoyue, PU Hangrong, HUANG Xi, et al. Study on public willingness and incentive mechanism of ecological compensation for inter-basin water transfer in China in the carbon neutral perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109397.
- [11] 杨帅琦,王金叶,李何英. 基于生态系统服务价值的漓江流域生态补偿额度测算[J/OL]. *水生态学杂志*:1-14 [2024-03-10]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202207030247>.
- [12] CAMPOS R P, DE OLIVEIRA R C N, VERÓL A P, et al. Payment for environmental services for flood control analysis and method of economic viability[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 145907.
- [13] 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.
- [14] 郭庆,王敏英,王晨野. 流域生态补偿标准核算方法研究进展[J]. *浙江林业科技*, 2022, 42(2): 84-89.
- [15] 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.
- [16] 郑野,聂相田,苏钊贤. 南水北调中线工程河南水源区生态补偿标准研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(4): 92-95 + 101.
- [17] HAO Cailian, YAN Denghua, GEDEFAM M, et al. Accounting of transboundary ecocompensation standards based on water quantity allocation and water quality control targets[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(6): 1731-1756.
- [18] WANG Yizhuo, YANG Rongjin, LI Xiuhong, et al. Study on trans-boundary water quality and quantity ecological compensation standard: a case of the Bahao bridge section in Yongding River, China[J]. *Water*, 2021, 13(11): 1488.
- [19] 尹正杰,庄超,陈进. 长江干流跨省横向生态补偿机制框架探讨[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(7): 16-21.
- [20] 秦炳涛,俞勇伟,葛力铭. 水环境区域补偿的改善效应及机制研究:基于江苏省的准自然实验[J]. *华东经济管理*, 2022, 36(2): 21-31.
- [21] 戴家远. 流域生态补偿标准核算研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.
- [22] 付朝臣,刘家宏,栾清华,等. 基于断面水质和污水治理任务双考核的水环境区域补偿研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(6): 14-18.
- [23] 强安丰,汪妮,雒少江,等. 基于成本视角的水质水量双向调节生态补偿量研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 144-149.
- [24] AGUILAR-GÓMEZ C R, ARTEAGA-REYES T T, GÓMEZ-DEMETRIO W, et al. Differentiated payments for environmental services: a review of the literature[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101131.

(上接第 11 页)

- [42] 冯平,毛慧慧,王勇. 多变量情况下的水文频率分析方法及其应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(1): 33-37.
- [43] ZHOU Jiayue, LU Hui, YANG Kun, et al. Projection of China’s future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(3): 528-546.
- [44] YAN Baowei, MU Ran, GUO Jing, et al. Flood risk analysis of reservoirs based on full-series ARIMA model under climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127979.
- [45] 刘金华,唐俊龙,张磊磊,等. 气候变化情景下杨房沟水电站未来设计洪水计算[J]. *水资源研究*, 2021, 10(4): 399-407.
- [46] 李正坤. 气候变化情景下水库设计洪水及风险评估与系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [47] TAKELE G S, GEBRE G S, GEBREYOHANNES A G, et al. Future climate change and impacts on water resources in the Upper Blue Nile Basin[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2022, 13(2): 908-925.