

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.005

# 河流跨界水污染双向补偿量化研究

朱 琪, 罗军刚, 张 璇

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对河流上游水体中污染物跨界传递对下游水体造成污染的问题,提出了河流污染物跨界传递影响量化补偿方法及体系框架,以解决传统补偿核算未将反向补偿、河道断面流量和污染物跨界传递三个因素纳入补偿考核的问题,为跨界水污染补偿损益核算提供了一种更公平、科学和严谨的方法。选取渭河干流进行实例验证,采用基于断面污染物通量的成本处理法,以水质和水量资料为支撑,COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为补偿因子,以市界断面水质是否超标为基准,计算出上游河道水体污染物对下游河道断面水质的贡献率,并结合水污染补偿标准进行水污染损益补偿核算,从而得到各个市区应该获得/承担的补偿量/赔偿量,界定和量化了利益相关方的水污染补偿责任,能更加客观合理地进行补偿。结果表明:补偿/赔偿支出基本能反映各行政区的水环境质量情况,能解决跨界水污染补偿难以落实的问题,为补偿金核算的应用提供借鉴和参考。

**关键词:** 跨界; 污染物; 传递影响; 量化补偿; 损益核算; 污染物通量

**中图分类号:** TV122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2021)02-0185-09

## Quantitative study of two-way compensation for rivers transboundary water pollution

ZHU Qi, LUO Jungang, ZHANG Xuan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of pollution caused by transboundary pollutants transferring from the upper reaches to the lower reaches of rivers, a quantitative compensation method and system framework for the impact of transboundary pollutants in rivers are proposed. In order to solve the problem that using the traditional compensation methods does not consider the factors of reverse compensation, river section flow or transboundary pollutants transfer, the paper provides a fairer, more scientific and more rigorous method for calculating the profit and loss of transboundary water pollution compensation. The main stream of Weihe River is selected for verification. The cost treatment method based on pollutant flux of section is supported by water quality and water quantity data. COD and  $\text{NH}_3\text{-N}$  are taken as compensation factors with the water quality standards of the city boundary sections used as benchmarks to calculate the contribution rates of the water quality of downstream river sections caused by the upstream water pollution. Combined with the water pollution compensation standard, the water pollution profit and loss compensation calculation are carried out so as to obtain the compensation amount that each area should gain/undertake, defining and quantifying the responsibilities of stakeholders more objective and more reasonable. The results show that the compensation can basically reflect the water environment quality of each administrative region. The method can promote the implementation of transboundary water pollution compensation, which provides a reference for the application of compensation calculation.

**收稿日期:** 2020-08-12; **网络出版日期:** 2020-11-18

**网络出版地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201118.0945.002.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51679188);陕西省水利科技计划资助项目(2018slkj-4);西北旱区生态水利国家重点实验室自主研究课题资助项目(2019KJCXTD-5)

**第一作者:** 朱琪,男,硕士生,研究方向为水文水资源管理及水利信息化。E-mail:18702529733@163.com

**通信作者:** 罗军刚,男,博士,教授,博导,研究方向为水资源调度管理和水利信息化。E-mail: jgluo@xaut.edu.cn

**Key words:** transboundary; pollutant; transmission impact; quantization compensation; profit and loss accounting; pollutant flux

河流作为水源的载体,它在为居民生活提供便利的同时,也支撑着工业生产,这就意味着排泄物和废水会随着生活和生产进入到水体中,污染物跨界传递给两岸居民的正常生产生活带来了不良影响,不利于区域经济协调发展,严重影响着流域内区域之间的平衡稳定发展<sup>[1]</sup>。

随着各地区的经济发展、人口的逐年增加、跨界水污染事件的频繁发生,过度耗水和排污所引发的水环境问题愈发严重<sup>[2]</sup>。跨界断面水质难以持续性达标,跨界水污染已经严重影响到生态环境的恢复和地区经济的发展<sup>[3]</sup>。面对难以协调的跨界水污染纠纷,充分落实最严格水资源管理制度“三条红线”的保障需求、积极响应流域区域之间横向生态补偿机制的实施、开展流域跨界水污染补偿研究是十分必要的,而跨界断面水质目标的责任经济化则是水污染行政主体之间进行水污染补偿的重要手段<sup>[4]</sup>。

流域的跨界水污染补偿问题可看作一个相关行政主体利益关系的调整问题,补偿行为是双向的,应遵循“公平性原则”。跨界水污染补偿分为水污染损失赔偿和断面水质达标受益性补偿,前者是指超标断面上游地区对下游地区进行赔偿,后者是指达标断面所在行政区对上游提供的优质水源进行反向补偿,但是反向补偿在实践中总是被忽视<sup>[5]</sup>。当前,对于跨界水污染补偿金的核算,国内较普遍的做法是通过断面水质超标倍数或污染物通量估算方法来计算,两种方法均未体现出上游相关区域的河道水体污染物对下游河道断面水质的贡献率,而河流上游污染物跨界传递会对下游造成不同程度的影响(此处的上游不仅仅是考核断面的前一个河道水体,还包括从背景断面至考核断面的多个河道水体单元);此外,断面流量产生的影响和“双向补偿”的“公平性原则”也没有被综合考虑。若不将河道断面流量纳入补偿考核条件,则会造成水质情况相似而流量不同的河道其补偿金额一样,这与实际情况出入较大、不够严谨。水污染补偿核算存在的诸多问题使得其应用难以落实,为了合理划分和量化跨界水污染赔偿责任,强化相关地区政府对水环境的保护职责,促进水质目标的实现,对水污染补偿核算方法进行优化完善是当前亟待解决的问题。

针对传统跨界水污染补偿核算中存在的问题,本文先对河流污染物跨界传递影响程度进行量化,

采用基于断面污染物通量的成本处理方法<sup>[6,7]</sup>(即综合考虑河道断面水质和流量因素的影响),以渭河干流市界断面水质是否达到水功能区要求为基准,基于水质模型建立河流污染物跨界传递影响的量化补偿模型,通过计算得出某市区水体污染物对该断面的水质超标/达标贡献率,并量化相关区域对跨界断面所在区域的水质的影响程度,结合贡献率和水污染补偿标准,计算出相关市区应该承担/获得的赔偿量/补偿量,从而落实跨界水污染补偿责任,研究结果将对流域跨界水污染管控意义重大<sup>[8-10]</sup>。

## 1 河流污染物跨界传递影响量化补偿的体系框架

从问题提出、定量理论和定量核算三个方面着手,进行体系框架的搭建。本文致力于为跨界水污染补偿金的核算提供一种科学合理、易求解的方法,基于水污染损益核算所需的水质、水量等参数资料,结合研究流域水环境和水资源管理现状,选择合适的流域污染特征因子,建立标准化、条理化和实用化的河流污染物跨界传递影响的量化补偿模型,其基本框架体系如图1所示。

1) 从水污染问题引发的利益冲突入手,地区利益冲突实则体现了行政主体权责不够明晰,需要通过补偿的方式加以调整,而补偿难以落实主要是因为核算方法还不够完善。

2) 理论基础:主要包括基本概念的明确、补偿核算方法的优化和模拟仿真三个方面。基本概念:跨界水污染补偿分为水污染损失赔偿和断面水质达标受益性补偿。双向补偿是指补偿行为是双向的,应遵循“公平性原则”,考虑到上游为水环境保护所作出的利益牺牲,应对上游进行补偿<sup>[11]</sup>。补偿核算方法优化:传统的水污染补偿核算没有体现出上游水体污染物对下游河道断面水质的贡献率,且总是偏向水质因素带来的影响。本文对河流污染物传递影响进行量化,得到相关行政区河道水体污染物对跨界断面水质产生影响的程度;以河流干流跨界断面是否达到水质目标为基准,纳入断面流量后,以断面污染物通量是否超标为出发点,若上游水体污染物经过传递后造成出境断面污染物通量超标,则以上游区域为补偿主体;当上游区域完成污染物通量控制,使得出境断面水质达标,则其为受偿对象<sup>[4,9]</sup>。模拟仿真:通过数值模拟和实例仿真进行

水污染补偿金的核算。

3) 定量核算:主要包括建立控制方程,划分研

究流域的计算单元,选择补偿因子和计算时段,确定模型参数等;以渭河干流为例,验证量化补偿模型。

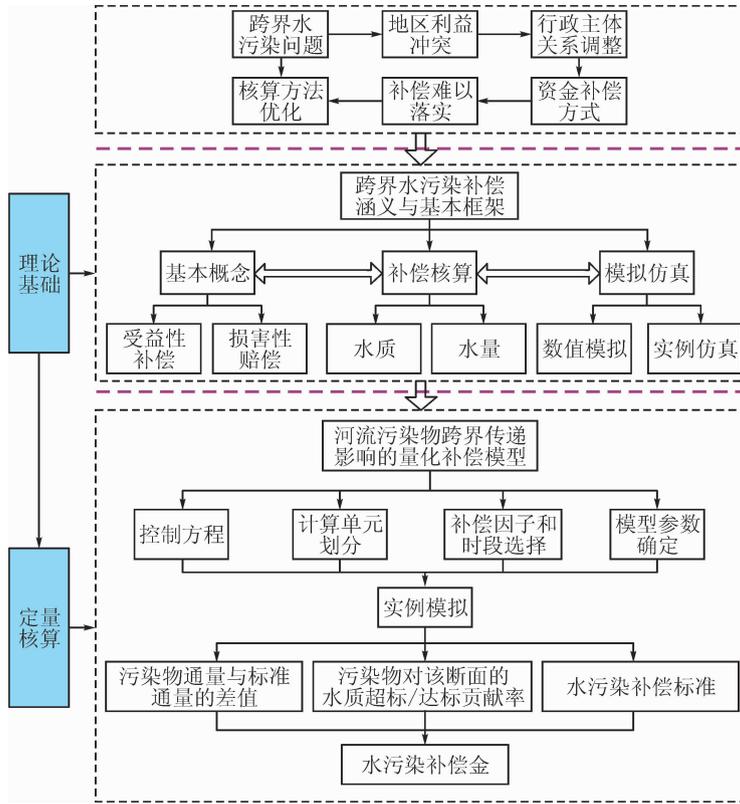


图1 河流污染物跨界传递影响的量化补偿基本框架体系图

Fig. 1 Basic framework system diagram of quantitative compensation for transboundary transmission of river pollutants

## 2 河流污染物跨界传递影响的量化补偿模型

### 2.1 控制方程

本文通过水质模型来计算水污染跨界传递影响程度,模型仅考虑河流干流上污染物传递的沿程变化,并假定污染物在研究河段充分混合,且污染物总体呈现衰减趋势(本文只针对中小型河流,即污染物能够很快混合均匀并达到整个断面),故可用一维河流水质模型的基本方程作为控制方程<sup>[12]</sup>:

$$C_x = C_0 \exp\left(-k \frac{x}{86.4u}\right) \quad (1)$$

式中:  $C_0$  为河段上断面污染物浓度, mg/L;  $C_x$  为河段下断面污染物浓度, mg/L;  $x$  为上、下断面间的距离, km;  $u$  为设计流量下的河段平均流速, m/s;  $k$  为污染物衰减系数, 1/d。

以跨界断面水质目标为标准来判断水质是否达标,将出境断面所在年份的月平均浓度与水质目标  $C_g$  的差值作为变量,代入一维水质模型,进而得到传递影响情况,如下三角增广矩阵  $B$  所示,其中某一列的各项指标代表上游某行政单元水体年内月水

质超标量/达标量对下游断面的影响程度和规模,而某一行上的各项指标则为某断面水体污染物受上游和本行政单元水质超标量/达标量的影响大小。

$$B = \begin{bmatrix} \alpha_{01} & 0 & 0 & \cdots & 0 & \Delta C_{c1} \\ \alpha_{02} & \alpha_{12} & 0 & \cdots & 0 & \Delta C_{c2} \\ \alpha_{03} & \alpha_{13} & \alpha_{23} & \cdots & 0 & \Delta C_{c3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{0j} & \alpha_{1j} & \alpha_{2j} & \cdots & \alpha_{ij} & \Delta C_{cj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

增广矩阵  $B$  中,  $\Delta C_{cj}$  为断面  $j$  所在年份的月浓度与水质目标的差值;  $\alpha_{ij}$  表示第  $i$  个行政单元对应  $j$  断面的浓度值,  $\alpha_{01} = \Delta C_{c1}$  为初始断面浓度值,  $\alpha_{02} = \alpha_{01} \times \exp\left(-k \frac{x}{86.4u}\right)$  表示经由断面衰减之后的浓度值;  $\alpha_{12} = b_2 - \alpha_{02}$ , 即该行政单元相应断面的浓度值等于对应实测浓度减上游断面浓度;  $\alpha_{13} = \alpha_{12} \times \exp\left(-k \frac{x}{86.4u}\right)$ , 以此类推。

每一行中,某行政单元的水体污染物对该河道断面水质的贡献率为:

$$g_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=0}^n \alpha_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $\sum_{i=0}^n \alpha_{ij}$  表示增广矩阵  $\mathbf{B}$  左边部分某一行的算术和,  $n$  为该部分列数。根据式(3)可得相关行政单元  $i$  的超量/达标排放对断面  $j$  的水质超标/达标贡献率, 贡献率矩阵为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{01} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_{02} & g_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{03} & g_{13} & g_{23} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{0j} & g_{1j} & g_{2j} & \cdots & g_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

跨界水污染补偿的主要原理为: 当出境断面的污染物实测浓度超过目标浓度时, 或者说跨界断面的污染物通量超过标准限值通量时, 结合流量、污染因子执行标准及跨界断面水质超标/达标贡献率等, 确定超标补偿金额, 故跨界水污染补偿模型, 即单因子水污染补偿金的计算方法为<sup>[4]</sup>:

$$B_0 = W_c g_{ij} M_0 = [(C_y - C_g) Q_0] g_{ij} M_0 \quad (5)$$

式中:  $B_0$  为行政单元水污染月补偿金, 元;  $W_c$  为行政单元水污染因子当月的污染物通量与标准通量的差值, mg/s, 当其为正值时, 表示上游行政单元出境断面实测水质超过目标水质的污染物排放量, 则该行政单元向下游行政单元进行赔偿; 当其为负值时, 表示上游行政单元为水质保护作出了贡献, 那么断面所在行政单元向上游进行补偿;  $C_y$  为行政单元出境断面所在年份的实测月浓度, mg/L;  $C_g$  为行政单元出境断面的目标浓度, mg/L;  $Q_0$  为行政单元出境断面的月总径流量,  $m^3$ ;  $M_0$  为行政单元污染因子补偿标准(以单位污染物处理成本为依据), 元/mg;  $g_{ij}$  表示上游相关行政单元的水体污染物对下游河道断面水质的超标/达标贡献率, %。

该补偿公式引入了水质超标/达标贡献率, 充分考虑了水污染传递影响程度, 体现了上游河道污染物对下游断面的水污染贡献占比, 使得责权利划分更加细致。如需考核多因子指标, 则可将所有单因子计算结果进行汇总, 即可得到每个断面所在行政单元或上游行政单元的最终水污染补偿金。本文的资金补偿以纵向财政转移支付为主, 即补偿主体向上级行政部门上缴补偿金, 具体方式为各水污染补偿考核行政区政府将补偿资金缴扣给上一级财政部门, 并由其进行资金的下一步分配转移<sup>[13]</sup>。

## 2.2 计算单元划分

河流控制断面的选取对水污染传递影响研究十分重要, 考虑到污染物的衰减程度(要尽量利用河流自净能力)以及方便控制河流水质, 合理地选择河段长度。计算单元的划分需充分考虑市区的重要工业

区、生活区和用水取水区的位置分布, 以及控制断面是否具有代表性、水文资料易获取性等。

## 2.3 补偿因子和时段选择

由于河流污染因子较多, 实际研究中可根据主要特征选择污染因子, 选取的污染因子应最能体现研究河流的污染程度, 能较好地代表河流的水环境质量。在我国, 水文站对流量的测量间隔最小为日, 但水质监测站一般是月多次测量取平均, 而资金补偿一般是以年为限, 故本文对跨界水污染补偿金的核算以月为时段, 最后汇总到年。

## 2.4 模型参数确定

### 1) 背景浓度和下断面浓度的确定

若初始断面受上游居民生活和生产的影响较小, 年内浓度变化非常小, 则可将其实测污染物浓度年平均均值当作起始背景浓度, 根据上一个河道单元运算出的断面水质浓度来确定下一个计算单元的背景水质浓度, 即将上一个河道单元的水质浓度带入一维水质模型计算出衰减后的浓度, 并结合下一个河道单元的实际月平均浓度进行确定<sup>[9]</sup>。

### 2) 污染物衰减系数 $k$ 的确定

污染物衰减系数  $k$  能够体现污染物在水中经物理、化学、生物反应后降解速率的大小, 目前常用的方法有实测资料推算法、水团示踪法、最小二乘模拟法和分析借用法, 实际使用中可将几种方法相结合, 从而更加全面地确定最终值<sup>[14-16]</sup>。

### 3) 设计流量和流速的确定

在河流污染物跨界传递影响模拟计算中, 设计流量和设计流速的确定至关重要。选择能代表流域区间水域特征且资料较为完整的水文站(某些缺少水文资料的断面可参考邻近水文测站的流速), 收集所需年份的流量、流速实测资料, 建立流量~流速关系曲线, 并拟合得到经验公式, 计算分析设计流量下的断面平均流速<sup>[17]</sup>。

流量~流速关系式为<sup>[18]</sup>:

$$u = aQ^b \quad (6)$$

式中:  $u$  表示断面平均流速, m/s;  $Q$  代表流量值,  $m^3/s$ ;  $a, b$  是待定系数。

## 3 实例应用

本文以渭河关中段为例进行模拟验算, 通过计算 2017 年渭河干流市界断面的超标量/达标量的传递值, 结合补偿标准, 从而得到水污染补偿金, 可为水污染补偿资金的核算提供一种具体方法。目前, 生态补偿标准的测算还没有统一的规范, 需要综合考虑各流域地区的实际水源、环境和经济等各种因

素,本文以单位污染物处理成本为补偿标准。

### 3.1 计算单元划分

本文以渭河干流污染物跨市界传递为例进行实例验证。研究区域为关中地区,河流途经宝鸡市、杨凌区、咸阳市、西安市和渭南市,研究河段总长度为388.1km,宝鸡市与杨凌区的交界断面有汤峪入渭,该断面受上游居民生活和生产的影响较小,故将该

断面作为计算背景断面。本次研究采用节点划分法,以渭河干流市界断面为节点,断面区间作为计算单元,一直到入黄口断面,共计4个计算单元。该划分方式能更好地进行跨市区污染程度和范围的定量研究以及多市区跨界污染责任的划分,从而能以“补偿”的方式调节相关地区的利益关系。单元划分情况如表1和图2所示。

表1 河道计算单元划分表

Tab.1 Division table of river calculation unit

序号	河道断面名称	河道计算单元名称	河道长度/(km)
1	漆水河口	汤峪入渭—漆水河口	16.0
2	咸阳铁路桥	漆水河口—咸阳铁路桥	66.8
3	零河入口	咸阳铁路桥—零河入口	80.8
4	入黄口	零河入口—入黄口	126.5



图2 水质研究断面位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the location of the water quality research section

### 3.2 补偿因子选择与各水文站浓度

由渭河干流多年来的水质评价结果可知,其特征污染因子是COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,这两种污染因子最能体现渭河的污染程度,故本次研究选择COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为补偿因子。搜集整理2017年渭河干流各水文测站各月的COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度,如表2所示。

### 3.3 模型参数的确定

#### 1) 背景浓度的确定

由于渭河干流宝鸡市出境断面(汤峪河入口)受

上游居民生活和生产的影响较小,补偿因子年内浓度变化非常小,故可将其实测污染物浓度年平均值当作起始背景浓度。

#### 2) 污染物衰减系数 $k$ 的确定

文献[19]分枯水期、丰水期和平水期对渭河干流污染物衰减系数进行了计算,各期计算结果相差很微小。本文结合渭河流域的实际情况,并考虑到此次水污染传递影响计算是以月为尺度进行研究,故借鉴文献[19]的研究成果,得到污染物衰减系数 $k$ 的取值,如表3所示<sup>[19]</sup>。

表 2 2017 年渭河干流各水文站 COD、NH<sub>3</sub>-N 月平均浓度Tab. 2 Monthly average concentration of COD and NH<sub>3</sub>-N in hydrological stations on the main stream of the Weihe River in 2017

月份	COD 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )					NH <sub>3</sub> -N 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )				
	林家村	魏家堡	咸阳	临潼	华县	林家村	魏家堡	咸阳	临潼	华县
1	6.0	26.0	15.0	18.0	26.0	0.5	0.3	0.6	3.4	1.8
2	14.0	23.0	19.0	19.0	23.0	0.7	2.3	0.5	1.8	1.2
3	7.0	20.0	16.0	18.0	25.0	0.4	1.6	0.5	2.3	1.2
4	9.0	15.0	19.0	14.0	19.0	1.1	0.3	0.2	1.5	0.8
5	13.0	15.0	26.0	16.0	20.0	0.6	0.2	0.2	1.3	0.9
6	9.0	20.0	23.0	13.0	19.0	0.3	0.3	0.2	1.4	0.5
7	13.0	20.0	11.0	16.0	29.0	0.4	0.1	0.6	1.7	0.2
8	14.0	14.0	17.0	21.0	20.0	0.5	0.2	3.4	1.2	1.2
9	10.0	12.0	11.0	12.0	14.0	0.3	0.2	0.8	0.9	0.1
10	12.0	15.0	13.0	14.0	9.0	0.4	0.5	0.6	0.9	0.3
11	8.0	18.0	8.0	12.0	15.0	0.4	0.3	0.5	0.7	0.4
12	9.0	18.0	11.0	8.0	16.0	0.3	0.6	0.9	0.6	1.1
水质目标	≤20.0	≤20.0	≤30.0	≤30.0	≤30.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5	≤1.5

表 3 2017 年渭河干流各水文站月污染物衰减系数

Tab. 3 Monthly pollutant attenuation coefficients of hydrological stations on the main stream of the Weihe River in 2017

单位:d<sup>-1</sup>

污染物	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
COD	0.24	0.246	0.258	0.263	0.250	0.265	0.283	0.278	0.287	0.285	0.245	0.246
NH <sub>3</sub> -N	0.09	0.192	21.6	43.0	24.7	60.7	20.3	57.8	44.2	167.0	33.5	19.0

### 3) 设计流量和流速的确定

此次研究在渭河流域上、中、下游分别选取林家村、咸阳和华县三个水文测站作为研究对象,魏家堡水文测站参考上游的林家村测站,临潼测站参考咸阳测站。为了减小河道演变带来的影响,选择 2015 年 3 日一测的流量、流速实测资料,根据式(6)得到流量(Q)~流速(V)关系式,如表 4 所示。

表 4 流量流速函数关系式

Tab. 4 Flow velocity function relation

站名	拟合曲线
林家村	$V = 0.165 4Q^{0.5348}, R^2 = 0.983 3$
魏家堡	$V = 0.165 4Q^{0.5348}, R^2 = 0.983 3$
咸阳	$V = 0.173 5Q^{0.3327}, R^2 = 0.901 2$
临潼	$V = 0.173 5Q^{0.3327}, R^2 = 0.901 2$
华县	$V = 0.066 7Q^{0.4701}, R^2 = 0.949 6$

注:R<sup>2</sup>表示拟合度。

搜集整理 2017 年渭河干流各水文测站各月平均流量,将其作为设计流量代入经验公式,从而得到各月平均流速,如表 5 和表 6 所示。

### 3.4 计算结果展示与分析

查阅《中国城镇污水处理厂汇编》等相关资料,根据渭河流域的实际情况,以单因子水污染补偿金来计算,COD 或 NH<sub>3</sub>-N 的补偿执行标准分别为 3 500 元/t、4 375 元/t<sup>[8]</sup>,而水污染补偿金为各单因子补偿资金之和<sup>[7]</sup>。

由于水质监测站一般是每月多次测量取平均,故本文先计算各月的水污染补偿金,再汇总到全年。

以跨界断面水质目标为标准来判断水质是否达标,将出境断面所在年份的月浓度与水质目标 C<sub>g</sub> 的差值作为变量,代入式(1),进而得到 2017 年 1 月的 COD 传递情况,如表 7 所示。

表 5 2017 年渭河干流各水文站月平均流量

Tab. 5 Average monthly flow of each hydrological station on the main stream of the Weihe River in 2017

单位:  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

站名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
林家村	12.2	12.4	20.5	52.9	29.0	49.9	22.0	46.5	43.6	103.0	38.7	19.9
魏家堡	11.4	11.8	21.6	43.0	24.7	60.7	20.3	57.8	44.2	167.0	33.5	19.0
咸阳	20.2	21.3	28.5	73.7	58.5	101.0	21.8	69.8	104.0	359.0	80.4	48.5
临潼	65.9	56.3	80.5	140.0	110.0	149.0	54.4	129.0	204.0	445.0	122.0	74.4
华县	55.4	36.7	77.9	161.0	129.0	162.0	34.2	135.0	236.0	558.0	143.0	76.0

表 6 2017 年渭河干流各水文站月平均流速

Tab. 6 Average monthly flow velocity of hydrological stations on the main stream of the Weihe River in 2017

单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 

站名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
林家村	0.6	0.6	0.8	1.4	1.0	1.3	0.9	1.3	1.2	2.0	1.2	0.8
魏家堡	0.6	0.6	0.9	1.2	0.9	1.5	0.8	1.4	1.3	2.6	1.1	0.8
咸阳	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8	0.5	0.7	0.8	1.2	0.7	0.6
临潼	0.7	0.7	0.7	0.9	0.8	0.9	0.7	0.9	1.0	1.3	0.9	0.7
华县	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.4	0.7	0.9	1.3	0.7	0.5

表 7 2017 年 1 月渭河干流市界断面 COD 传递情况

Tab. 7 COD transmission in the city boundary section of the Weihe River in January 2017

单位:  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 

河道断面名称	宝鸡市	杨陵区	汤峪入渭— 漆水河口	咸阳市	漆水河口— 咸阳铁路桥	咸阳铁路桥— 零河入口	渭南市	月平均浓度
汤峪入渭	-14.0							-14.0
漆水河口	-12.9	3.7	15.2					6.0
咸阳铁路桥	-8.4	2.4	9.8	-17.1	-1.8			-15.0
零河入口	-5.9	1.7	6.9	-12.0	-1.2	-1.5		-12.0
入黄口	-2.4	0.7	2.8	-4.9	-0.5	-0.6	0.9	-4.0

继续代入式(3),可得相关行政单元的超量/达 所示。

标排放对断面的水质超标/达标贡献率,如表 8

表 8 2017 年 1 月渭河干流市界断面 COD 超标/达标贡献占比情况

Tab. 8 Proportion of COD exceeding/reaching the standard in the city boundary section of the Weihe River in January 2017

河道断面名称	宝鸡市	杨陵区	汤峪入渭— 漆水河口	咸阳市	漆水河口— 咸阳铁路桥	咸阳铁路桥— 零河入口	渭南市
汤峪入渭	1.0						
漆水河口	-2.1	0.6	2.5				
咸阳铁路桥	0.6	-0.2	-0.7	1.1	0.1		
零河入口	0.5	-0.1	-0.6	1.0	0.1	0.1	
入黄口	0.6	-0.2	-0.7	1.2	0.1	0.2	-0.2

根据式(5),可继续算出 2017 年 1 月的 COD 跨界水污染补偿金,由此可汇总算出全年的 COD 补偿金。受篇幅所限,本文只展示两因子全年的汇总

结果。表 9 和表 10 分别是水污染因子 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  一整年的跨界水污染补偿金计算结果,表 11 为全年污染物跨界水污染补偿金。

表 9 2017 年渭河干流市界断面 COD 补偿金

Tab. 9 COD compensation for the city boundary section of the Weihe River in 2017

单位:万元

河道断面名称	宝鸡市	杨陵区	汤峪入渭—漆水河口	咸阳市	漆水河口—咸阳铁路桥	咸阳铁路桥—零河入口	渭南市
汤峪入渭	-3 284.15						
漆水河口	-2 860.72	256.27	1 043.97				
咸阳铁路桥	-5 626.76	585.93	2 386.90	-9 205.96	-954.76		
零河入口	-7 526.44	852.40	3 472.42	-11 984.02	-1 242.88	-5 702.53	
入黄口	-5 044.39	486.44	1 981.61	-7 942.15	-823.69	-3 431.09	-7 515.17

注:表中正数表示某市区对下游断面所在市区的水污染损失赔偿;负数表示某市区应获得的补偿,即下游市区断面水质达标受益性补偿,下同。

表 10 2017 年渭河干流市界断面  $\text{NH}_3\text{-N}$  补偿金

Tab. 10  $\text{NH}_3\text{-N}$  compensation for the city boundary section of the Weihe River in 2017

单位:万元

河道断面名称	宝鸡市	杨陵区	汤峪入渭—漆水河口	咸阳市	漆水河口—咸阳铁路桥	咸阳铁路桥—零河入口	渭南市
汤峪入渭	-240.08						
漆水河口	-269.69	2.01	8.17				
咸阳铁路桥	-484.80	-0.37	-1.50	-240.30	-24.92		
零河入口	-696.93	-10.20	-41.57	-318.08	-32.99	650.86	
入黄口	-592.92	-3.99	-16.26	-288.53	-29.92	436.76	-1 302.28

表 11 2017 年渭河干流市界断面跨界水污染补偿金

Tab. 11 Compensation for cross-border water pollution in the boundary section of the Weihe River in 2017

单位:万元

河道断面名称	宝鸡市	杨陵区	汤峪入渭—漆水河口	咸阳市	漆水河口—咸阳铁路桥	咸阳铁路桥—零河入口	渭南市
汤峪入渭	-3 524.24						
漆水河口	-3 130.41	258.28	1 052.15				
咸阳铁路桥	-6 111.55	585.56	2 385.39	-9 446.26	-979.68		
零河入口	-8 223.37	842.19	3 430.84	-12 302.10	-1 275.87	-5 051.66	
入黄口	-5 637.31	482.45	1 965.34	-8 230.68	-853.61	-2 994.34	-8 817.45

水污染损失赔偿是指超标断面上游区域应缴纳的水污染补偿金额(正值),水质达标受益补偿是指达标断面所在市区因该断面上游提供优良水质而给予的补偿(负值),也就是说,由于上游提供了优良水质,使得下游有更多的水环境容量,故下游对上游进

行补偿,补偿金通过省财政厅进行转移分配。如表 11 第三行,漆水河口是西安市的断面,相当于西安市要给宝鸡市补偿 3 130.41 万元,杨陵区要给西安市和咸阳市(汤峪入渭—漆水河口段涉及这两个市区,按左右岸比例划分赔偿量)赔偿 258.28 万元,

西安市和咸阳市自己承担 1 052.15 万元;第四行咸阳铁路桥断面在咸阳市和西安市交界处,则咸阳市和西安市应给宝鸡市补偿 6 111.55 万元,按排污比例进行分配,杨陵区对咸阳市和西安市(汤峪入渭一漆水河口段涉及这两个市区,按左右岸比例划分赔偿量)赔偿 585.56 万元,咸阳市和西安市(汤峪入渭一漆水河口段涉及这两个市区,按左右岸比例划分赔偿量)按左右岸排污比共同承担 2 385.39 万元;第五行零河入口在西安市和渭南市的交界处,西安市对宝鸡市和咸阳市分别补偿 8 223.37 万元、12 302.10 万元,杨陵区对西安市赔偿 842.19 万元,咸阳市和西安市(汤峪入渭一漆水河口)自己承担 3 430.84 万元;第六行入黄口断面在渭南市,则渭南市应对宝鸡市补偿 5 637.31 万元,对咸阳市和西安市共补偿 8 230.68+853.61+2 994.34 万元,杨陵区、西安市和咸阳市(漆水河口一咸阳铁路桥、咸阳铁路桥一零河入口涉及这两个市区,按左右岸比例划分赔偿量)分别对渭南市赔偿 482.45、1 965.34 万元。

#### 4 结 语

本文从河流污染物跨界传递影响的量化补偿需求出发,遵循“公平性原则”,综合考虑了河道断面水质和流量两种因素,并将河流上游污染物跨界传递对下游造成不同程度的影响纳入补偿考核条件,提出了河流污染物跨界传递影响的量化补偿方法及体系框架,以渭河干流为例进行量化补偿模型的验证,通过计算得到了上游相关市区的水体污染物对下游河道断面水质的贡献率,客观地界定和量化了补偿主体对受偿对象的水污染赔偿责任,即核算出了相关市区应获得/承担的补偿量/赔偿量。实例检验结果表明,所核算的补偿金基本能反映流域水环境质量特征,且可同时核算多种污染物,对污染型河流污染物跨界传递影响的量化补偿核算有较强的适应性,为流域跨界水污染补偿的损益核算提供了一种科学严谨、实践性强和公平合理的方法,对流域跨界水污染补偿的落实具有重要参考作用。

#### 参考文献:

- [1] 丁鑫磊. 京津冀水污染联防联控法律问题研究[D]. 石家庄:河北经贸大学,2020.  
DING Xinlei. Study on the legal issues of joint prevention and control of water pollution in Beijing-Tianjin-Hebei [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2020.
- [2] 李立. 渭河流域咸阳—西安段非点源污染模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.  
LI Li. Simulation study on non-point source pollution in

- Xianyang: Xi'an section of the Weihe River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [3] 李兴平. 行政跨界水污染治理中的利益协调探讨——以渭河流域为例[J]. 理论探索,2015(5):94-99.
- [4] 刘桂环,文一惠,谢婧. 关于跨省断面水质生态补偿与财政激励机制的思考[J]. 环境保护科学,2016,42(6):6-9,32.  
LIU Guihuan, WEN Yihui, XIE Jing. Study of eco-compensation and fiscal incentive mechanism for trans-provincial water quality [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(6): 6-9,32.
- [5] 杨桐鹤. 流域生态补偿标准计算方法研究[D]. 北京:中央民族大学,2011.
- [6] 周洁,逢勇. 江苏省流域生态补偿资金核算方法的优化[J]. 水资源保护,2016,32(6):151-155.  
ZHOU Jie, PANG Yong. Optimization of financial accounting method of watershed ecological compensation in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 151-155.
- [7] 刘军政,犹伟,祁芸泉,等. 基于污染物通量超标排放的生态补偿方法[J]. 水利经济,2018,36(4):40-44,77.  
LIU Junzheng, YOU Wei, QI Yunquan, et al. Ecological compensation method based on excessive emission of pollutant flux[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(4): 40-44,77.
- [8] 冉涛,袁秋平,曾嘉,等. 基于水质浓度超标倍数河流生态补偿量化的研究——以梁滩河为例[J]. 四川环境,2016,35(6):52-56.  
RAN Tao, YUAN Qiuping, ZENG Jia, et al. Quantification study of river eco-compensation based on multiple of ultra-standard of water quality concentration: a case study of Liangtan River [J]. Sichuan Environment, 2016, 35(6): 52-56.
- [9] 闫莉,余真真,张世坤,等. 基于传递影响的黄河省界断面水污染责任界定[J]. 人民黄河,2017,39(12):71-76.  
YAN Li, YU Zhenzhen, ZHANG Shikun, et al. Calculation method for water pollution responsibility partition in the provincial sections of Yellow River basin on the transfer influence[J]. Yellow River, 2017, 39(12): 71-76.
- [10] 张璇. 黄河流域省界断面水污染传递影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.  
ZHANG Xuan. Study on dynamic analysis and calculation and process control of water functional area (river reach) pollution carrying capacity. [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [11] 庞爱萍,李春晖,刘坤坤,等. 基于水环境容量的漳卫南流域双向生态补偿标准计算[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(S2):100-103.  
PANG Aiping, LI Chunhui, LIU Kunkun, et al. Ecological compensation in the water source areas of Zhan-gweinan basin based on water environmental capacity [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(S2): 100-103.

- XUE Jianyang, HAO Feihu, MA Linlin. Ductility and stiffness analyses of eave columns with corbel brackets in steel archaized buildings[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2019, 51(5): 629-634.
- [8] 薛建阳,翟磊,高卫欣,等. 仿古建筑矩形与圆形钢管柱连接抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(2): 81-91.
- XUE Jianyang, ZHAI Lei, GAO Weixin, et al. Experimental study on seismic performances of connections between rectangular steel pipe column and circular steel pipe column in imitated ancient building[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(2): 81-91.
- [9] 师希望,李铁英,魏剑伟,等. 足尺带斗拱木结构水平滞回性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(12): 2322-2331.
- SHI Xiwang, LI Tiewing, WEI Jianwei, et al. Experimental study on horizontal hysteretic behavior of full-scale timber frame with dou-gong sets[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(12): 2322-2331.
- [10] 司建辉,陈杰斌,李凡,等. 预制装配式混凝土斗拱节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 已录用.
- SI Jianhui, CHEN Jiebin, LI Fan, et al. Study on seismic behavior of prefabricated concrete bucket arch joints [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Received.
- (责任编辑 王绪迪)
- 
- (上接第 193 页)
- [12] 姜云超,南忠仁. 水质数学模型的研究进展及存在的问题[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(5): 7-11.
- JIANG Yunchao, NAN Zhongren. Progress and problems in study of water quality mathematical model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008, 44(5): 7-11.
- [13] 范志刚. 辽河流域生态补偿标准的测算与分配模式研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- FAN Zhigang. Research on Liaohe basin ecological compensation standard calculation and the distribution mode[D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2011.
- [14] 陈博. 渭河干流陕西段水资源保护理论及对策研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- CHEN Bo. Theory of water resources protection in Shaanxi section of Weihe River and its countermeasures [D]. Xi'an; Chang'an University, 2013.
- [15] 潘晨,谢文理,刘岩,等. 太漏运河总氮污染物排放限值研究[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 5-8, 33.
- PAN Chen, XIE Wenli, LIU Yan, et al. Study on total nitrogen emission limits of Taige canal [J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(3): 5-8, 33.
- [16] 张宏斌,赵洁,訾香梅. 渭河干流纳污能力与限制排污总量计算分析[J]. 陕西水利, 2010(1): 35-38.
- [17] 闵敏. 基于一维水质模型的湟水干流纳污能力计算[J]. 能源与环保, 2017, 39(11): 257-259, 263.
- MIN Min. Calculation of assimilative capacity in Huangshui River based on one-dimensional water quality model [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(11): 257-259, 263.
- [18] 何小刚. 第二松花江跨界断面输入响应模型构建及水质变化灵敏性研究[D]. 长春:吉林大学, 2014.
- HE Xiaogang. Input response model's construction and study on change's sensitivity of water quality of second Songhua River's trans-boundary section [D]. Changchun; Jilin University, 2014.
- [19] 王竞敏. 渭河水功能区动态纳污计算及考核管理系统集成研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- WANG Jingmin. Study on the Weihe River water function areas dynamic water environment capacity and assessment management system integration research [D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2017.
- (责任编辑 周 蓓)