

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.016

# 流域型水污染物排放标准评估方法建立及实证研究

赵一凡<sup>1,2,3</sup>, 潘亚然<sup>4</sup>, 寇蓉蓉<sup>5</sup>, 卢学强<sup>1,2,3</sup>

- (1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室, 天津 300350; 3. 天津市环境生物地球化学循环调控技术国际联合研究中心, 天津 300350; 4. 通标标准技术服务有限公司 宁波分公司, 浙江 宁波 315000; 5. 中日友好环境保护中心, 北京 100029)

**摘要:** 近年来,随着流域水质目标管理的实施,流域型水污染物排放标准的数量迅速增加,但标准实施效果如何,需要建立一套评估方法对流域型水污染物排放标准的实施情况进行客观、综合的评估。针对我国流域型水污染物排放标准的特点和数据的可获得性,提出了一套基于公开数据的流域型水污染物排放标准实施效果评估指标体系,并利用该评估指标体系建立评估方法对南四湖流域水污染物排放标准在济宁市2012年—2020年的实施效果进行了跟踪评估实证。实证结果表明,以该评估指标体系建立的评估方法科学、合理且简便易行。

**关键词:** 流域型水污染物排放标准; 标准评估; 评估指标体系; 南四湖流域

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0108-07

## Establishment of Assessment Methodology for Watershed-type Water Pollutant Discharge Standard and Its Demonstration

ZHAO Yi-fan<sup>1,2,3</sup>, PAN Ya-ran<sup>4</sup>, KOU Rong-rong<sup>5</sup>, LU Xue-qiang<sup>1,2,3</sup>

- (1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Environmental Technology for Complex Trans-Media Pollution, Tianjin 300350, China; 3. Tianjin International Joint Research Center for Environmental Biogeochemical Technology, Tianjin 300350, China; 4. Ningbo Branch, SGS-CSTC Standards Technical Services Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 5. Sino-Japan Friendship Center for Environmental Protection, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In recent years, the number of watershed-type water pollutant discharge standards has increased rapidly with the implementation of target management of watershed water quality. Therefore, it is necessary to establish a set of evaluation methods to assess the implementation of discharge standards objectively and comprehensively. Aimed at the characteristics and data availability of watershed-type water pollutant discharge standards in China, a set of evaluation index system for the implementation of watershed-type water pollutant discharge standards based on open data was put forward. The evaluation index system was utilized to establish an evaluation approach to track and assess the implementation of the Nansi Lake watershed water pollutant discharge standard in Jining City from 2012 to 2020. The empirical findings demonstrated that the evaluation approach established by this evaluation index system

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-007)

通信作者: 卢学强 E-mail: luxq@nankai.edu.cn

was scientific, rational, and straightforward.

**Key words:** watershed-type water pollutant discharge standard; standard assessment; evaluation index system; Nansi Lake watershed

水污染物排放标准作为水环境质量目标管理的重要手段之一,在控制点源水污染物的排放和保护水质方面具有重要的作用,尤其是近年推行的标准愈加严格,使其受到了广泛关注。水污染排放标准可分为:针对某一行政区域的综合型标准、针对某一行业的行业型标准,以及针对某一河湖流域的流域型标准3种类型<sup>[1]</sup>。流域型水污染物排放标准适用于某一特定流域<sup>[2]</sup>,可依据河流水质目标、环境容量来确定排放标准限值,相比于行业型和综合型水污染物排放标准,与水环境质量改善的目标联系更为紧密。对现行标准开展实施效果评估以确定其是否适应流域管理需要变得日益重要。

目前,已有不少学者对污染物排放标准评估工作开展研究,其通过建立不同的指标体系来评价污染物排放标准的执行情况,根据提出的指标体系能否进行实证评估可分为两类:一类研究注重评估指标体系的综合性,评估目的以得出排放标准在实施过程中存在的各种问题为主<sup>[3]</sup>。此类研究主要采用定性评价方法,评估指标体系涵盖内容较为全面、具体,但同样需要进行大量调研走访和问卷调查,忽略了指标数据的可获得性,实际应用中同样存在投入成本高、实施难度大等问题。另一类研究注重评估体系的可操作性,对各项评估指标进行横向比较和不同时间点的纵向比较,以发现流域污染源占比、流域河流水质和流域管理需求等变化,修订污染物排放限值。此类研究主要采用定量评价方法,评估指标的选取考虑数据的可获得性,指标数据往往以企业、统计年鉴、污染源监测季度报告等公开的数据为主,使得标准评估工作易于实施,但由于强调简便性,也存在指标体系不全面、指标类型单一等问题,导致评估结果的可靠性差。显然,如何兼顾标准评估指标体系的系统性和简便性,是值得探索和尝试的一个技术问题。

为此,笔者从标准实施的可行性、直接影响和间接影响出发,将定性和定量评价方法相结合,兼顾评估内容的系统全面性和评估指标的数据可获得性,提出了一套针对流域型水污染排放标准实施

效果评估的指标体系,利用该指标体系建立评估方法,以济宁市南四湖流域水污染物排放标准的跟踪评估为例进行了验证。

## 1 排放标准实施效果评估方法的建立

### 1.1 评估指标体系构建原则与框架

以系统性和可操作性为原则构建评估指标体系。系统性是指评估指标能够从经济性、技术性和环境效益等多角度、全方位来综合全面地评估标准实施效果<sup>[4]</sup>;可操作性是指评估指标的数据尽量采用网络数据、公开数据和大数据等手段获得<sup>[5]</sup>,易于定量计算,使评估过程相对简便易行。评价方法选用层次分析法(AHP)<sup>[6]</sup>及模糊综合评价法,具有简便易行、可操作性强的优点。

水污染物排放标准评估体系的构建利用了文献调研与专家咨询相结合的方式,对文献中的指标体系<sup>[7]</sup>设置情况进行了研究,在充分考虑指标数据的可获得性和评估指标体系的全面性的前提下,通过定性分析对指标进行筛选,并采用专家咨询和独立性检验对指标体系进行调整,最终确定构建的评估指标体系分为目标层、准则层、指标层、二级指标层四个层次,同一层的指标从属于上一层的指标或对上层指标有影响,同时又支配下一层的指标或受到下层指标的作用。

### 1.2 评估指标体系

《国家污染物排放标准实施评估工作指南(试行)》的评估重点包括达标情况、技术可行性、经济可行性、环境效益和社会效益,根据上述评估重点,评估指标体系选取了“可行性”“直接影响”“间接影响”作为准则层指标。

“可行性”指所评估标准的可行性,由标准执行过程中工业企业的超标排放或偷排偷放情况来反映。由于工业企业与污水厂在运营模式和污水处理技术上存在较大差异,需对标准执行情况分别进行评估,故“可行性”下设“工业企业实施情况”和“城市污水处理厂实施情况”两个指标。如果企业及污水厂超额排放或者非法排放污染物次数过多,则说明标准设定的排放限值过于严格<sup>[2]</sup>,有必要根

据流域内企业的水污染物处理技术和经济背景调整排放限值。因此,这两个分项包含两个二级指标,即“污染物超标排放次数”和“污染物非法排放次数”。

“直接影响”指水污染物排放标准对流域水环境质量改善及污水污染物排放量削减的影响,下设“水质改善”和“污染物减排”两个指标。流域水环境质量情况可以通过测量流域地表水监测断面水质得出<sup>[8]</sup>,故选择“地表水监测 I~Ⅲ类水质占比”和“地表水监测劣 V 类水质占比”作为“水质改善”的二级指标。“污染物减排”可以通过污染物排放量的变化来反映<sup>[9]</sup>,由于实证评估的时间跨度较大,为了保证评估结果的一致性,同时考虑数据的可获得性,因此仅设置“万元工业增加值 COD 排放量”“万元工业增加值 NH<sub>3</sub>-N 排放量”“万元工业增加值废水排放量”3 项作为“污染物减排”的二级指标。

“间接影响”指标准实施所带来的污水处理设施基建投资、运维成本,同时也包括废水资源化带来的经济效益,主要评价标准的经济可行性。基于此,在“间接影响”指标下设置“污水处理能力”“水资源利用”“经济发展”3 项指标。“污水处理能力”能

够利用“市政排水投资”和“污水集中处理率”两项指标来表征。水污染物排放标准的实施会改变水资源的消耗方式,提高生活污水、工业废水回收利用率,并且促进清洁生产技术的发展,因此将“中水回用率”“万元工业增加值用水量”作为“水资源利用”的二级指标。水污染物排放标准必然会对重污染行业产生一定影响,需要对标准实施期间的工业增加值和重污染行业产量进行分析,由此来平衡环境保护与经济发展的关系,故而设置“工业增加值指数”和“重污染行业产量”作为“经济发展”的二级指标。

建立的评估指标体系(见表 1)充分契合《国家污染物排放标准实施评估工作指南(试行)》的评估重点,且计算指标得分所需要的数据均可从生态环境、水务、统计等部门公开的环境质量公报、水资源公报、统计年鉴等报告和相关公开数据获得,兼顾了评估指标的系统全面性和评估指标的数据可获得性。此外,各项指标均可以通过定量计算得到指标得分,并以指标得分来评价标准的达标情况,指标得分超过 60 分为合格,超过 80 分为良好,超过 90 分为优秀。

表 1 评估指标体系及指标权重

Tab.1 Evaluation index system and index weight

目标层	准则层	权重	指标层	权重	二级指标层	权重
流域型 水污染物排放标准实施效果评估	可行性	0.159 3	工业企业 实施情况	0.079 6	污染物超标排放次数	0.015 9
					污染物非法排放次数	0.063 7
			城市污水处理厂 实施情况	0.079 6	污染物超标排放次数	0.015 9
					污染物非法排放次数	0.063 7
	直接影响	0.588 9	水质改善	0.490 7	地表水监测 I~Ⅲ类水质占比	0.122 7
					地表水监测劣 V 类水质占比	0.368 1
			污染物减排	0.098 1	万元工业增加值废水排放量	0.058 9
					万元工业增加值 COD 排放量	0.019 6
					万元工业增加值 NH <sub>3</sub> -N 排放量	0.019 6
					中水回用率	0.028 6
	间接影响	0.251 9	水资源利用	0.143 0	万元工业增加值用水量	0.114 4
					工业增加值指数 <sup>①</sup>	0.070 1
			经济发展	0.084 1	重污染行业产量 <sup>②</sup>	0.014 0
					市政排水投资	0.018 5
污水处理能力			0.024 7	污水集中处理率	0.006 2	

注: ①表示上一年度为 100;②表示重污染行业选取流域排污量排名前五的行业。

值得说明的是,这里提出的是一个评估指标体系框架,即:从标准实施的可行性、直接影响、间接影响来考虑评估指标体系构建,不同流域可以根据流域特点对二级指标进行调整。

### 1.3 权重确定

基于德尔菲法并咨询相关技术领域专家,采用层次分析法确定权重加<sup>[10]</sup>。利用 yaahp 软件计算各指标权重并进行一致性检验,计算的一致性(CR)=

0.000 5 < 0.1, 满足一致性检验。指标权重计算结果见表1。

#### 1.4 评价方法

采用模糊评价法进行综合评价,将各指标划分为5个等级区间,利用极差法将各指标数据标准化,参考模糊数学中隶属度的概念对各单项指标进行赋分,采用梯形公式进行计算,得分的高低由其属于某一区间的隶属度来决定,综合得分按式(1)进行计算。

$$S = W_{\text{综}i} \times [S_i + W_{\text{综}i} \times (S_{i+1} - S_i)] \quad (1)$$

式中: $S$ 为综合得分; $W_{\text{综}i}$ 为第*i*个等级的模糊综合评价法的综合权重; $S_{i+1}$ 、 $S_i$ 分别为第*i*个等级的上、下限得分。

## 2 应用实例

### 2.1 流域概况

南四湖流域是淮河流域的重要子流域,是南水北调东线工程衔接南北的主要调蓄枢纽区。该流域属于温带大陆性季风气候,具有春旱多风、夏热

多雨、冬季干冷的特点,年平均气温为14.2℃,多年平均降雨量为750 mm,湖面年均蒸发量为1 490 mm<sup>[11]</sup>。南四湖流域经济水平整体较高,经济增长速度较快。

南四湖流域内工业结构型污染较为突出,化工、造纸、农副食品加工业等重污染行业是工业点源污染的主要污染源,水体以有机污染为主,主要污染物为COD、挥发酚和NH<sub>3</sub>-N<sup>[12]</sup>。为确保南水北调工程山东段水质安全,控制污染排放,山东省生态环境厅在2006年实施了《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》(DB 37/599—2006),后自2011年起对其进行了三次修订,并在2018年颁布了新标准,南四湖流域不同阶段标准的变化如图1所示。在南四湖流域的4个地级市中(济宁、枣庄、泰安、菏泽),济宁市的废水排放量约占山东省南四湖流域的40%<sup>[13]</sup>,对济宁市南四湖流域水污染物排放标准的执行情况进行评价,可以促进南四湖流域水污染物排放标准的制定和修订。因此,选择济宁市作为研究区进行实证研究。

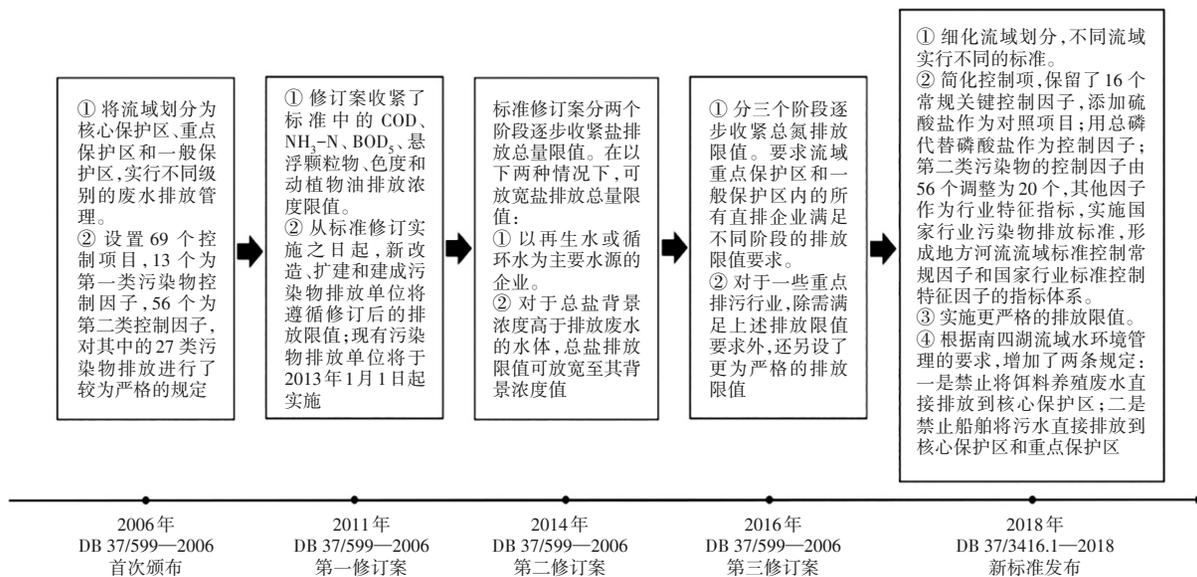


图1 不同阶段标准的变化

Fig.1 Change of standard in different stages

### 2.2 数据来源

实证评估研究所用各指标数据(二级指标层)均来自公开数据。其中,污染物超标排放次数(工业企业)、污染物非法排放次数(工业企业)、污染物超标排放次数(城市污水处理厂)、污染物非法排放次数(城市污水处理厂)来源于济宁市生态环境局;地表水监测I~III类水质占比、地表水监测劣V类

水质占比来源于山东省生态环境公报;万元工业增加值废水排放量、万元工业增加值COD排放量、万元工业增加值NH<sub>3</sub>-N排放量来源于济宁市统计年鉴;中水回用率来源于中国城市建设统计年鉴;万元工业增加值用水量、工业增加值指数、重污染行业产量来源于济宁市统计年鉴;市政排水投资、污水集中处理率来源于中国城市建设统计年鉴。

## 2.3 结果与讨论

将济宁市南四湖流域2012年—2020年相关数据以表1的指标体系及权重进行计算,其评估结果如图2所示。

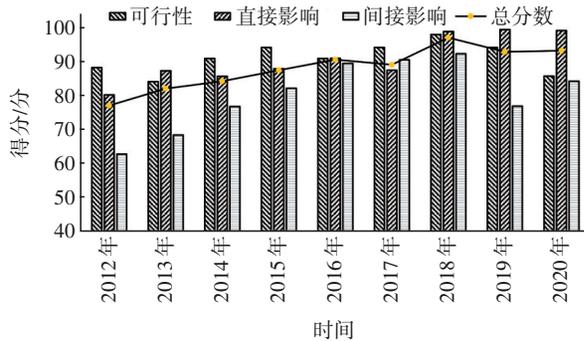


图2 济宁市南四湖流域水污染物排放标准实施效果评估结果

Fig.2 Evaluation results of the implementation effect of water pollutant discharge standards in Nansi Lake watershed of Jining

### 2.3.1 可行性

由图2可知,“可行性”指标得分除2012年、2013年、2020年为良好外,其他年份均达到了优秀等级,这表明对执行该标准的排污单位而言,其水污染物处理技术基本能够达到污染物排放要求,标准的可行性总体较好。分析“可行性”得分变化趋势,指标得分分别在2013年、2016年、2019年出现了波动,并在2020年明显下降。其波动原因主要是因为《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》(DB 37/599—2006)第一修订案及第二修订案(第二期)分别在2013年和2016年全面实施,收紧了部分污染物排放限值,使得部分建设期较长、水污染物处理技术落后、没有污水处理技术改进经验的排污单位难以达到修订案要求,造成污染物排放浓度超标。而2019年和2020年,DB 37/3416.1—2018新标准全面实施,增加全盐量、硫酸盐作为第二类污染物设置排放限值,使得未对该类污染物处理技术进行优化的排污单位达不到标准排放要求,造成排污单位污染物超标排放次数增加。显然,“可行性”指标得分变化能够反映出南四湖流域水污染物排放标准的实施情况。

### 2.3.2 直接影响

对“直接影响”指标得分变化进行分析,发现其在2013年指标得分显著提高,“水质改善”指标得分由86分提高到了95分(见图3),这与当年全面实施

的《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》(DB 37/599—2006)第一修订案收紧了部分污染物排放限值有关,反映出第一修订案对水质改善有显著积极影响。2016年“直接影响”指标得分第一次达到优秀,“污染物减排”指标得分飙升,上述变更发生在第二修订案(第二期)实施的时间节点,这说明第二修订案能够有效控制工业废水和工业COD排放。2017年“直接影响”指标得分下降,这是因为济宁市上游菏泽市的河流水质较差,使得济宁市水质受到了一定程度的影响<sup>[12]</sup>,造成了一级指标“水质改善”及其二级指标“地表水监测劣V类水质占比”得分降低。由此可知,对于跨行政区域的流域标准而言,应注意上下游水质的影响。

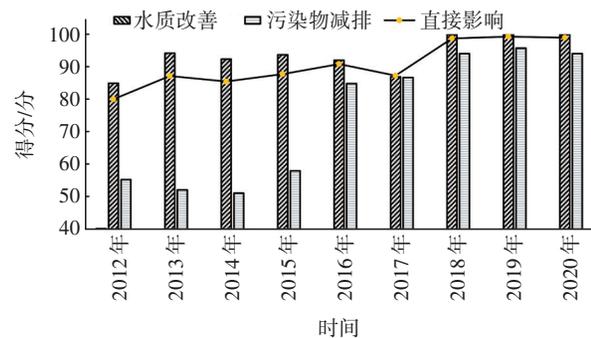


图3 直接影响评估结果

Fig.3 Evaluation results of direct influence

2018年“直接影响”指标得分迎来第二次显著提高,“水质改善”的二级指标“地表水监测I~III类水质占比”得分由合格提升至优秀,这表明2018年实施的第三修订案(第二期)改善了原本为轻度/中度污染监测断面的水质。此外,该得分变化还受到2018年发布的《流域水污染物综合排放标准第1部分:南四湖东平湖流域》(DB 37/3416.1—2018)的影响。新标准在正式实施前曾在2017年完成两次公众咨询。经过新标准实施前的两次公众咨询及旧标准三次修订案实施,污水排放企业对水污染物排放标准制定和修订的适应能力逐步提高,企业可以根据标准草案中的排放限值,升级自身的水污染物处理技术。这可能是2018年I~III类地表水水质监测断面数量增加、劣V类地表水水质监测断面数量减少的原因。总的来说,南四湖流域水污染物排放标准的实施提高了济宁市的水环境质量,降低了污染物排放量,获得了良好的环境效益。

### 2.3.3 间接影响

2012年—2016年,“间接影响”得分快速增加,

“水资源利用”和“污水处理能力”这两个指标发挥了重要作用(见图4)。

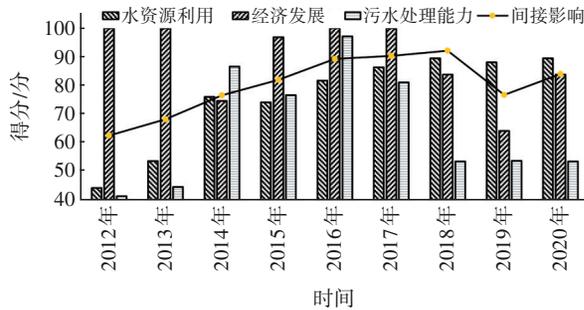


图4 间接影响评估结果

Fig.4 Evaluation results of indirect influence

2016年“万元工业增加值用水量”较2012年降低12.5%,是因为《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》(DB 37/599—2006)第二修订案(第二期)在一定程度上改变了企业水资源利用方式,提高了城市水污染物处理能力,主要体现在:①城市污水服务设施固定资产投资占城市服务设施固定资产投资总额的比例从2012年的1.6%提升至2016年的10.6%;②污水集中处理率从2012年的92.58%提高到了2016年的96.20%。2016年后,“间接影响”得分基本变化不大,是由于城市污水服务设施固定资产投资和重污染行业主要产品产量下降所致。截至2016年,城市污水处理设施逐步完善,其处理能力已经可以达到标准要求,投资也相应降低。“经济发展”指标得分不稳定,这是由于《环境行政处罚办法》规定,对违反环境法律的企业,可以处以罚款、责令停产整顿,甚至停产等措施,而在重污染行业实施严格的水污染物排放标准的经济成本和技术难度相对较高,使得一些长期未能满足标准要求的重污染企业被暂停营业甚至关闭,造成了工业产值增长速率减慢、重污染行业产品产量降低,这一情况应该在标准制定及实施,甚至区域产业结构调整等时加以关注。

因DB 37/3416.1—2018标准于2019年3月正式实施,故2019年的标准评估为短期评估。由于新标准对流域产业结构调整 and 产业发展产生影响,使得“石油、煤炭等燃料加工业”和“化工原料及化工产品制造业”中产值水耗高的行业发展速度下降,导致“万元工业增加值用水量”和“工业增加值指数”两项指标得分下降,造成了“间接影响”得分较低。2020年新标准实施一年后,南四湖流域产业结

构得到了一定时间的调整,“经济发展”的二级指标“工业增加值指数”得分提高,“间接影响”得分回升。

总体来看,经过南四湖流域水污染物排放标准的施行及调整,南四湖流域水质明显改善,获得了良好的环境效益与经济效益。实证评估所得指标得分的变化对南四湖流域水污染物排放标准的修订及调整较为敏感,评估结果符合南四湖流域水环境管理的实际情况。除此之外,通过“可行性”“间接影响”指标得分的波动进行分析,也能发现新标准DB 37/3416.1—2018实施过程中存在的一些问题,如工业企业超标排放、偷排偷放次数增加,说明部分工业企业未及时完成技术升级和设施改造,应进一步调研确定原因进而采取针对性的管理措施。新标准的实施对流域内产业产生了较大的冲击和影响,石油、化工等高污染、高能耗的行业发展速度大幅下降,为此,应针对相关行业出台相关政策进行定点扶持,帮助其进行产业转型升级,从而优化南四湖流域的产业结构。

### 3 结论

本研究提出了一个基于公开数据的流域型水污染物排放标准实施效果评估指标体系,并以此为基础构建了一套评估方法,能够在保证评估工作综合全面的前提下,使评估过程相对简便易行。利用所提出的指标体系建立的评估方法,以济宁市为例,对南四湖流域水污染物排放标准进行实证研究。通过对2012年—2020年评估指标得分的纵向对比发现,指标得分的变化能够反映出南四湖流域标准的实施情况,标准的可行性较高并获得了良好的环境效益与经济效益,标准总得分逐年升高,显然南四湖流域水污染排放标准的施行使流域水环境不断改善,评估结果符合流域实际。总之,研究提出的评估指标体系及评估方法科学、合理且简便易行,不仅可以对标准实施效果进行评价,还能发现标准实施过程中存在的问题,并对标准实施采取针对性的管理措施提供有益参考。

### 参考文献:

- [1] 卢延娜,雷晶,马占云,等. 地方水污染物排放标准发展现状及制订研究[J]. 环境保护, 2016, 44(7): 57-59.
- LU Yanna, LEI Jing, MA Zhanyun, et al. The development status and research of local water pollutant

- discharge standards [J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(7): 57-59 (in Chinese).
- [2] 史会剑. 流域型水污染物排放标准的定位、方法与策略[J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(1): 50-53.  
SHI Huijian. Positioning, methods and strategies of watershed water pollutant emission standards [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018, 43(1): 50-53(in Chinese).
- [3] 宋国君, 韩允垒, 何雅琪, 等. 中国污染物排放标准实施评估[J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(3): 275-280.  
SONG Guojun, HAN Yunlei, HE Yaqi, *et al.* Evaluation on implementation of China's emission standards [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(3): 275-280(in Chinese).
- [4] LI Y Y, HUANG S, YIN C X, *et al.* Construction and countermeasure discussion on government performance evaluation model of air pollution control: a case study from Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120072.
- [5] WANG Q, HAN R, HUANG Q L, *et al.* Research on energy conservation and emissions reduction based on AHP-fuzzy synthetic evaluation model: a case study of tobacco enterprises [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 88-97.
- [6] 刘晓剑, 常丽春, 林秀军, 等. 纺织染整污染防治最佳可行技术评估[J]. *环境工程*, 2014, 32(1): 153-157.  
LIU Xiaojian, CHANG Lichun, LIN Xiujun, *et al.* Assessment of best available technologies for dyeing and finishing of textile industry [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(1): 153-157(in Chinese).
- [7] 蒋洪强, 程曦, 刘年磊, 等. 环保标准实施的费用效益分析框架及对策建议 [J]. *环境保护*, 2016, 44(14): 25-30.  
JIANG Hongqiang, CHENG Xi, LIU Nianlei, *et al.* Study on the environmental standard framework of cost benefit analysis and countermeasures[J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(14): 25-30(in Chinese).
- [8] ZHOU Y Q, MA J R, ZANG Y L, *et al.* Improving water quality in China: environmental investment pays dividends[J]. *Water Research*, 2017, 118: 152-159.
- [9] 韦亚南, 张琨, 张宝雷. 山东省南水北调沿线流域水污染物排放标准对沿线城市经济的影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 81-85.  
WEI Yanan, ZHANG Kun, ZHANG Baolei. Effects of water pollutant emission standard in watersheds of South-to-North Water Diversion Project on economy of cities along the water transfer line in Shandong Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(2): 81-85(in Chinese).
- [10] STRAND J, CARSON R T, NAVRUD S, *et al.* Using the Delphi method to value protection of the Amazon rainforest [J]. *Ecological Economics*, 2017, 131: 475-484.
- [11] 王立华, 于海武. 南四湖湿地生物多样性特征分析 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(12): 2779-2783.  
WANG Lihua, YU Haiwu. Analysis on biodiversity characteristics in the wetlands of Nansi Lake [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(12): 2779-2783 (in Chinese).
- [12] 李晶, 刘莉莹, 孙炜, 等. 南四湖及其入湖河流水环境质量现状分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(12): 139-144.  
LI Jing, LIU Liying, SUN Wei, *et al.* Analysis on the status of water environment quality of Nansi Lake and its rivers entering the lake [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(12): 139-144 (in Chinese).
- [13] LIU Y, YANG L Y, JIANG W. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality: a case study from Nansi Lake catchment, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106870.

作者简介: 赵一凡(1999-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全评价。

E-mail: zhaoyf19990623@163.com

收稿日期: 2022-07-06

修回日期: 2023-02-15

(编辑: 任莹莹)