

# 某湖泊水产养殖污染生态环境损害评估方法探索

赵亚琼 陈业强 唐 彬<sup>#</sup> 周理程 刘百灵

(湖南省环境保护科学研究院,湖南 长沙 410004)

**摘要** 湖泊水产养殖污染具有污染事实存在,但涉及多种污染源的鉴定难点,是多因一果的环境侵权。评估了某湖泊水产养殖造成的水质、底质、水生态环境等损害,核算了各污染源入湖总磷贡献,筛选了生态环境损害恢复方案,量化了造成的生态环境损害,以此探索湖泊水产养殖污染生态环境损害的评估方法,为科学合理地评估类似环境损害案件提供参考和借鉴。

**关键词** 水产养殖污染 入湖总磷贡献 多因一果 期间损害 补偿性恢复

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.202406157

**Exploration of ecological environment damage assessment method for aquaculture pollution in a certain lake** ZHAO Yaqiong, CHEN Yeqiang, TANG Bin, ZHOU Licheng, LIU Bailing. (Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha Hunan 410004)

**Abstract:** The pollution caused by aquaculture in lakes exists as a fact of pollution, but the identifying multiple sources of pollution is difficult. It is an environmental infringement with multiple cause one outcome. The damage for water quality, sediment and aquatic ecological environment caused by the aquaculture were evaluated in a certain lake. The total phosphorus contribution of various pollution sources into the lake were calculated. Ecological environment damage restoration plans were selected. The ecological environment damage caused was quantified. This explored the ecological environment damage assessment method for aquaculture pollution, providing reference and inspiration for scientifically and reasonably evaluating similar environmental damage cases.

**Keywords:** aquaculture pollution; contribution of total phosphorus into lake; multiple cause one outcome; period damage; compensatory restoration

2022 年,全国水产养殖面积 7 107 500 hm<sup>2</sup>,其中淡水养殖面积 5 033 080 hm<sup>2</sup>、海水养殖面积 2 074 420 hm<sup>2</sup>,淡水养殖面积占全国水产养殖面积的 70.81%<sup>[1]</sup>。湖泊是地球上最重要的水资源之一,集约式、粗放式的养殖模式<sup>[2]</sup>,养殖过程中长期过量投肥、投饵行为,导致养殖水域面临着污染日益恶化的趋势。湖泊水产养殖污染一般属于累积性水环境污染事件,其损害类型以对水环境质量的损害为主,主要表现为养殖水域水环境中氮、磷、化学需氧量等水质指标浓度升高<sup>[3]</sup>,但水体中氮、磷等的来源并不单一,除投肥养鱼外,周边的农业源、生活源等也向水体中排放氮、磷等,涉及多种污染源,属于多因一果<sup>[4]</sup>的环境侵权,在办案过程中往往面临着水产养殖污染者责任落实难的现实困境。

本研究以某湖泊水产养殖污染为例,以特征污染物选择、基线确认、因果关系判定、各污染源排放的贡献占比、生态环境损害为中心,构建一套完整的生态环境损害量化评估方法,为量化湖泊水产养殖

污染事件经济损失提供依据。

## 1 事件概况

H 湖是某县境内最大的调蓄、养殖湖泊,是典型的长江中游流域浅水湖泊,水域面积广阔,自然环境条件优越,鱼类种质资源优良,适宜鱼类及多种水生生物的生长。20 世纪 60 年代以来,H 湖管理模式为天然捕捞渔业,鱼类年产量在 60 000~140 000 kg。为提高产鱼量,自 2002 年 9 月起向 H 湖大量投肥,包括有机生物肥、家禽粪便和氮、磷肥。2017 年 11 月,政府发布《关于禁止大水面投肥养殖的通告》,严禁在全县 33.33 hm<sup>2</sup>以上的湖泊、哑河和小二型以上水库等大水面进行投肥投粪投饵等污染水体的行为。自此,H 湖从 2018 年起退出投肥养殖的集约化渔业模式,开始实行“人放天养”,并于 2020 年起正式全面启动水环境整治工作。然而,长期的投肥养殖给 H 湖水质及生态环境带来了严重的损害,近 5 年来,H 湖水质总体在《地表水环境质量标准》

第一作者:赵亚琼,女,1990 年生,硕士,工程师,主要从事生态环境损害鉴定评估、环境污染控制等研究。<sup>#</sup>通信作者。

(GB 3838—2002) V类或劣V类水平。为评估投肥养殖对H湖生态环境造成的损害,确定生态环境损害范围和程度,明确投肥养殖对H湖水环境污染后果的贡献占比,为后续生态环境损害赔偿提供科学依据,本研究开展了鉴定评估。

## 2 案例分析

### 2.1 特征污染物及污染源

根据当地环境监测部门多年环境监测,H湖水水质在V类或劣V类水平,远超Ⅲ类标准要求,超标的特征污染因子为总磷和氨氮。分析其来源,污染物氮、磷主要来源于投肥养鱼、农业污染、生活污染和连通湖来水污染等,是多因一果的环境污染事件,其中以投肥养鱼最为严重。

### 2.2 污染物迁移途径

从2002年9月起,向H湖投入肥料、饲料和药物。其中,饲料主要直接为鱼类提供饵料,药物主要是杀灭影响鱼类生长繁殖的有害细菌、虫类等。根据提供的肥料成分表,可知肥料的主要成分为氮、磷,主要目的是增加水中氮、磷含量,补充水生植物、浮游动物等生长所需的氮、磷,促进其生长,从而为鱼类提供更多的食物来源。投肥带来的污染物主要通过以下迁移途径进入环境:肥料中的氮、磷等投入水体后,因溶解度不同,肥料中的氮大部分溶解于水体,部分转化为氨挥发到大气中;肥料中的磷部分溶解于水体、部分沉积于底质,进入底质的磷可通过沉积物-水相扩散交换再次进入水体。溶解于水体中的氮、磷部分被水生植物、浮游动物等利用,促进其生长,为鱼类提供了更多的食物来源;因过度投肥而未被利用的部分则成为湖泊水体的主要污染来源,这造成湖水水质总磷、总氮浓度逐渐升高,导致水质恶化。

### 2.3 评价指标

所投加的肥料中,氮肥水溶性大,可通过湖水与外界水力交换得到较快的稀释或转化为其他氨挥发,而磷肥水溶性小,沉积于湖底后持续、缓慢地向水体中释放磷元素,只要湖体底质不予以清理,则磷释放源一直存在。根据研究可知,鳊鱼、鲢鱼、鲫鱼、鲤鱼、青鱼、草鱼每吨增重的氮消耗量基本是磷消耗量的5倍<sup>[5]</sup>。因此,湖体水质总氮浓度下降得较快,相对标准而言,总磷指标更难恢复。根据监测数据统计,总氮达到GB 3838—2002Ⅲ类标准限值(1.0 mg/L)的时间占到有监测数据的61.8%,达到Ⅳ类标准限值(1.5 mg/L)的时间占29.1%,达到Ⅴ类标

准限值(2.0 mg/L)和劣Ⅴ类的时间占9.1%,偶有峰值下降也较快;总磷达不到Ⅲ类标准限值(0.05 mg/L),达到Ⅳ类标准限值(0.1 mg/L)的时间只占到8.3%,达到Ⅴ类标准限值(0.2 mg/L)的时间占到了45.0%,达到劣Ⅴ类的时间占到了46.7%。可见总磷是决定H湖水质的关键指标,也是其长期超标的主要因素。

### 2.4 基线确认

#### 2.4.1 水质基线

由于无法获得2002年9月开始投肥养鱼前有效的水质背景值监测数据,H湖周边也找不到可作为对照区域的湖泊,因此H湖水水质基线通过查找相应的地表水和沉积物环境质量标准或基准的方法确定。H湖水功能区类型属渔业用水,执行GB 3838—2002Ⅲ类标准。根据《湖泊营养物基准——中东部湖区(总磷、总氮、叶绿素a)》(2020年版),中东部湖区湖泊营养物中总磷基准值为0.029 mg/L,表示对湖泊产生的生态效应(藻类生长)不危及其水体功能的最大质量浓度,是基于环境因子与特定对象之间的剂量—效应(反应)关系,可作为H湖生态环境质量根本改善的长远目标。但该基准值未考虑社会、经济及技术等方面因素,未客观反映投肥养鱼行为为发生前H湖真实的水质状态。此外,由于该县水库、湖泊水功能一级、二级区划登记表给出了制订时(2003年)的水质现状为Ⅲ类,时间点与投肥养鱼开始时间最接近。综上所述,在无法获取具体监测数据的情况下,以Ⅲ类标准限值作为总磷的水质基线较合适,即0.05 mg/L。

#### 2.4.2 底质基线

目前,底质中总磷尚无国家环境质量标准可参考。根据研究,东部典型湖泊沉积物总磷基准阈值为454.51~459.03 mg/kg<sup>[6]</sup>。本次评估取其最高值459.03 mg/kg作为总磷的底质基线。

#### 2.4.3 水生态环境基线

投肥养鱼前H湖的水生态环境所对应的生态环境状况为水生态环境基线。因无可靠、详细的同期历史监测数据,周边亦找不到可作为对照区域的湖泊,故依据现有条件无法定量化,定性描述H湖水生态环境的变化过程。

### 2.5 环境损害确认

#### 2.5.1 地表水

结合GB 3838—2002,对2014—2021年H湖水水质总磷、总氮监测数据进行统计汇总,结果见图1。H湖在2014、2015年是Ⅳ类水质,2016、2017年变

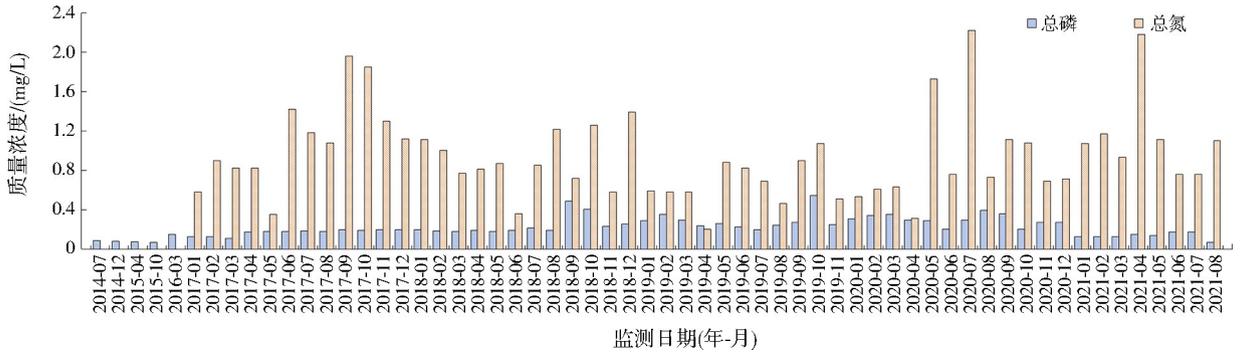


图 1 H 湖水水质变化情况  
Fig.1 Water quality change of Lake H

为 V 类水质,2018—2020 年变为劣 V 类水质,2021 年变为 V 类水质。总磷最严重时(2019 年 10 月)超水质基线 9.82 倍,最轻时(2015 年 10 月)超水质基线 0.34 倍。2018 年停止投肥后,2018—2020 年水质继续恶化的原因是沉淀附着在底泥上的磷元素作为内部磷源释放。

### 2.5.2 底质

H 湖湖底大体呈平底锅状,沉积淤泥达 0.8~1.0 m,其中黑泥厚度约为 0.5~0.8 m。根据底质总磷监测数据,H 湖底质所监测的 9 个点位中,总磷均超过了底质基线,最严重的超底质基线 4.20 倍,最轻的超底质基线 2.07 倍。

### 2.5.3 水生态环境

当前 H 湖流域的浮游植物群落结构已由 1994 年的隐藻门、裸藻门为优势类群变为以绿藻门、蓝藻门、硅藻门为绝对优势类群;流域底栖动物现存量大幅下降,已由 1994 年的球形无齿蚌、沼螺为优势类群变为当前的长足摇蚊、霍甫水丝蚓、苏氏尾鳃蚓、扁蛭、长足摇蚊、霍甫水丝蚓、苏氏尾鳃蚓为优势类群;鱼类资源呈衰退趋势,鱼类单一化和小型化严重,主要表现为大中型经济鱼类生物量减少,湖泊中极富盛名的鳊、鮰等名优鱼类资源衰退更严重。

### 2.6 因果关系分析

(1) 污染行为分析。2002 年 9 月至 2018 年的历年投肥量台账证实了向 H 湖投肥的行为。

(2) 时间顺序分析。投肥行为发生在 H 湖水水质恶化前,投肥行为发生前 H 湖是 III 类水质,投肥行为发生后水质开始发生恶化,至本次鉴定评估开始时仍为 V 类水质。同时,H 湖的底质也因为投肥遭受到了污染,底质中总磷超过了基线水平,这也是停止投肥后,水质持续恶化的主要原因。

(3) 污染物同源性分析。H 湖水水质、底质超标的主要指标为总氮、总磷,与投肥的主要成分是一致

的,与投肥所带来的污染特征也具有高度一致性。

(4) 不确定性分析。水体氮、磷等营养物质的来源具有多源性,在向 H 湖投肥养鱼的同时,H 湖周边的农业源、生活源(经调查核实无工业源汇入)等也在向 H 湖排放氮、磷污染物,但这些污染源带来的污染物量相比投肥而言要少得多,因而投肥养鱼是造成 H 湖水水质恶化的主要原因,因果关系成立。

综上,投肥养鱼导致 H 湖水体和底质总磷、总氮超标的污染行为存在,时间顺序符合逻辑,污染源及特征污染物同源性明确,污染物迁移途径清晰,与 H 湖水生态环境受到损害的因果关系成立,是 H 湖水水质恶化的主要因素。

### 2.7 生态环境损害实物量化

#### 2.7.1 入湖总磷贡献核算

进入 H 湖生态环境的磷来源较广,除投肥养鱼外,农业施肥、生活排水、养殖业等都向 H 湖排磷,为区分相关责任,对各种污染源排入 H 湖的总磷进行核算。其中,投肥数据来源于审计部门 2002 年 9 月至 2020 年 12 月经营履约情况及资产损益情况审计调查报告;汇水范围根据等高线地形图确定;农业源和生活源基础数据来源于汇水范围内以行政村为统计单位的乡镇调查统计数据。

#### (1) 投肥养鱼入湖总磷贡献量

从 2002 年 9 月开始投肥,到 2018 年停止投肥,期间投肥量为 136 100.94 t。根据各肥料中的氮、磷含量数据(对有氮、磷含量数据的肥料,按照肥料成分表最低值计算;对于无氮磷含量数据的,按照肥料资料数据中的最低值 1.5%(质量分数)进行计算),累计投入总磷 2 928.71 t。这些肥料不仅投入了 H 湖,也投入了其他湖泊。投肥量与湖面面积总体成正比,因此按照湖面面积进行切分,投肥养鱼入湖总磷贡献量为 2 282.78 t。研究表明,水产养殖中,

鱼类对肥料中磷的利用率是相当低的,投肥过程中大量的磷富积在水体和底泥中<sup>[7]</sup>。因此,核算过程中未考虑鱼类对磷的摄入消耗量。

## (2) 农业源入湖总磷贡献量

① 畜禽养殖污染排放。H湖汇水范围内的畜禽养殖以生猪、蛋鸡和肉牛养殖为主。统计汇水范围内各乡镇畜禽养殖量后再根据第二次全国污染普查《农业污染源产排污系数手册》核算H湖汇水范围内的畜禽养殖产排污量,汇水范围内2019、2020、2021年畜禽养殖业总磷排放量分别为2.39、1.89、2.02 t。

② 水产养殖污染排放。2019、2020、2021年H湖汇水范围内水产养殖的年产量分别为1 247、1 244、1 259 t。按照《农业污染源产排污系数手册》中总磷的水产养殖业排污系数(0.183 kg/t),核算得到2019、2020、2021年水产养殖业总磷排放量均为0.23 t。

③ 种植业污染排放。H湖汇水范围区域的种植规模:2019年水田、旱地面积分别为2 229.94、1 037.07 hm<sup>2</sup>,2020年分别为2 235.81、1 031.20 hm<sup>2</sup>,2021年分别为2 240.21、1 026.80 hm<sup>2</sup>。根据汇水范围内上报的农业用地面积和化肥使用强度相关资料,结合《农业污染源产排污系数手册》,综合考虑区域种植业土地利用类型和面积、化肥使用强度,不考虑系数修正,核算出2019—2021年项目范围内种植业总磷年均排放量为1.89 t/a。

2019—2021年H湖汇水范围内农业源总磷年均排放量为4.22 t/a(见表1)。计算2002年9月至2021年的农业源入湖总磷贡献量时,囿于时间久远,逐年的数据已无法准确获取,因此用总磷排放量推算出2002年9月至2021年农业源入湖总磷贡献量为79.52 t。

表1 H湖汇水范围内各类农业源污染物入湖情况

Table 1 The inflow of various agricultural pollutants into the H Lake

项目	2019—2021年农业源总磷年均排放量/(t/a)	农业源入湖总磷贡献量/t
畜禽养殖业	2.10	40.64
水产养殖业	0.23	4.42
种植业	1.89	34.46
合计	4.22	79.52

## (3) 生活源入湖总磷贡献量

影响H湖氮、磷含量的生活污染源主要为周边乡镇排放的生活污水,包括城镇和农村生活污水。根据H湖汇水范围内的常住人口以及农村生活废

水治理调查情况,获取得到2002年9月至2021年H湖汇水范围内生活源入湖总磷贡献量为67.98 t。

## (4) 连通湖入湖总磷贡献量

将连通湖视为点源,其汇水范围(61 980 700 m<sup>2</sup>)内的降雨(按多年平均1 200 mm计)均汇入连通湖,再进入H湖。下雨时冲刷的总磷基本上随着河流进入湖泊,蒸发不出来,再加上下渗水也往湖泊排泄,在不考虑蒸发、下渗损失的情况下,计算得到连通湖入H湖水通量约为74 376 840 m<sup>3</sup>/a。用入H湖水通量再乘以其湖体水质年均值,即可算出连通湖入H湖总磷贡献量。由于缺乏监测数据,同时考虑到2019年的监测数据和2018年相比跌幅较大,因此具体计算时分段统计:2018年及以前的按照2018年的总磷年均值进行计算,2019—2021年按照3年的总磷平均值计算。经计算,2002年9月至2021年连通湖入湖总磷贡献量为387.43 t。

## (5) 各种源入湖总磷贡献量及占比汇总

根据上述投肥养鱼、农业源、生活源、连通湖入H湖的总磷贡献占比,汇总见表2。由表2可以看出,投肥养鱼贡献的入湖总磷占比最高,达到了81.02%,说明投肥养鱼对H湖水质恶化起主导作用。

表2 各污染源入湖总磷贡献量及占比

Table 2 Contribution and proportion of total phosphorus from various pollution sources into lake

项目	入湖总磷贡献量/t	总磷贡献占比/%
投肥养鱼	2 282.78	81.02
农业源	79.52	2.82
生活源	67.98	2.41
连通湖	387.43	13.75
合计	2 817.71	100.00

## 2.7.2 生态环境损害恢复方案筛选

### (1) 基本恢复目标与方案

H湖的生态环境风险已不可接受,故采用人工恢复与自然恢复相结合的恢复方式。针对H湖流域受损的生态环境,已编制完成修复方案,修复方案将H湖流域作为一个整体,以提升H湖水质为核心,在调查分析与比选论证基础上,提出了修复目标,确立了“水资源、水生态、水环境”三水统筹理念指导下的“优—调—治—修—用—管”体系,明确了“退养、截污、活水、控泥、修复、资源化+精管”的修复举措。修复方案所列的修复工程主要包括城镇生活污染治理工程、农村生活污染防治工程、种植业污染防治工程、水产养殖业污染防治工程、畜禽养殖业污染防治工程、初期雨水径流及低污染水调蓄净化

工程、沟渠排口治理工程、污水处理厂水质净化工程、河湖缓冲带修复工程、底质污染控制疏浚工程、湖内生态修复工程、精细化管理工程、示范区建设工程、高质量发展工程等。

修复方案综合考虑了经济、技术和可操作性等方面因素,将 H 湖修复目标确定为“2025 年 H 湖水水质进一步改善,全湖总磷平均质量浓度低于 0.075 mg/L、其他指标达到Ⅲ类;水生态状况也将得到改善”,是目前切实可行的选择。但应该指出的是,修复方案所定的修复目标中 0.075 mg/L 与水质基线 0.05 mg/L、中东部湖区湖泊营养物基准总磷 0.029 mg/L 尚存在一定差距,达到修复目标并不意味着排除了 H 湖水水质富营养化风险。修复方案所定修复目标是在综合考虑经济、技术和可操作性等方面因素后确定的,不排除在 H 湖水水面养殖使用期届满前,仍需要采取补充性恢复措施来进一步改善、提升水质。

### (2) 期间损害和补偿性恢复

因 H 湖生态环境损害发生到恢复至水质基线的持续时间远大于一年,故在开展基本恢复的同时,还应计算期间损害,开展补偿性恢复,补偿从生态环境破坏发生到恢复至水质基线期间,受损生态环境原本应该提供的生态系统服务<sup>[8-9]</sup>。

评估以 2002 年作为评估起始年,2022 年为评估基准年,贴现率取 3%。生态恢复规模以水资源量表征服务水平,其中基本恢复规模为 H 湖年蓄水量 4 640 万 m<sup>3</sup>,补偿性恢复规模通过资源等值分析方法确定。根据《生态环境损害鉴定评估技术指南总纲和关键环节 第 1 部分:总纲》(GB/T 39791.1—2020),事件期间损害为 50 945.59 万 m<sup>3</sup>,补偿性恢复方案的单位效益为 29.818 4,相除得到补偿性恢复方案的规模约为 1 709 万 m<sup>3</sup>。

## 2.8 生态环境损害价值量化

价值量化是指基于恢复目标对生态环境损害进行计算,包括基本恢复部分和补偿性恢复部分的量化。基本恢复费用和补偿恢复费用合计,得到投肥养鱼造成的生态环境损害。

### 2.8.1 基本恢复部分量化方法

根据确定的修复方案,各部分成本较清楚,故选择恢复费用法量化 H 湖生态环境损害价值。H 湖目前水体呈现富营养化,主要的特征污染物指标是总氮、总磷,本次评估以总磷作为评价指标。另外,入湖的总磷除部分为投肥带来,周边的农业源和生活源亦有汇入,根据总磷贡献量占比,再用基本恢复

费用乘以投肥养鱼应分担的总磷贡献占比,即为投肥养鱼造成的生态环境损害的价值量化结果。

### 2.8.2 补偿性恢复部分量化方法

根据《生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第 2 部分:地表水和沉积物》(GB/T 39792.2—2020)和地表水生态环境损害的特点,可选择服务类或资源类指标计算期间损害,因受损的 H 湖生态环境以提供供给服务为主,评估补偿性恢复目标与基本恢复目标采用相同的方法——资源等值分析法,对 H 湖生态环境损害开始发生到水质恢复至基线水平的期间损害进行量化,计算补偿性恢复的规模,再根据基本恢复部分恢复同等规模所需承担的费用计算补偿性恢复部分的价值。

## 3 结 语

本事件是一起因长期投肥养鱼导致湖泊生态环境受损的代表性案例,污染事实存在,污染源及特征污染物同源性明确,污染物迁移途径清晰,但涉及多种污染源,是多因一果的环境侵权。

此案积极探索因湖泊长期投肥养鱼导致湖泊水体污染的生态损害赔偿案件办理新思路,在分析特征污染物的基础上,确定了评估评价指标为总磷。结合调查材料,明确了投肥养鱼与 H 湖水生态环境损害的因果关系、生态环境损害程度。在对生态环境损害实物量化的基础上,根据已通过专家评审的修复方案,采用基于恢复目标的生态环境损害评估方法,计算了期间损失和补偿性恢复的规模。根据生态环境损害价值量化的思路,通过全面走访调查,对造成 H 湖污染的汇水范围内相关乡镇的各类污染源进行全面统计,核算了入湖农业源、生活源和投肥养鱼各自的总磷贡献后,确定了投肥养鱼造成的生态环境损害费用。该评估方法可为科学合理地评估类似环境损害案件提供参考和借鉴。

## 参考文献:

- [1] 农业部渔业局.中国渔业统计年鉴 2023[M].北京:中国农业出版社,2023.
- [2] 刘国锋,徐跑,吴霆,等.中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路[J].江苏农业学报,2018,34(1):225-233.
- [3] 包美玲,张强,洪慧,等.湖库型水产养殖污染生态环境损害鉴定适用方法研究[J].环境科学与技术,2023,46(增刊 2):241-246.
- [4] 洪慧,张强,刘哲,等.生态环境损害多因一果关系识别判定:以非法处置危废案为例[J].环境科学与技术,2023,46(增刊 2):233-240.

(下转第 139 页)