

DOI: 10.5846/stxb202003210621

李小辉, 赵思琪, 代嫣然, 唐涛, 余志晟, 梁威. 湖泊生态环境损害基线判定技术综述. 生态学报, 2021, 41(18): 7425-7431.

Li X H, Zhao S Q, Dai Y R, Tang T, Yu Z S, Liang W. Technique for determining the eco-environmental damage baseline of lakes: a review. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7425-7431.

湖泊生态环境损害基线判定技术综述

李小辉¹, 赵思琪^{1,2}, 代嫣然^{1,*}, 唐 涛¹, 余志晟³, 梁 威¹

1 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要:近年来,污染事故引发的湖泊生态环境损害问题屡见不鲜,特别是氮磷营养盐富集导致的湖泊富营养化。因此,对湖泊生态环境损害程度进行科学合理评判,制定湖泊生态环境损害判定规范程序,形成湖泊生态环境损害判定技术势在必行。目前,国内外学者一致认为,确定切实合理的生态环境基线是对生态环境损害进行科学有效评估的关键技术环节和重要前提。基于相关国家标准以及文献调研,对湖泊生态环境基线判定的原则、判定程序以及判定方法进行系统梳理与总结。详细介绍了针对湖泊不同受体的模型推算在生态环境损害基线判定中的应用,包括相应的判定方法、判定过程以及优缺点。此外,还针对国内外典型湖泊生态环境损害基线判定研究实例进行阐述。最后对湖泊生态环境基线判定工作的未来发展方向进行了展望,以期形成统一、合理、有效且具有高度普适性的湖泊生态环境基线制定方法与流程提供依据。

关键词:湖泊生态系统;生态环境基线;基线判定原则;基线判定程序;基线判定方法

Technique for determining the eco-environmental damage baseline of lakes: a review

LI Xiaohui¹, ZHAO Siqi^{1,2}, DAI Yanran^{1,*}, TANG Tao¹, YU Zhisheng³, LIANG Wei¹

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In recent decades, the eco-environmental damage caused by pollution has frequently occurred in many lake ecosystems all over the world. Eutrophication is the one of the most common consequences of long-term damage to lake ecosystems, which is driven by excessive input of nitrogen and phosphorus. To better conserve lake ecosystems, it is thus imperative to establish a standard evaluation procedure and develop an efficient evaluation technique for making scientific and accurate judgements on the degree of lake eco-environmental damage. Currently, many scholars agree that the critical aspect and precondition for the scientific and effective assessment of eco-environmental damage is the determination of a practical and reasonable eco-environmental damage baseline. In this study, based on surveying the relevant national standards and a large number of publications, we firstly synthesized and presented the determination principles, procedures, and methods for lake eco-environmental baseline. Secondly, we introduced all kinds of extrapolation models aiming at different receptors in this field, including the corresponding determination method and determination process, advantages and disadvantages, since they are increasingly being used in the case studies. Thirdly, we also briefly presented several typical case studies to indicate how to determine a practical and reasonable eco-environmental damage baseline.

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0503601-01)

收稿日期:2020-03-21; 修订日期:2021-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanrandai@hotmail.com; yanrandai@ihb.ac.cn

Finally, we provided three perspectives for the further research of the lake eco-environment baseline determination. We hope that this review article could provide the support for forming the method and process of unification, effectivity, reasonability, and high applicability for the determination of eco-environmental baseline in lake ecosystems.

Key Words: lake ecosystem; eco-environmental baseline; baseline determination principle; baseline determination procedure; baseline determination method

湖泊生态环境损害是指因干扰、破坏湖泊自然生态环境而造成的湖泊物理生境质量、水文特征、水质状况等环境要素和鱼类、底栖动物、附生藻类等生物要素的不利改变,以及伴随的生态系统服务功能的退化和生态系统美学价值的破坏^[1-3]。湖泊生态环境损害分为两大类型,即湖泊开发利用活动造成的长期损害^[4-6]以及湖泊环境突发事件^[7-10]。

我国境内湖泊众多、类型多样且开发历史悠久^[11]。20 世纪以来,随着社会经济的不断发展,湖泊经济开发活动压力不断增大,湖泊污染事故频繁发生,湖泊生态环境损害问题日益严重^[12-13],其中氮磷元素超负荷输入所导致的湖泊水体富营养化是湖泊生态系统遭受长期损害最为普遍的后果之一^[14-15]。环境损害鉴定评估是指对环境损害的范围和程度进行鉴定与量化评估的过程^[16]。其中确定切实合理的生态环境基线是对湖泊生态环境损害进行科学有效评估的关键技术环节和重要前提^[17-18]。

基线也称为生态环境基线,是指环境污染或生态破坏行为未发生时,受影响区域内生态环境的物理、化学或生物特性及其生态系统服务的状态或水平^[19]。目前常用的生态环境损害基线判定方法包括历史数据法、参照区域法、环境标准法和模型推算法四类^[20-21]。近些年来,国内外对于淡水生态环境基线的判定工作已积累了较多的经验。例如,LeJeune 等^[22]采用参照区域法确定科达伦河流域地表水污染物基线浓度,在该研究中所选取的参考区域为评估区域的上游区域和附近相似区域,最终成功判定了损害范围和具体损失赔偿数额。在评估矿业生产中产生的铜等重金属对地表水资源造成的环境损害时,Mugdan 等^[23]将上游参考区域的物质浓度水平作为该损害区域的基线水平。朱欢迎^[24]则采用湖泊群体分布法和回归推断法确定了滇池草海的营养元素基准值。在该研究中,作者通过查阅大量历史文献确定云贵高原生态区参考湖泊并建立营养盐浓度参考状态,将其作为滇池的营养盐含量基线值,最终确定滇池草海总氮(TN)和总磷(TP)的建议基线值分别为 0.177 mg/L 和 0.010 mg/L。随着生态环境的不断恶化,如何对环境损害基线进行判定引起了学界的广泛关注。为了能够更为科学有效地对已受损的湖泊生态系统进行损害程度鉴定,制定出国家层面的湖泊生态环境损害判定规范程序,形成湖泊生态环境损害基线判定技术势在必行。

然而,目前专门针对湖泊生态基线的研究较为缺乏,且尚未形成统一、合理、有效的普适性湖泊生态环境基线制定方法与流程。针对以上问题,本文总结了可用于湖泊生态环境基线判定的原则、判定程序以及常用判定方法,介绍了模型推算法在湖泊生态环境损害基线判定中的应用,并在此基础上对未来研究进行了展望。以期后续湖泊生态环境基线的判定、湖泊生态系统修复措施的实施、所需修复资金的预估以及损害责任方所需支付赔偿金额的确定提供参考和借鉴^[25-28]。

1 湖泊生态环境基线判定技术

1.1 判定原则

为了准确地对湖泊生态环境基线进行判定,在判定过程中要遵循科学性、准确性、可操作性、及时性和方法优选五大原则(表 1)。

1.2 判定程序

湖泊生态环境基线判定工作主要包括 5 个步骤:(1)工作准备;(2)基线指标识别;(3)基础资料数据收集;(4)确定基线标准;(5)编制湖泊生态环境基线判定报告书(图 1)。在基线判定实践中,可根据具体的生

态环境损害事件适当简化工作程序。必要时,也可针对基线判定中的关键问题开展专题调查研究。

表 1 湖泊生态环境损害基线判定原则
Table 1 Determination principles for eco-environmental damage baseline of lakes

基线判定原则 Determination principle	内容 Content
科学性 Scientificity	湖泊生态环境基线的判定要科学、客观,判定过程中要排除损害事件以外的其他因素如自然环境背景时空变化、常规人类活动等对评估湖泊生态系统的影响
准确性 Accuracy	采用规范化和标准化的现场调查、采集和测试方法,并严格遵循质量保证和质量控制要求,确保湖泊基线数据的真实、准确性
可操作性 Operability	基线判定应考虑所拥有的人力、资金和后勤保障等条件,评估区域应具备一定的交通条件和工作条件,以便于野外调查工作的展开
及时性 Timeliness	应在生态环境损害事件发生后尽快开展基线判定工作,为后续生态环境损害程度鉴定评估提供数据证据
方法优选 Optimization	根据湖泊生态环境损害事件的特点以及资料信息,合理筛选基线判定方法,并注意多种方法的组合运用和比较,确定最优的基线确定方法或方法组合

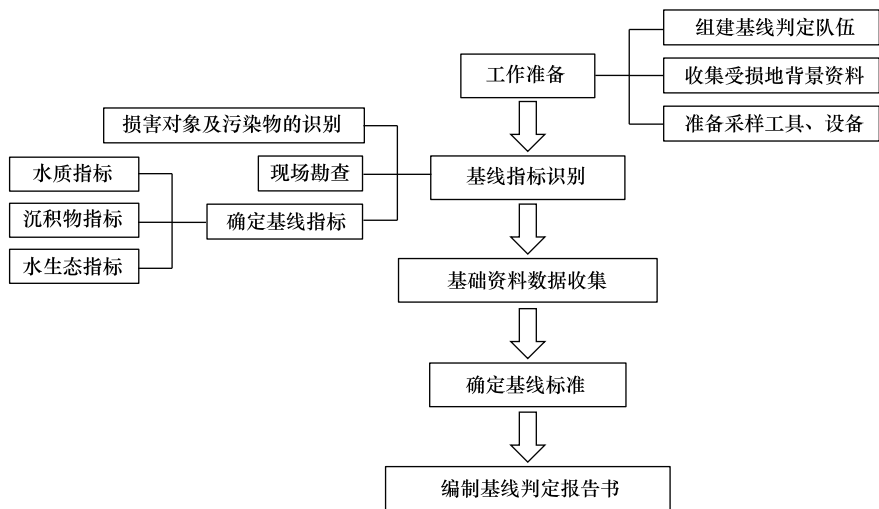


图 1 湖泊生态环境基线判定程序
Fig.1 Determination procedure of the lake eco-environmental baseline

1.3 基线判定方法

国际上有关环境损害鉴定评估基线的确定尚未形成统一规范。目前常用的湖泊生态环境损害基线判定方法主要包括历史数据法、参照区域法、环境标准法和模型推算法四类方法。不同判定方法均存在对应的优缺点,详见表 2。

2 模型推算法的应用

相比较而言,历史数据法、参照区域法、环境标准法简单易行且易于操作,但有时基线判定过程中会出现历史数据不足、无可参照区域以及标准缺乏等问题。模型推算法虽然相对复杂,但精确度较高,正在成为基线判定的主要依据。

环境损害的受体既包括非生物环境成分,也包括环境中生存的生物成分。对于湖泊生态系统而言,非生物环境成分通常是指沉积物等非生物资源,生物成分指的是水生动植物资源^[37]。利用模型法判定基线时,根据判定受体类型的差异以及模型的适用条件,有多种模型可供选择(表 3)。

表 2 湖泊生态环境损害基线判定方法比较

方法 Method	判定过程 Determination process	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 References
历史数据法 Historical data method	通过基础调研收集可用的历史数据进行筛选、分析和评估,并采用一定的数据统计方法确定最终基线水平	结果可靠	历史数据有限、数据间存在不可比性	[29-31]
参照区域法 Reference region method	利用未受生态环境损害事件影响的邻近区域或相邻湖泊的历史数据或现场监测数据确定基线	准确度高、数据易获取	参考区域少、自然环境变化影响大	[32-34]
环境标准法 Environmental standard method	以国家或地方颁布的环境标准作为评估参照,将相关法规和环境标准中的适用基准值或修复目标值作为基线水平	简单易操作	环境时效性强、环境标准易混用、标准文件缺乏	[20, 35-36]
模型推算法 Extrapolation model	通过大量调查数据构建环境胁迫因子与湖泊生物多样性、群落组成、生物量、生态服务功能等的胁迫-响应关系预测模型,推算生态环境基线	精确有效、易于控制	数据量要求多、不确定性较高	[37-40]

表 3 模型推算湖泊生态环境损害基线常用方法

受体 Receptor	判定方法 Determination method	判定过程 Determination process	优缺点 Advantage/disadvantage
非生物受体 Abiotic receptor	历史数据法/参照区域法/环境标准法/模型推算法	与四种湖泊生态环境基线判定方法一致	
生物受体 Biotic receptor	物种/种群	生态毒理模型法	环境中一年内各物种或种群生物量与无毒物质存在情况下相比其变化量是否在合理的波动范围内,波动超出这一范围则认为存在生态风险
		高斯模型	对植物种群随环境因子的定量变化趋势进行模拟,进而从趋势变化分析得出生态阈值
	生物群落	评价因子法	在所有毒性数据中选择最敏感物种的毒性数据,除以合适的评价因子后得到单一的基准值
		物种敏感度分布法	利用搜集到的物种毒性数据建立物种敏感度分布曲线,再根据曲线进行统计外推,计算出保护一定比例物种时的污染物浓度作为该污染物的基线水平
		毒性百分数排序法	搜集毒性数据后先计算属平均急性值,并将其从大到小进行排序编号,然后计算累积概率并选取累积概率最接近 5% 的四个属来计算最终急性毒性值
		投入响应关系法	选定相关指标并完成数据搜集,将两个指标的数据投入响应关系,对二者的变化趋势进行分析,选取合适的时间段作为参照状态并建立回归方程,得到目标营养物基准
	生态系统	综合指数法	在全面考虑生态系统的各组分及功能后,选择可以表征生态系统状态的生态指标,根据这些指标的特点为每一个指标制定对应的评分尺度,建立一个包含各种生态指标的综合指数体系 ^[37]
		频数分布法	将搜集到的总数据按某种标准分为几组,统计出每一组内含有的个数,每个组别及每组含有的个数即组成频数分布,将研究环境的频数分布与参照状态进行对比得出生态学基准值 ^[42]

3 相关应用案例

借助各种基线判定方法,国内外学者对湖泊生态环境基线进行了广泛而深入的研究。Dodds 等^[34]分别采用参考湖泊法、三分法和模型推断法对美国堪萨斯州各湖泊和水库进行营养物质基线水平的制定。利用参考湖泊法最终确定 TN 基线为 0.861 mg/L,TP 基线为 0.033 mg/L,叶绿素 a 基线为 0.010 mg/L,透明度基线为

155 cm。三分法则首先从全区域所有湖泊中选取营养物质浓度水平最低的 1/3 湖泊组成可供分析的湖泊子群体,进一步计算子湖泊群中各湖泊营养物质指标的中位数,进而确定该区域湖泊营养水平指示指标的基线水平。该研究中所采用的模型推断法是基于对该流域特征的分析进行,通过对存在人为影响的流域特征进行建模,进而通过 y 轴截距推断不存在人为干扰时的营养物质的浓度。经三种方法确定的氮磷基线如表 4 所示。

在我国,不少研究者针对我国不同湖泊的营养物质基线基准也已开展了相应的研究。Huo 等^[43]采用湖泊群体分布法和三分法对我国东部平原生态区湖泊的营养物质基线状态进行研究。由于我国东部平原湖泊受到人类活动的干扰相对较大,仅采用 25% 为指标数值可能出现基准值偏高的情况,且湖泊作为动态的复杂生态系统并非一个具体的数值就能够代表其营养物质的基线水平^[44]。因此在该研究中,作者选择上 5%—25% 这一范围作为湖泊群体分布法的基线确定标准,得出我国东部平原 TP 基线范围为 0.014—0.043 mg/L, TN 基线范围 0.360—0.785 mg/L。与此同时,三分法则得出 TN 基线水平为 0.670 mg/L, TP 基线水平为 0.029 mg/L。张亚丽^[33]采用湖泊群体分布法初步确定了我国蒙新高原生态区湖泊营养物质基准建议值。对于 TDS (矿化度) <1 g/L 的淡水湖,建议采用 TN 浓度 0.120 mg/L, TP 浓度 0.005 mg/L 作为基准基线值;对于 1 g/L < TDS < 2 g/L 的微咸水湖,建议采用 TN 浓度 0.675 mg/L, TP 浓度 0.005 mg/L 作为基准基线值;对于 2 g/L < TDS < 50 g/L 的中咸水湖,建议采用 TN 浓度 0.728 mg/L, TP 浓度 0.012 mg/L 作为基准基线值;对于 TDS > 50 g/L 的盐湖,建议采用 TN 浓度 1.250 mg/L, TP 浓度 0.010 mg/L 作为基准基线值。揣小明^[45]通过对新疆、内蒙古等地的湖泊营养水平及 TP 含量进行分析,确定了包括呼伦湖、太湖在内的 28 个湖泊的 TP 基准浓度。在该研究中,针对历史数据充足的呼伦湖、滇池等,作者选取其历史数据的下 25% 作为其各自的 TP 基准值;对于人为主导型富营养化的太湖,其受到人为活动干扰较大,作者采用中营养和富营养卡尔森指数的临界值反推 TP 基准值。郑丙辉等^[46]采用历史数据法建立了太湖营养物质基准值,并通过古湖沼学重建法对所得结果进行验证。在该研究中,作者认为上 5% 位点设置为太湖营养物质基准更为合适,最终研究结果显示,通过历史数据法所得结果为 TN 0.07 mg/L、TP 0.03 mg/L。

表 4 参考湖泊法、三分法和模型推断法对美国堪萨斯州各湖泊和水库的氮、磷基线确定结果

Table 4 Total nitrogen and phosphorus baseline of lakes and reservoirs in Kansas, USA using reference lake, trichotomy and extrapolation model method

指标 Index	生态分区 Ecological sectorization	参考湖泊法 Reference lake method	三分法 Trichotomy method	模型推断法 Model calculation method
总氮/(mg/L) Total nitrogen	中央大平原	0.861	0.695	NA
	中央不规则平原		0.362	NA
	弗林特山区		0.301	NA
	西部谷物种植带		0.201	0.658
总磷/(mg/L) Total phosphorus	中央大平原	0.033	0.044	0.062
	中央不规则平原		0.020	0.027
	弗林特山区		0.019	0.023
	西部谷物种植带		0.025	0.027

NA: 无相关数据 Not Available

4 展望

2016 年 6 月,环境保护部印发的《生态环境损害鉴定评估技术指南总纲》中规定了生态环境损害鉴定评估的一般原则、评估程序、评估内容和方法,这为我国生态环境损害鉴定评估工作的进行奠定了基础^[47-48]。然而,我国针对湖泊生态系统的生态环境损害鉴定评估技术仍不完善,作为环境损害鉴定评估的重要依据和标准^[49-50],湖泊生态环境基线缺少统一的、具有高度普适性的制定方法与流程。因此,需针对以下几个方向进一步开展相关工作:

(1) 加强我国湖泊水体的生态环境监测工作, 积累关键数据, 构建一体化的湖泊生态环境监测网络。生态环境监测可以获取基线判定环节所需的历史数据, 是鉴定评估中的核心内容, 生态环境监测的科学性直接影响到环境损害鉴定评估结果的准确性^[51-52]。因此, 对湖泊进行长期的生态环境定位监测, 获取大量数据对后续开展的湖泊生态环境基线判定工作具有重要的促进作用。

(2) 建立基于不同湖泊、不同生态环境损害类型的基线判定标准、评估与方法技术体系, 着力构建湖泊生态环境损害基线判定方法和基线数据库平台。在对具体湖泊进行基线判定时, 应综合考虑评估区域的功能区划和特异性, 根据实际情况选择科学合理的方法, 推导基线水平^[53-54], 逐步搭建起我国湖泊环境损害鉴定评估业务化平台, 为国家解决环境问题提供科学技术与平台支撑^[18]。

(3) 进一步完善我国湖泊环境损害鉴定评估技术规范及相关标准。在借鉴、总结国内外湖泊生态环境损害鉴定评估方法和实践经验的基础上, 不断完善符合我国国情的湖泊环境损害鉴定监测方法标准、环境质量标准、评价标准及技术规范^[55], 以更好地为环境管理服务。

参考文献 (References):

- [1] Nishizawa E, Kurokawa T, Yabe M. Policies and resident's willingness to pay for restoring the ecosystem damaged by alien fish in Lake Biwa, Japan. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9(5): 448-456.
- [2] Allan J D, Smith S D P, McIntyre P B, Joseph C A, Dickinson C E, Marino A L, Biel R G, Olson J C, Doran P J, Rutherford E S, Adkins J E, Adeyemo A O. Using cultural ecosystem services to inform restoration priorities in the Laurentian Great Lakes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(8): 418-424.
- [3] 吕晨璨, 张雪琦, 孙晓萌, 李善麟, 董仁才. 基于景感生态学认知的生态环境损害问题辨析. *生态学报*, 2021, 41(3): 959-965.
- [4] 冉霞. 苏州市突发环境事件的特征分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.
- [5] 王强, 赵月朝, 屈卫东, 陈晓东, 何祖安, 陶毅, 吴传业, 鄂学礼, 张岚, 张淑珍, 李秋虹, 曹兆进. 1996—2006 年我国饮用水污染突发公共卫生事件分析. *环境与健康杂志*, 2010, 27(4): 328-331.
- [6] 杨洁, 毕军, 张海燕, 李凤英, 周鲸波, 刘蓓蓓. 中国环境污染事故发生与经济发展的动态关系. *中国环境科学*, 2010, 30(4): 571-576.
- [7] 毕建培, 刘晨, 黎绍佐. 阳宗海神污染水质变化过程分析. *水资源保护*, 2014, 30(1): 84-89.
- [8] 孟伟, 杨荣金, 舒俭民, 宋福, 周云龙. 突发环境污染事件对湖泊浮游动物的影响. *环境科学研究*, 2007, 20(4): 87-91.
- [9] 徐小钰, 朱记伟, 李占斌, 解建仓. 国内外突发性水污染事件研究综述. *中国农村水利水电*, 2015, (6): 1-5, 11-11.
- [10] 许静, 王永桂, 陈岩, 赵琰鑫. 中国突发水污染事件时空分布特征. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4566-4575.
- [11] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(3): 394-401.
- [12] 王圣瑞, 倪兆奎, 席海燕. 我国湖泊富营养化治理历程及策略. *环境保护*, 2016, 44(18): 14-19.
- [13] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799-810.
- [14] 李贵宝, 王圣瑞. 我国湖泊水环境标准体系建设及其发展建议. *环境保护*, 2014, 42(13): 33-35.
- [15] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [16] 包蕊, 李涛, 张欣怡, 付晓, 赵宇, 唐明方, 邓红兵. 森林生态系统损害评估体系与管理制度研究. *生态学报*, 2021, 41(3): 924-933.
- [17] 韩林桅, 全元, 付晓, 单鹏, 吴钢. 参考点位法在土壤基线判定中的改进与应用. *生态学报*, 2018, 38(21): 7813-7818.
- [18] 吴钢, 曹飞飞, 张元勋, 张洪勋, 余志晟, 乔冰, 朱岩, 董仁才, 吴德胜. 生态环境损害鉴定评估业务化技术研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7146-7151.
- [19] 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霁, 贾倩, 张天柱, 骆永明. 环境损害评估: 国际制度及对中国的启示. *环境科学*, 2013, 34(5): 1653-1666.
- [20] 龚雪刚, 廖晓勇, 阎秀兰, 李尤, 杨坤, 赵丹. 环境损害鉴定评估的土壤基线确定方法. *地理研究*, 2016, 35(11): 2025-2040.
- [21] 李嘉珣, 曹飞飞, 汪铭一, 吴钢. 参照点位法下的参照状态在草原生态系统损害基线判定中的应用分析. *生态学报*, 2019, 39(19): 6966-6973.
- [22] LeJeune K, Podrabsky T, Lipton J, Cacela D, Maest A, Beltman D, Bowden T, Barron M. Report of Injury Assessment and Injury Determination: Coeur d'Alene Basin Natural Resource Damage Assessment. Washington, DC: Stratus Consulting Inc., 2000: 649-732.
- [23] Mugdan W E. First Five-Year Review Report for Hudson River PCBs Superfund Site. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [24] 朱欢迎. 滇池草海富营养化和营养物磷基准与控制标准研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.

- [25] Gastineau P, Taugourdeau E. Compensating for environmental damages. *Ecological Economics*, 2014, 97: 150-161.
- [26] Rao H H, Lin C C, Kong H, Jin D, Peng B R. Ecological damage compensation for coastal sea area uses. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 149-158.
- [27] Puig J, Villarroya A. Ecological quality loss and damage compensation in estuaries: clues from a lawsuit in the Basque Country, Spain. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 71: 46-51.
- [28] 叶脉, 陈佳亮, 林伟彪, 叶晓惊, 汪元凤, 张雪琦, 吕晨臻, 李善麟, 董仁才. 侵占城郊型林地的生态环境损害案例分析及评估方法. *生态学报*, 2021, 41(3): 966-974.
- [29] 张艳会, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊水生态系统健康评价指标研究. *资源科学*, 2014, 36(6): 1306-1315.
- [30] Barnthouse L W, Stahl Jr R G. Quantifying natural resource injuries and ecological service reductions: challenges and opportunities. *Environmental Management*, 2002, 30(1): 1-12.
- [31] Labay B, Cohen A E, Sissel B, Hendrickson D A, Martin F D, Sarkar S. Assessing historical fish community composition using surveys, historical collection data, and species distribution models. *PLoS One*, 2011, 6(9): e25145.
- [32] Gibson G, Smeltzer E, Gerritson J, Chapra S, Heiskary S, Jones J, Kennedy R. *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*. Washington: USEPA, 2000.
- [33] 张亚丽. 我国蒙新高原湖区湖泊营养物基准制定技术研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2012.
- [34] Dodds W K, Carney E, Angelo R T. Determining ecoregional reference conditions for nutrients, secchi depth and chlorophyll *a* in Kansas Lakes and reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 2006, 22(2): 151-159.
- [35] 王轩萱. 中美环境标准比较研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- [36] Mazzotta M J, Opaluch J J, Grigalunas T A. Natural resource damage assessment: the role of resource restoration. *Natural Resources Journal*, 2009, 34(1): 153-178.
- [37] 罗园. 基于生态系统的河流污染损害评估方法与应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [38] Park R A, Clough J S, Wellman M C. AQUATOX: modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological Modelling*, 2008, 213(1): 1-15.
- [39] Hertwich E G, McKone T E, Pease W S. A systematic uncertainty analysis of an evaluative fate and exposure model. *Risk Analysis*, 2000, 20(4): 439-454.
- [40] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. *Ecological Applications*, 2006, 16(4): 1267-1276.
- [41] 雷炳莉, 刘倩, 孙延枫, 王艺陪, 于志强, 曾祥英, 傅家谟, 盛国英. 内分泌干扰物 4-壬基酚的水质基准探讨. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(5): 657-664.
- [42] 杨福霞. 大辽河口营养物基准值的制定方法及其影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [43] Huo S L, Xi B D, Su J, Zan F Y, Chen Q, Ji D F, Ma C Z. Determining reference conditions for TN, TP, SD and Chl-*a* in eastern plain ecoregion lakes, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(5): 1001-1006.
- [44] Moss B, Stephen D, Alvarez C, Becares E, Van De Bund W, Collings S E, Van Donk E, De Eyto E, Feldmann T, Fernández-Aláez C, Fernández-Aláez M, Franken R J M, García-Criado F, Gross E M, Gyllström M, Hansson L A, Irvine K, Järvalt A, Jensen J P, Jeppesen E, Kairesalo T, Kornijów R, Krause T, Künnap H, Laas A, Lill E, Lorens B, Luup H, Miracle M R, Nöges P, Nöges T, Nykänen M, Ott I, Peczuła W, Peeters E T H M, Phillips G, Romo S, Russell V, Salujõe J, Scheffer M, Siewertsen K, Smal H, Tesch C, Timm H, Tuvikene L, Tonno I, Virro T, Vicente E, Wilson D. The determination of ecological status in shallow lakes—a tested system (ECOFRAME) for implementation of the European water framework directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2003, 13(6): 507-549.
- [45] 揣小明. 我国湖泊富营养化和营养物磷基准与控制标准研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [46] 郑丙辉, 许秋瑾, 周保华, 张龙江. 水体营养物及其响应指标基准制定过程中建立参照状态的方法——以典型浅水湖泊太湖为例. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 21-26.
- [47] 於方, 张衍桑, 徐伟攀. 《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲》解读. *环境保护*, 2016, 44(20): 9-11.
- [48] 于恩逸, 崔宁, 吴迪, 唐明方, 付晓, 吴钢. 草原生态环境损害因果关系判定路径. *生态学报*, 2021, 41(3): 943-948.
- [49] 曹飞飞, 付晓, 李嘉珣, 汪铭一, 吴钢. 基于灰色拓扑理论的草地生态系统损害基线动态预测. *生态学报*, 2020, 40(2): 540-548.
- [50] Burger J, Gochfeld M, Powers C W, Greenberg M. Defining an ecological baseline for restoration and natural resource damage assessment of contaminated sites: the case of the department of energy. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2007, 50(4): 553-566.
- [51] 李欢欢, 张雪琦, 张永霖, 董仁才. 城市生态环境损害鉴定评估监测体系研究. *生态学报*, 2019, 39(17): 6469-6476.
- [52] 王海芹, 程会强, 高世楫. 统筹建立生态环境监测网络体系的思考与建议. *环境保护*, 2015, 43(20): 24-29.
- [53] 隋鑫. 环境损害鉴定评估领域难点探讨. *环境与发展*, 2020, 32(5): 22-23.
- [54] 於方, 张衍桑, 齐霁, 赵丹, 徐伟攀. 环境损害鉴定评估关键技术问题探讨. *中国司法鉴定*, 2016, (1): 18-25.
- [55] 陈其平, 张艳, 潘海婷, 杨凯, 罗岳平. 美国环境污染损害鉴定评估监测对中国的启示. *环境科学与管理*, 2018, 43(10): 1-4.