



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

淡水生态系统损害鉴定与评估技术研究进展

余志晟

yuzs@ucas.ac.cn

中国科学院大学
2024年9月 青岛

报告提纲

一、研究背景

二、淡水生态环境基线判定技术研究进展

三、淡水生态环境污染溯源技术研究进展

四、淡水生态环境损害程度量化技术研究进展

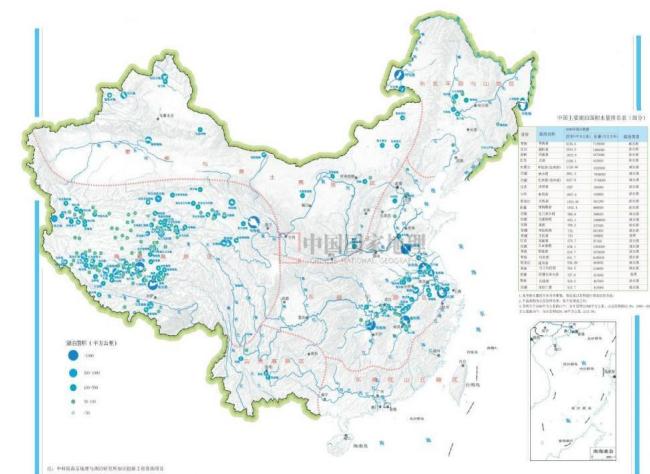
五、适证应用研究进展

六、总结与展望

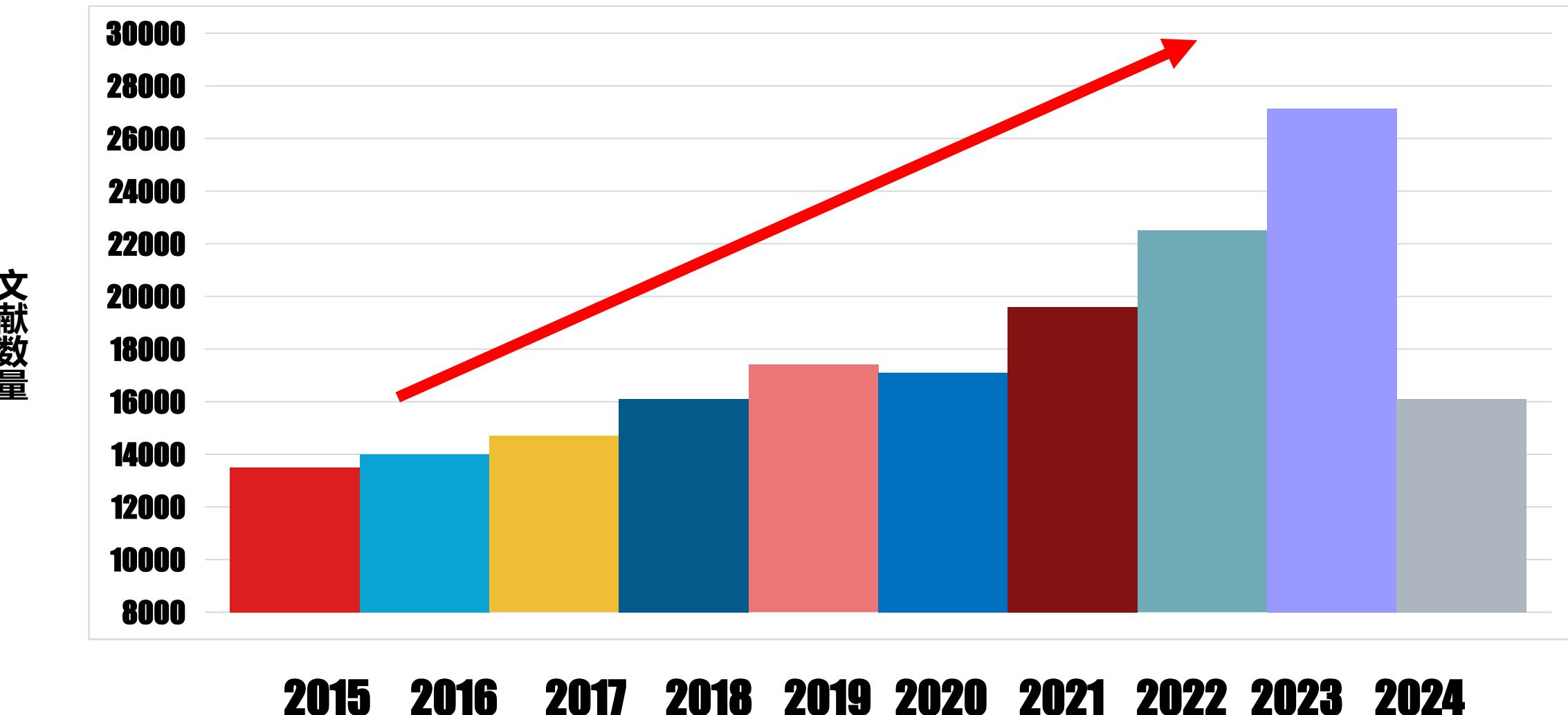
七、致谢

一、研究背景

- 淡水是人类赖以生存和发展的宝贵资源，具有诸多生态服务功能
- 我国淡水资源总量丰富，但人类活动造成淡水生态退化严重
- 淡水生态环境损害鉴定及定量化评估方法和技术欠缺
- 迫切需要建立淡水生态环境损害追责、赔偿法律、规范提供科技支撑



■ 淡水生态环境损害鉴定研究进展（近10年）



来 源: Google Scholar
关键词: Identification of freshwater damage

国内外主要研究机构或实验室

国家	单位	研究方向
中国	中国科学院生态环境研究中心 山东大学生态环境损害鉴定研究院 清华大学环境学院	森林和草原损害评估 生态环境损害司法鉴定 水质指纹预警溯源技术
	南京大学环境学院	污染物环境基准与环境风险评估
	中国科学院大学 生态环境部环境规划院	大气、水环境损害评估、微生物溯源等 标准制定等
.....
美国	University of South Florida Southern California Coastal Water Research Project Southern California Coastal Water Research Project University of California Davis University of South Florida	化学溯源 微生物溯源 微生物溯源 微生物溯源、化学溯源 微生物溯源
英国	University of Brighton	微生物溯源
新西兰	Environmental Science & Research	微生物溯源、化学溯源
西班牙	University of Barcelona	微生物溯源
日本	Hokkaido University	微生物溯源
澳大利亚	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	微生物溯源
奥地利	Vienna University of Technology	微生物溯源

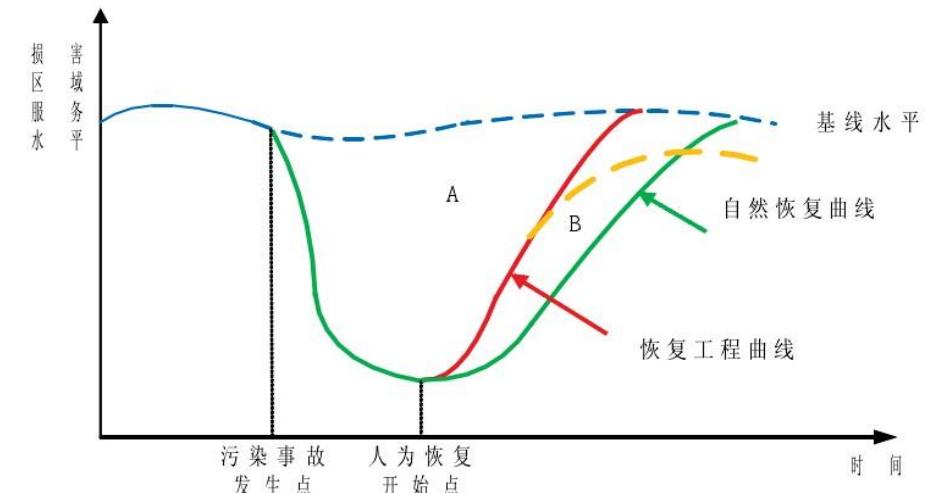
二、淡水生态环境基线判定技术研究进展

■ 淡水生态环境损害基线概念

- 基线是指：“突发环境事件发生前影响区域内人群健康、财产以及生态环境等的原有状态。”
(前环保部2014年印发的《突发环境事件应急处置阶段环境损害评估推荐方法》)

➤ 淡水生态环境基线：环境污染或生态破坏行为未发生时，淡水生态系统物理、化学或生物特性及其生态系统服务的状态或水平，代表了淡水生态环境损害发生前的生态系统状况。

- 基线确定是生态环境损害评估的重要基础。



■ 淡水基线损害判定应遵循的原则-6个原则

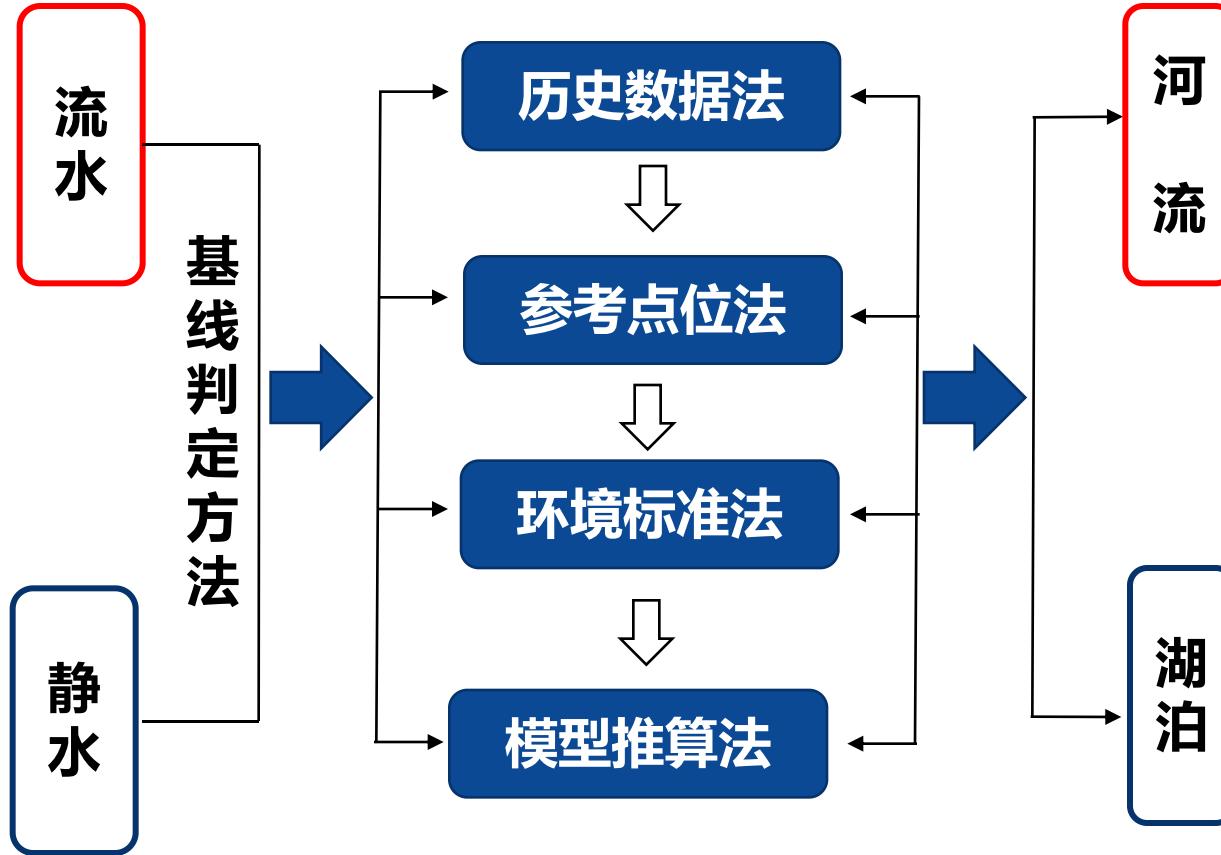
遵循原则	内涵
科学性	淡水生态环境基线的判定要科学、客观，判定过程中要排除损害事件以外的其他因素如自然环境背景时空变化、常规人类活动等对评估淡水生态系统的影响
准确性	采用规范化和标准化的现场调查、采集和测试方法，并严格遵循质量保证和质量控制要求，确保淡水基线数据的真实、准确性
可操作性	基线判定应考虑所拥有的人力、资金和后勤保障等条件，评估区域应具备一定的交通条件和工作条件，以便于野外调查工作的展开
及时性	应在生态环境损害事件发生后尽快开展基线判定工作，为后续生态环境损害程度鉴定评估提供数据证据
方法优选	根据淡水生态环境损害事件的特点以及资料信息，合理筛选基线判定方法，并注意多种方法的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

■ 淡水基线损害判定程序-5个步骤

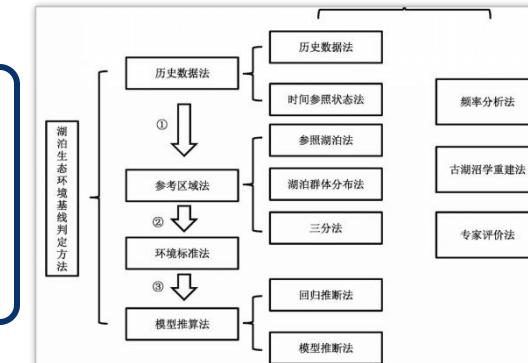


淡水生态环境基线判定程序

■ 淡水基线损害判定方法-4个方法



研究指标	研究方法	急性基线 (ug/L)		研究指标	研究方法	急性基线 (ug/L)	
		急性基线 (ug/L)	慢性基线 (ug/L)			急性基线 (ug/L)	慢性基线 (ug/L)
物种敏感度分布法	14.57-31.20	1.11-9.44	2	物种敏感度分布曲线法	286.2-1488.5	16.25-207.7	908
毒性百分位数排序法	9.1	5.63	2.4-DCP	EPA方法/急性毒性比率	19-25	3.8-6	15
生物效应对比	1.32			生态毒理模型	11.59	3.9	
生物配体模型	1.39	0.495		物种敏感度权重分布曲线法	13.21	1.2	
物种敏感度分布法	0.42-31.5	0.23-0.46		物种敏感度分布法	25	12	
评价因子法		0.15		生物多样性模型		4	
物种敏感度百分位数排序法	7.3	0.15		物种敏感度分布曲线法	403-439	80.6-87.8	
水效应对比法	1.36-3.61	0.02-1.59		物种敏感度分布法	0.38-355.7	0.005-7.55	
物种敏感度分布法	59.80-131	1.21-5.10					
生物多样性指数法							
物种敏感度分布法	48.43-102.33	20.01-25.03		物种敏感度分布法	54.1-205.90	510-1149	
毒性百分位数排序法	67.5-398.9	12.9-38		物种敏感度分布法		1039	
生物效应对比法	55.83			综合营养状态指数法		59.8-92.7	
物种敏感度分布法	22.84-56.43	10.35-25.48		US EPA方法	370-2450	68-1720	
物种敏感度分布曲线法	16.34-20.42	4.45-5.41					
物种敏感度分布法	23.97	14.63		自组织神经网络分析法		0.85-1.53	
毒性百分位数排序法	63.86	36		聚类分析法		0.057-1.83	
生物效应对比法	2.64	9		经验模型法		1.00	
澳大利亚水质基准	29.06			综合指数法		0.035-0.069	
				胁迫-响应关系模型		1.000	
				指示物种分析法(ITTAN)		0.382-1.298	
				指示物种值分析法(ITTAN)		0.016-0.065	



■ 如何判定淡水基线-优选顺序？

- 有历史背景值，优先使用历史数据法。
- 历史数据不满足时，若存在参照区域，则使用参考点位法。
- 若历史数据法和参考点位法均无法用于确定基线时，则可考虑用相关水环境保护标准值作为基线值。
- 若上述三种方法均不适用，则采用模型推算法确定基线水平。

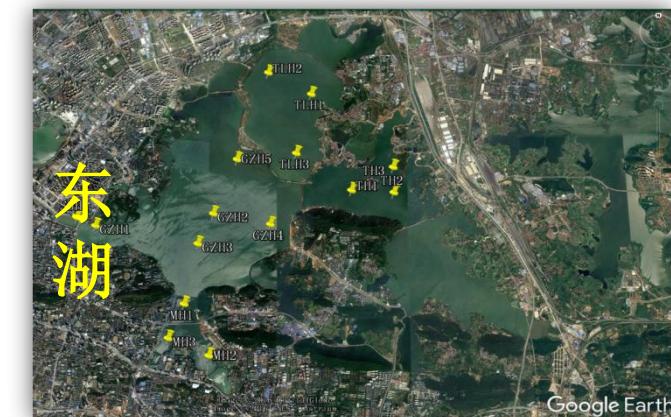
GB/T 39792. 2-2020

■ “历史数据法”和“参考点位法”研究进展

- 对比研究了历史数据确定湖泊基线的历史数据法和“参考湖泊”数据调研分析的统计学法；
- 结论：历史数据不满足要求，致使无法使用历史数据法进行基线判定时，参考点位法可作为判定评估湖泊生态环境基线的重要方法

湖泊名称	判定方法	TP (mg/L)	TN (mg/L)	Chla (μg/L)	SD (m)
东湖	历史数据法	0.021~0.040	0.61~0.87	3.72~9.45	1.97~0.87
	三分法	0.033	0.77	7.86	1.11
梁子湖	历史数据法	0.005~0.014	0.48~0.64	0.80~1.61	2.48~1.18
	三分法	0.010	0.55	1.19	1.70

武汉梁子湖和东湖：采集湖泊表层0.5 m处水样。



湖泊科学, 2019. 31(05):1310-1319

■ “环境标准法”研究进展

➤ 系统收集、梳理了72项与淡水生态环境保护相关的国家及行业标准

水环境质量标准：

- GB 11607 渔业水质标准
- GB 5084 农田灌溉水质标准
- GB 3838 地表水环境质量标准
- GB/T 14848 地下水质量标准

水污染物排放标准：

- GB 3552 船舶水污染物排放控制标准
- GB 31570 石油炼制工业污染物排放标准
- GB 31574 再生铜、铝、铅、锌工业污染物排放标准
- GB 31572 合成树脂工业污染物排放标准
- GB 31573 无机化学工业污染物排放标准
- GB 30484 电池工业污染物排放标准
- GB 15580 磷肥工业水污染物排放标准
- GB 26132 硫酸工业污染物排放标准
- GB 26451 稀土工业污染物排放标准
- GB 26131 硝酸工业污染物排放标准
- GB 28937 毛纺工业水污染物排放标准
- GB 28936 缫丝工业水污染物排放标准
- GB 4287 纺织染整工业水污染物排放标准
- GB 16171 炼焦化学工业污染物排放标准
- GB 28666 铁合金工业污染物排放标准
- GB 28661 铁矿采选工业污染物排放标准
- GB 27632 橡胶制品工业污染物排放标准
- GB 27631 发酵酒精和白酒工业水污染物排放标准

...

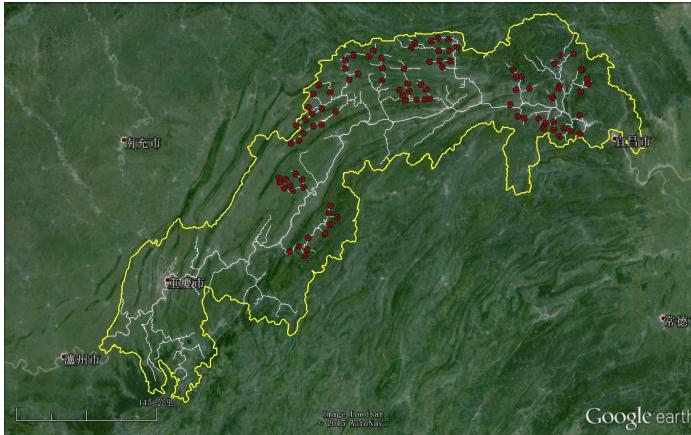
■ “模型推算法”研究进展

- 共检索到文献115篇，其中中文83篇，英文32篇。应用25种方法对96项指标进行了基线研究，归纳总结了基于不同受体的淡水模型推算法。

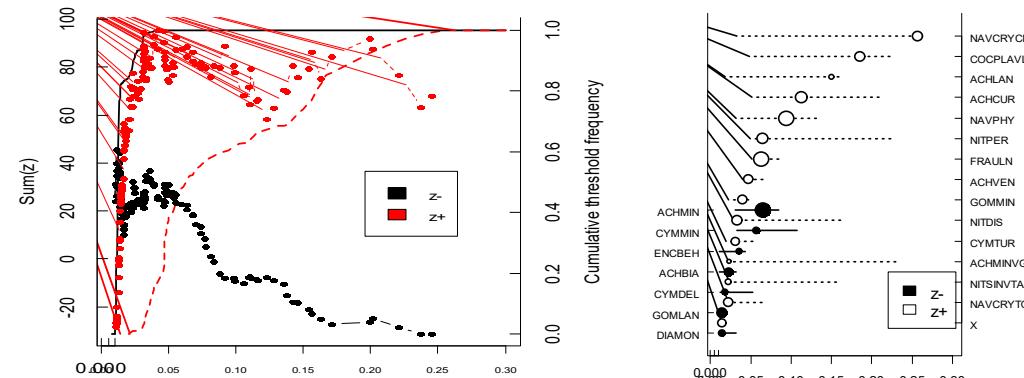
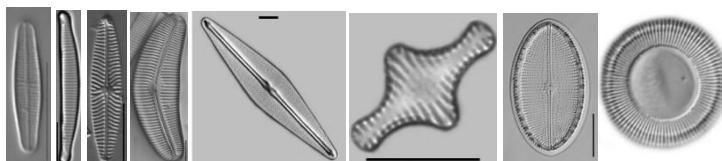
受体类型		常用基线判定方法
非生物受体	物理环境、水质、沉积物	物种敏感度分布曲线法
生物受体	种群	生态毒理模型法 高斯模型
	群落	评价因子法 物种敏感度分布法 毒性百分数排序法 投入响应关系法 局部加权回归散点修匀法 临界指示物种分析法 非参数突变点分析法 水效应比值法 生物毒性效应比技术
生态系统		综合指数法 频数分布法 权重法

■ “模型推算法”河流研究案例

➤ 提出了基于硅藻群落尺度的分参数突变点模型河流基线分析法



- 采集三峡库区23条支流共149个样点的附石硅藻；
- 运用频度分布统计、非参数突变点分析、指示种阈值分析等方法探讨藻类多样性、生物量、群落组成等参数的生态环境阈值。



分析方法	参数	TP阈值 (mg/L)
nCPA	藻类叶绿素a	0.024
nCPA	硅藻物种丰富度	0.023
nCPA	硅藻香农-威纳指数	0.022
nCPA	高位群相对丰富度	0.031
nCPA	低位群相对丰富度	0.044
nCPA	运动群相对丰富度	0.022
nCPA	贫营养物种相对丰富度	0.022
nCPA	富营养物种相对丰富度	0.057
nCPA	硅藻群落组成	0.013
TITAN	负响应物种	0.012
TITAN	正响应物种	0.041

三、淡水生态环境污染溯源技术研究进展

- 针对致使淡水生态系统受损的主要/关键污染物，进行生物、物化、模型溯源技术方法研究；
- 从特异性、时效性、可操作性、经济性等方面进行溯源技术比选分析；
- 总结了生态环境损害溯源流程和技术体系。

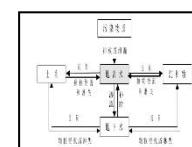
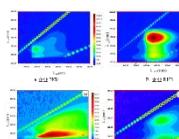
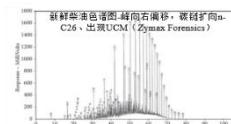
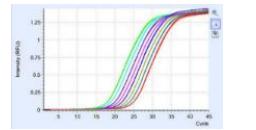
■ 溯源技术方法主要研究进展-三个方面

溯源技术

微生物溯源技术：梳理了现有文献中的**77**种人和动物粪源标记物，通过实验最终筛选出适用于我国使用的**5**种微生物溯源标记物。

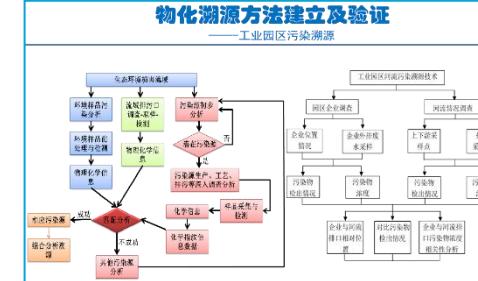
物化溯源技术：梳理了重点行业可能产生的有毒有害污染物；比较了现有淡水物化溯源技术方法；建立了系统化的物化溯源方法并对其进行验证。

模型溯源技术：总结了淡水环境污染溯源模型分类方法；梳理了常用的水环境模型。



$$J = \min \sum_i^m \| \mathbf{c}(\mathbf{x}_i, t_j) - \tilde{\mathbf{c}}(\mathbf{x}_i, t_j) \|$$

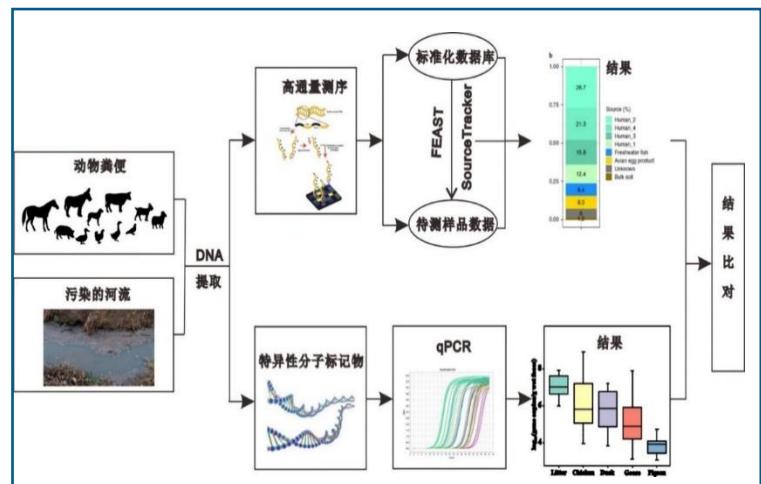
通用性标记物：BacUni
人粪源标记物：BacH
猪粪源标记物：Pig-2-Bac
鸡粪源标记物：Ckmito
禽粪源标记物：AV4143



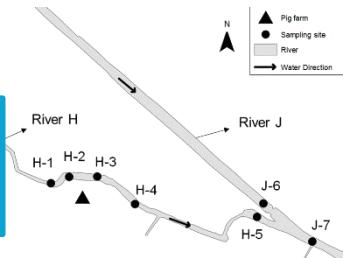
淡水环境污染物溯源模型分类	
分类	方法
	直接求解法 正则变换法 高斯-牛顿法、单纯形法、共轭梯度法、Hooke-Jeeves (HJ) 法 遗传优化法 遗传算法、微分进化方法、粒子智能优化法 群优化算法
确定性方法	在观测数据无误差条件下，方法解过程复杂，只适用于研究条件简单的情况 计算简单，只能给出追踪溯源的“点估计”，即一组最优化，无法提供更多有关污染事件追踪溯源的信息
概率方法 最小二乘法 (MRE) 贝叶斯方法、广义热不稳定性分析 同时拟推法	适用于数据有误差的情形下的水污染追踪研究 有数据应急处置 能够处理大量数据作不确定性估计(GLUE)、蒙特卡洛法 (MC)、马尔科夫链蒙特卡洛 (MCMC)
伴随状态法	只需运行少量的污染物质模型，从而避免计算负值问题；计算效率高。

■ “微生物溯源”技术方法进展

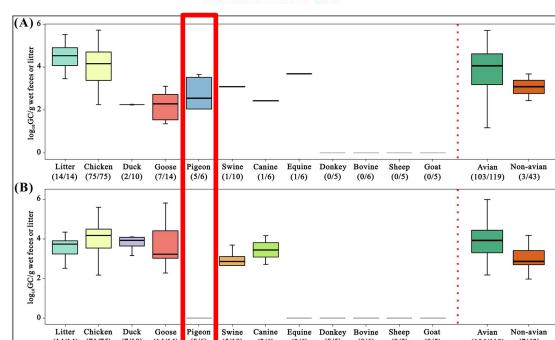
➤ 获得了适用我国的多源和单源畜禽粪污的微生物溯源标记物



微生物溯源技术用于河流污染评价的研究



治理后，
粪便污染
量明显下
降



在我国5个区域共采集148
份动物粪便样品

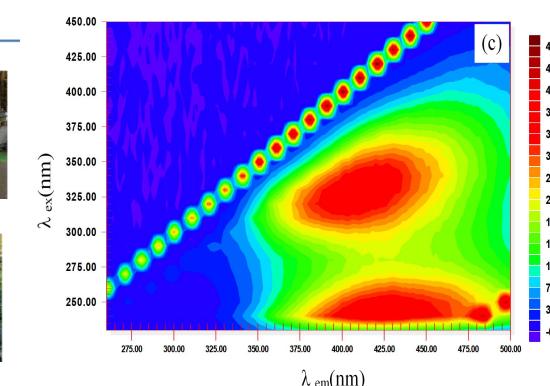
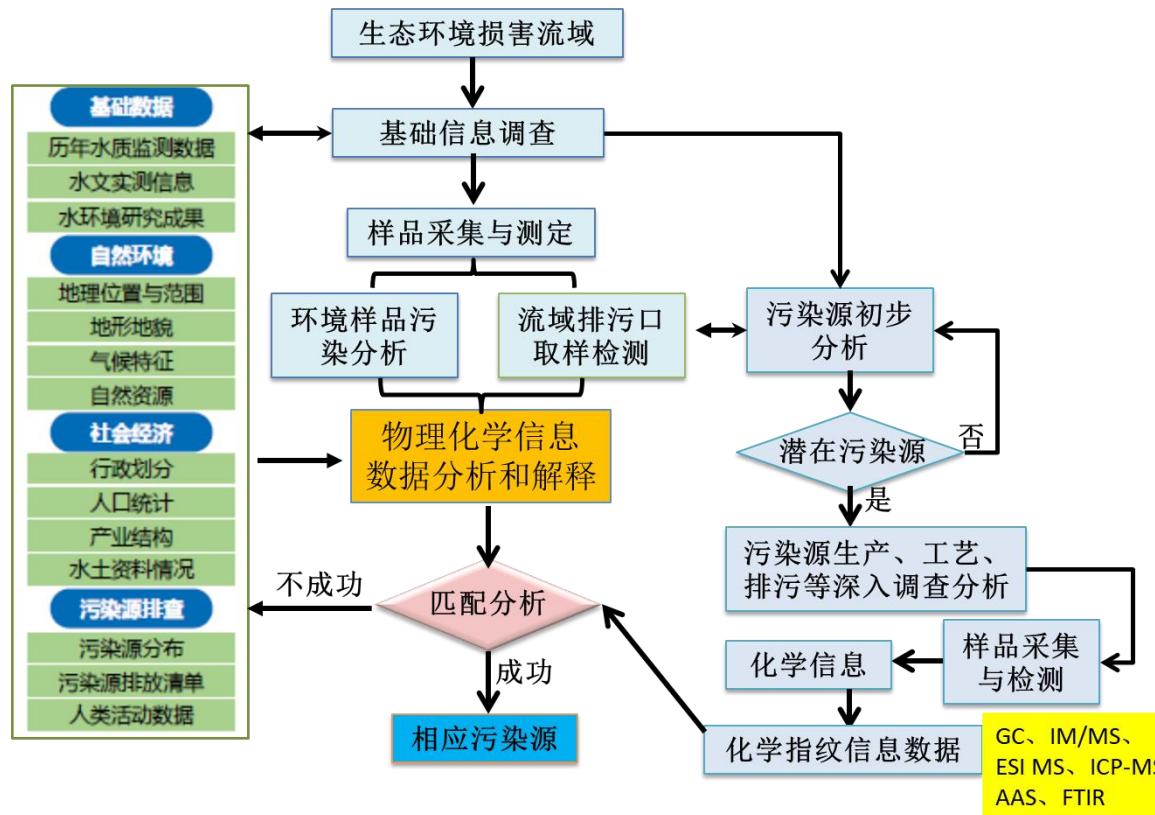
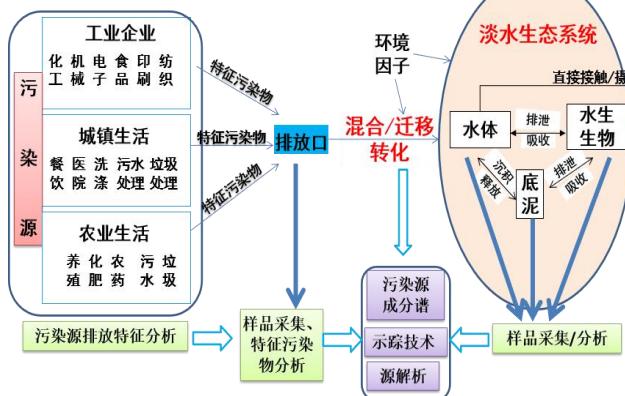
筛选出适
合我国使
用的人、
猪、鸡和
禽类粪源
污染标记
物

➤ 对各种物化溯源技术方法进行了比选

分类	方法	优点	缺点	应用
污染源排查法	基于流域断面水质监测与污染源清单	对流域进行全面调查分析	需要大量污染源数据资料	流域氮、磷、氨等非点源污染源解析, 不针对突发污染
	现场快速检测技术, 结合传统化学监测(GC-MS、HPLC和HPLC-MS、荧光光谱法)	准确反映水环境质量和污染程度	针对不同污染物所采用的监测方法和手段有很大差异	适合准确分析多种污染物来源
	污染化学指纹溯源技术	对水文和监测数据要求相对不高	大量监测数据, 污染源指纹库建立不完善	适合各种化合物混合组成的复杂污染物
成分比例分析法	基于一定监测数据, 进行主成分/因子分析法、化学质量平衡模型(CMB)、源解析受体模型(IDNN)分析	国际认可度较高, 对水文参数的需要较少	对监测断面和监测数据有要求, 并要求各污染源间互不相关; 定性研究方法, 与其他方法结合应用, 工作量大。	初步污染类型判断, 分析水体和沉积物中PAHs、某些重金属来源
特殊监测溯源	基于污染源释放特征分析的水化学特征污染物溯源技术	针对性强	需建立行业污染物特征谱	工业废水等化学特征显著的污染源
	同位素法示踪分析技术	结果准确	对样品要求较高, 前处理复杂	水体阴离子、部分有机物、重金属
	三维荧光光谱分析技术	灵敏度高, 选择性好, 不破坏样品结构	测物质有限制, 环境因素对荧光强度有影响	有机腐殖质, 富含多环芳烃类物质, 溶解性有机物
其他方法	树木年轮化学技术	历史溯源	对监测技术、设备技能要求高, 结果相对粗略	适于特殊污染物、特定水体
	空间影像分析技术	历史溯源	无法独立给出污染物的确切来源	

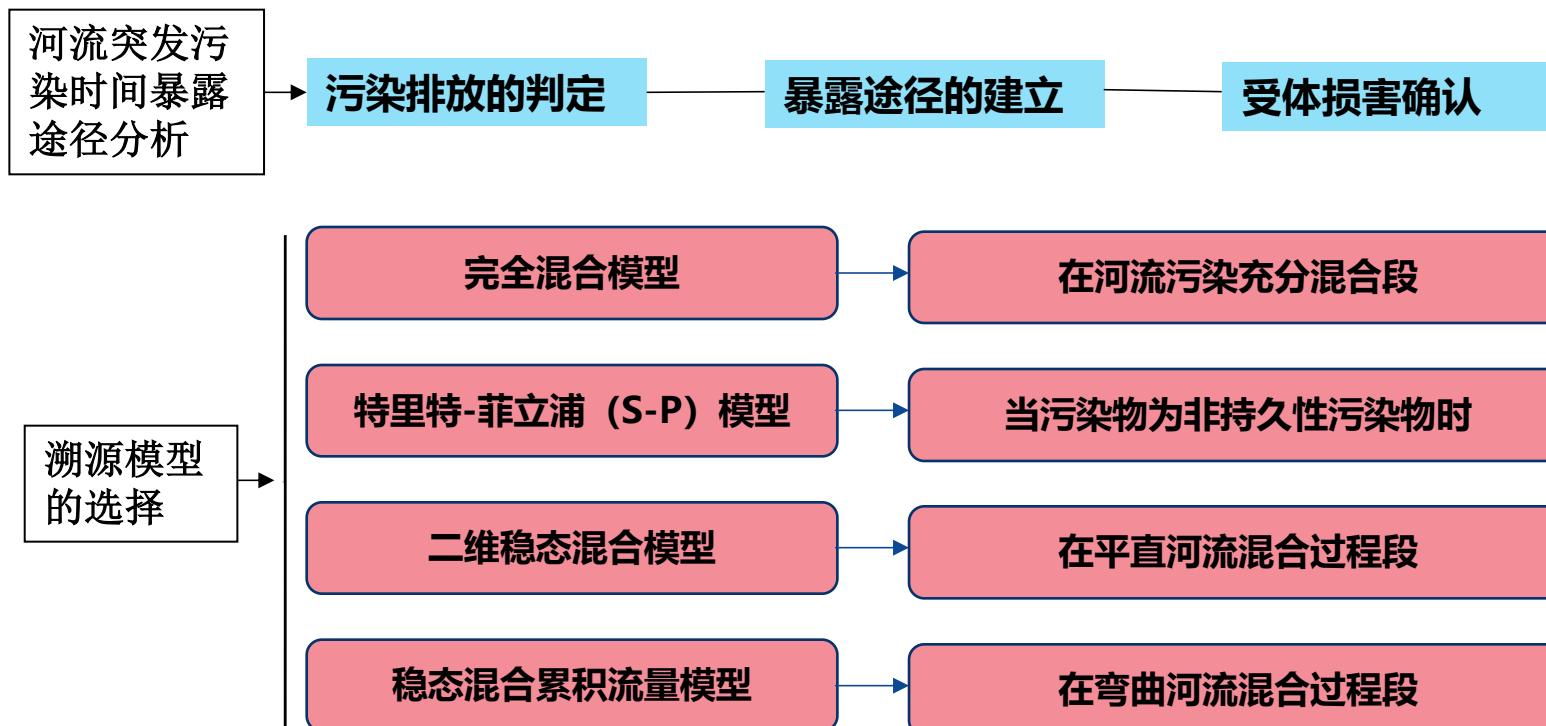
■ “物化溯源”技术研究进展

➤ 提出了物化溯源业务化流程



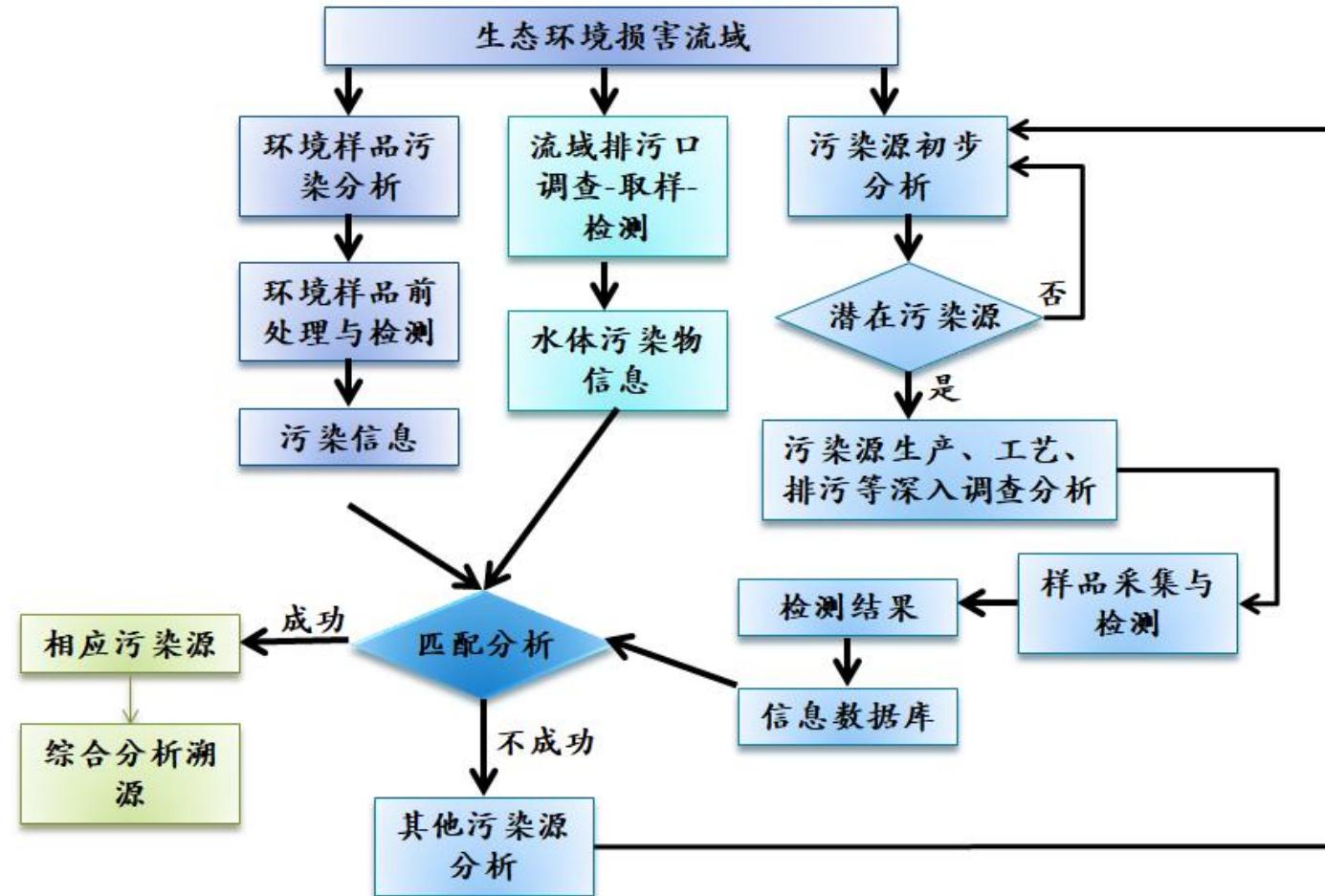
■ “模型溯源”技术研究进展

- 确定了损害源项与淡水生态系统损害之间的因果关系，形成了相应的因果关系判定的模型溯源标准化调查、取证、鉴定技术方法体系



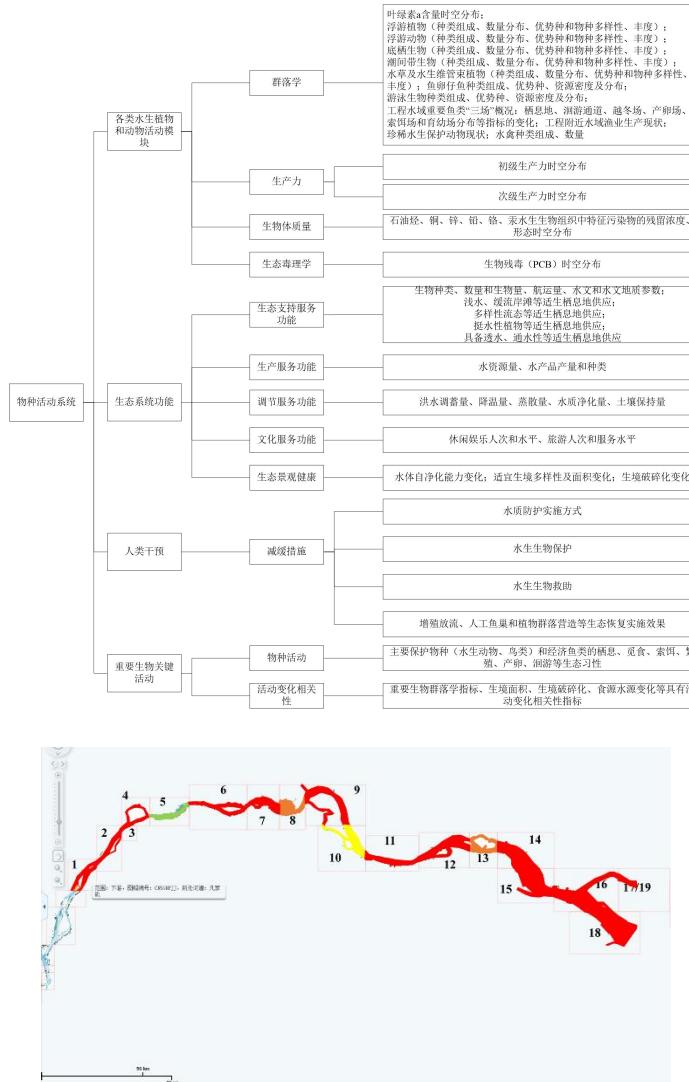
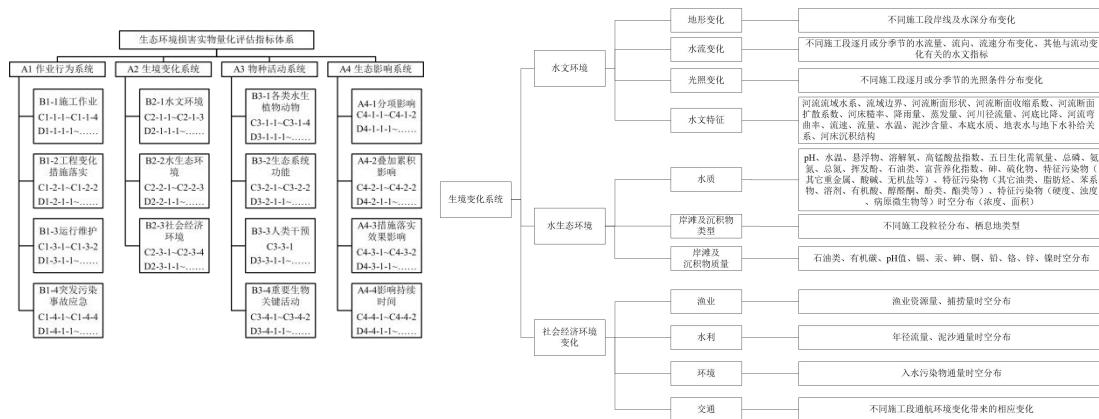
■ 溯源技术业务化流程体系小结

➤ 总结形成了综合溯源业务化流程体系



四、淡水生态环境损害程度量化技术研究进展

- 开展了国内外水环境监测、损害量化评估技术研究进展调查；
 - 构建多层次量化指标体系；
 - **实物量化**：筛选特征污染物及生物、生态等指标，确定实物量化方法；时间、空间范围上综合评判损害程度分级；
 - **价值量化**：开展环境损害恢复与价值量化研究。



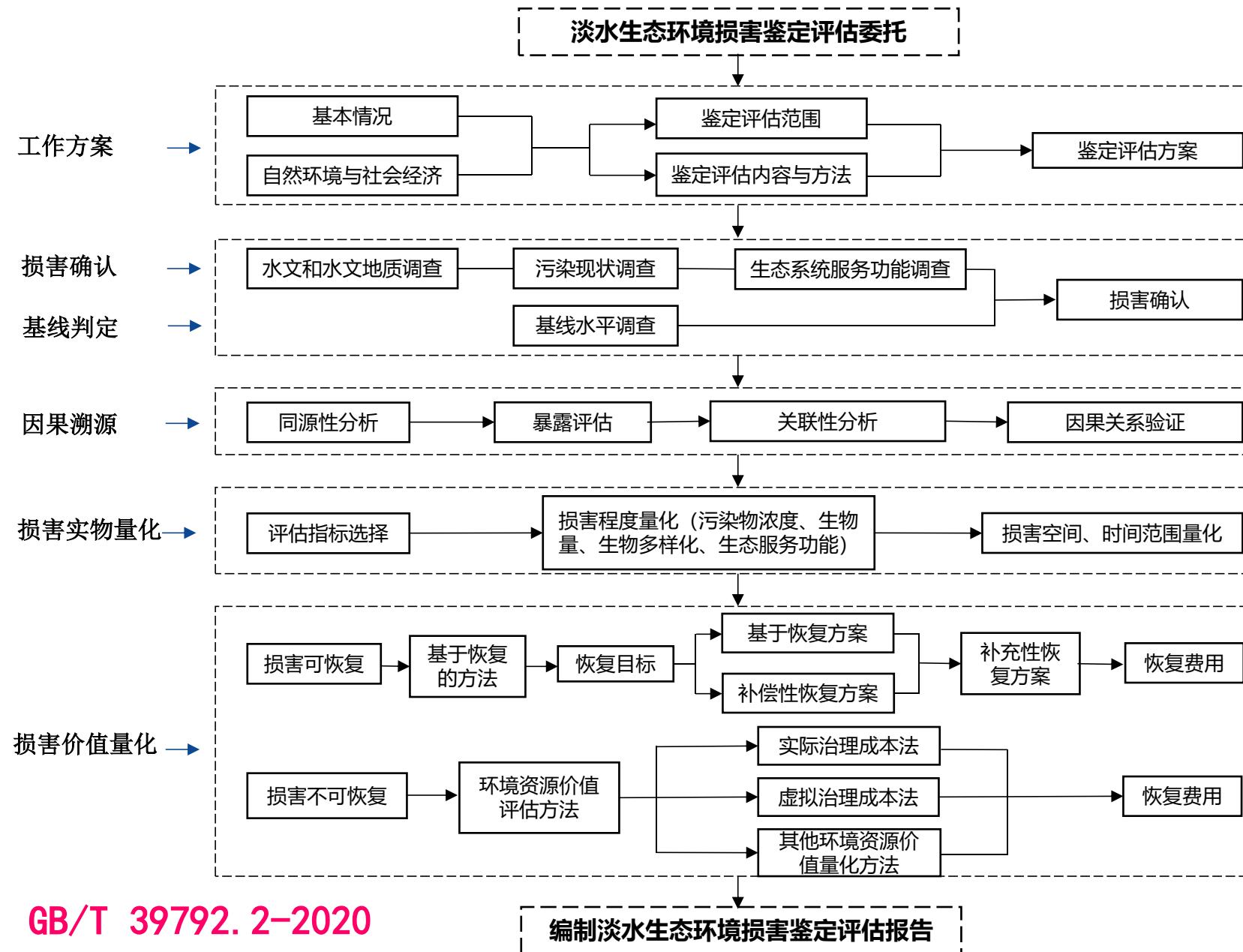
■ 构建了淡水生态环境损害评估模型平台



- 该平台集成了“基线判定”、“污染溯源”和“损害程度量化”模板，可实现损害评估的标准化、流程化评估

淡水生态环境损害鉴定评估系统 V1.0
登记号：2021SR0902840

■ 淡水生态环境损害评估业务化流程体系如下：



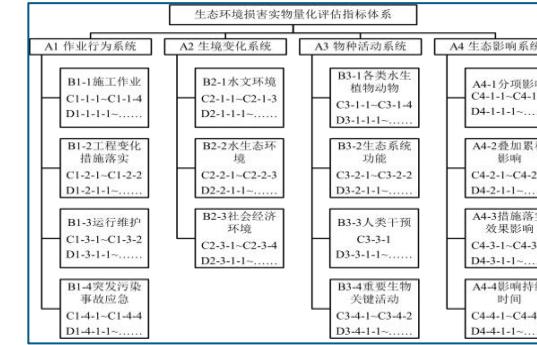
五、适证应用研究-以长江下游航道整治工程为例

实证应用研究

实物量化评估模型技术应用：以航道工程全生命周期为例开展量化指标体系构建；根据水环境事件的类型与特点，筛选特征污染物及生物、生态等指标，确定量化方法。

损害程度判定模型技术应用：对长江危险化学品的风险程度进行实证应用研究；试制缩比仿真试验装置，可为实物量化、价值量化提供中尺度-大尺度验证。

价值量化技术应用研究：对长江航道工程开展实证研究，通过环境损害量化在国内司法实践中的应用分析，提出了基于等值原则，编制并比选生态环境恢复方案，量化环境及服务功能的损失的方法。



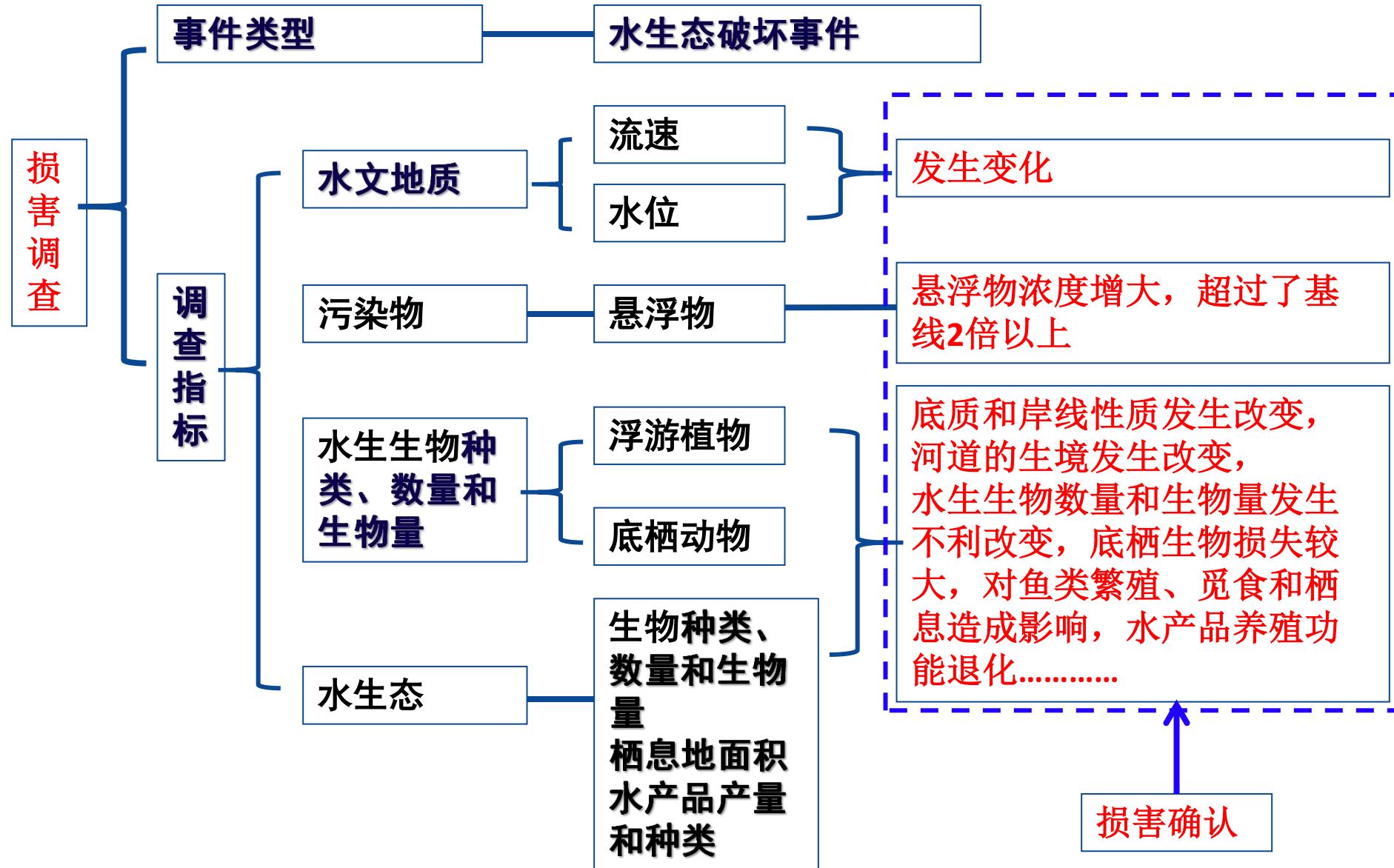
提出了何种具体情形下应使用何种价值量化方法，以成果应用的形式将损害鉴定评估全过程（基线-溯源-量化）予以展示

➤ 实证研究-基线判定

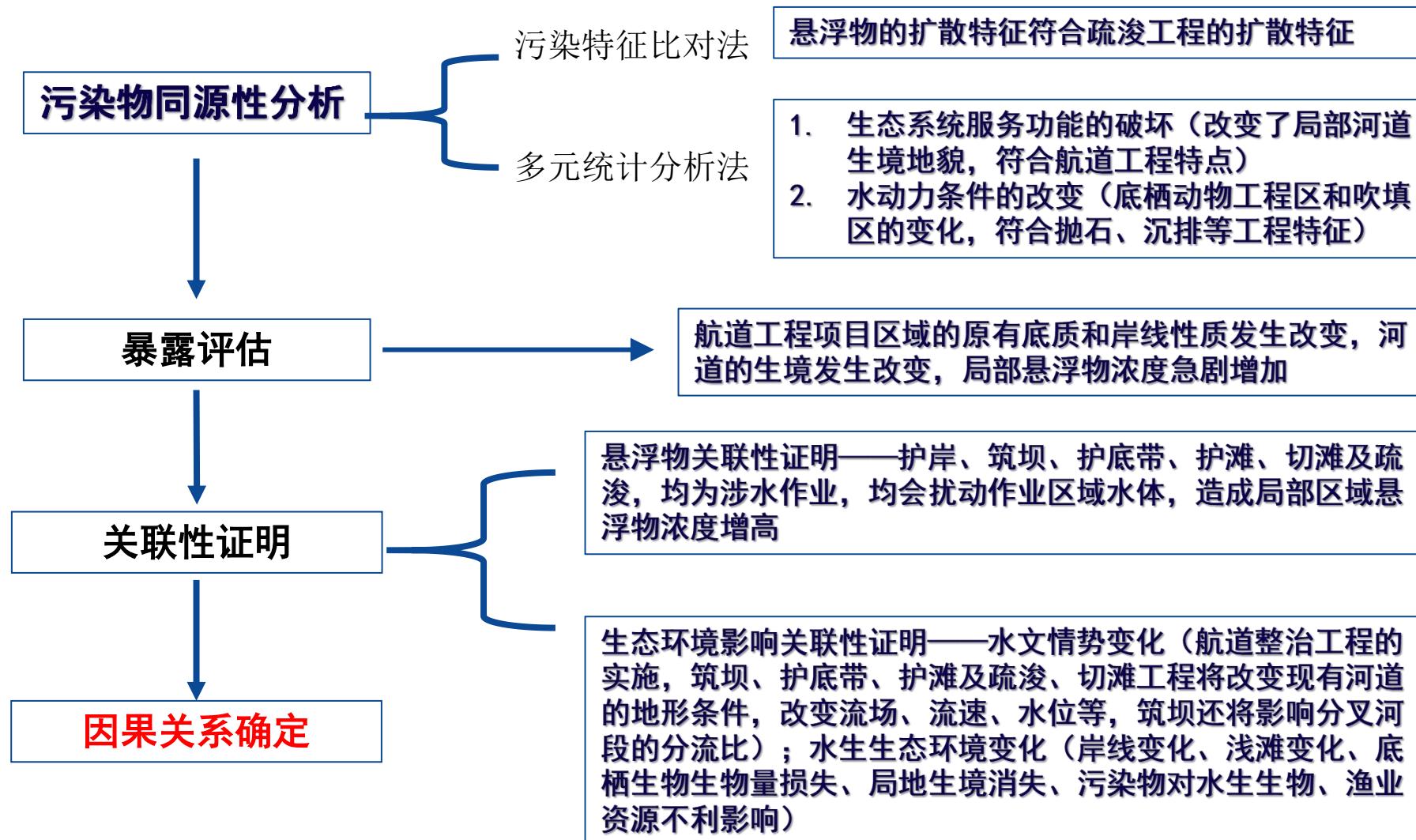
确定对象	基线确定方法	参考资料
水环境	环境标准法	《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)
悬浮物	环境标准法	《地表水资源质量标准》(SL 63-94)
底泥	环境标准法	《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)
浮游生物	历史数据法	仪征水道、和畅洲水道、口岸直水道和福姜沙水道的历史数据
底栖动物	历史数据法	仪征水道、和畅洲水道、口岸直水道和福姜沙水道的历史数据
鱼类	历史数据法	近10年的调查结果显示工程河段共有鱼类109种，隶属于13目24科，其中鲤形目物种最多，占鱼类总物种数的58.72%；其次是鲈形目物种，占17.43%。但近年白鲟和拟尖头红鲌未被发现
鱼卵仔鱼	历史数据法	2011年到两次调查未在工程河段采集到鱼卵，仅2011年5月有采集到仔鱼，各水道密度变动范围在0.65-0.89尾/m ³ ，各水道采集到仔鱼的主要种类稍不同
渔获物	历史数据法	工程水域历史上分布有刀鲚、鲥鱼、凤尾鱼、河鲀、鮰鱼、鳗鱼、中华绒螯蟹等重要经济动物。近年来，资源量大幅下降，有些已难见踪影。2011年1月、5月和2013年1-8月、2014年2-7月对工程区进行了渔获物现状调查

*该工程施工采用了生态修复技术，在本次损害鉴定评估过程中，暂不考虑其修复效果，因此本次损害量化数据不代表该工程施工期最终实际造成的损害。

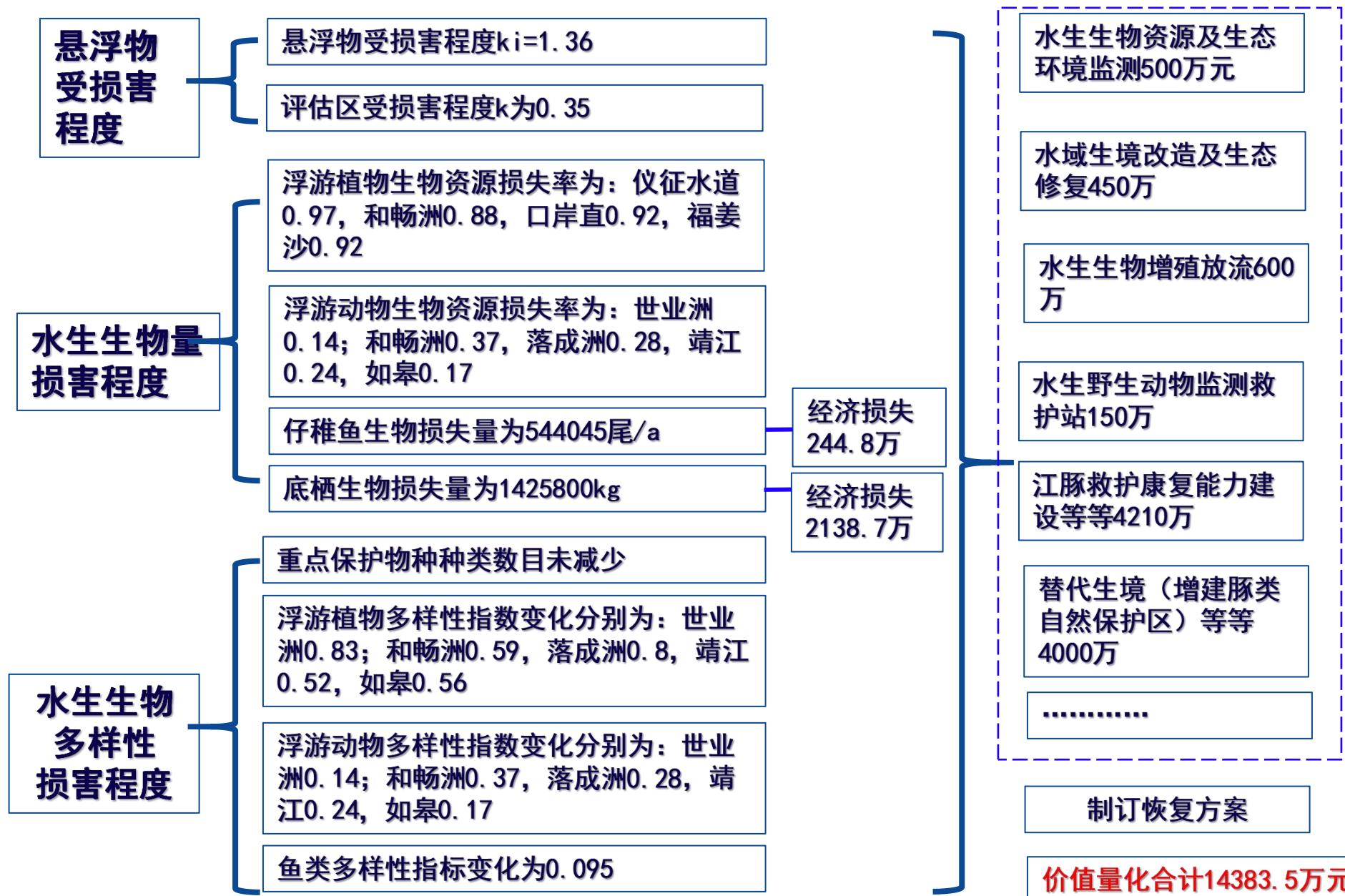
➤ 实证研究-损害调查



➤实证研究-因果关系溯源分析



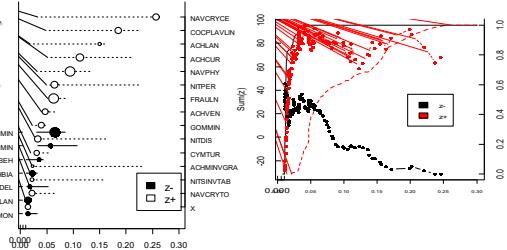
➤ 实证研究-损害实物量化和价值量化



六、总结与展望

损害基线判定

基线判定方法适用性评价 氮磷营养盐基线水平判定



淡水生态环境损害鉴定 APP集成应用平台

通用性标记物: BacUni
人粪源标记物: BacH
猪粪源标记物: Pig-2-Bac
鸡粪源标记物: Ckmito
禽粪源标记物: AV4143

微生物溯源

物化溯源

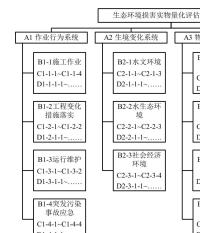
模型溯源

损害因果关系溯源

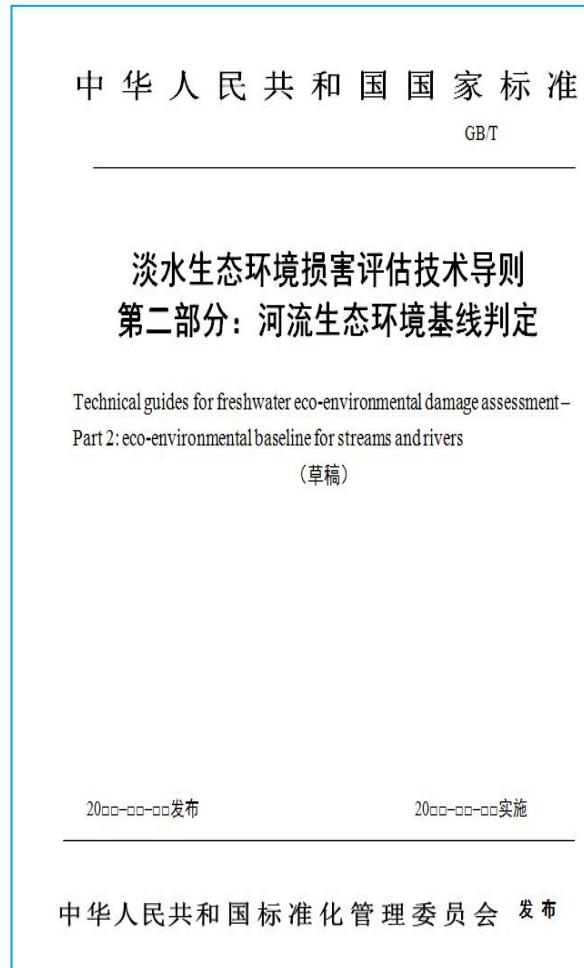
溯源方法构建、优化、 标准化、与体系集成

损害程度量化与实证

模糊数学综合评判损害程度 分级多层次指标体系构建



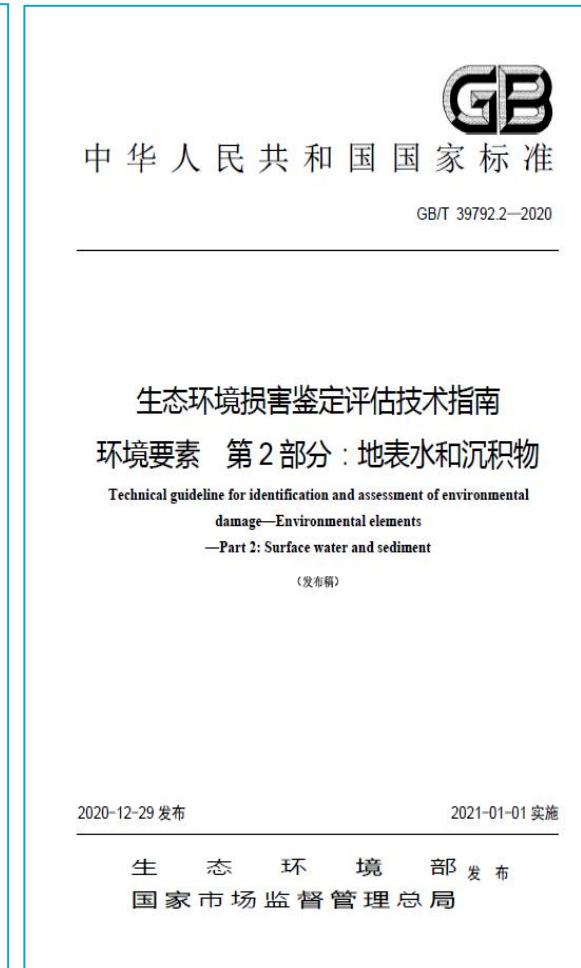
■ 成果一：形成了淡水生态环境损害基线鉴定标准化、业务化规范



河流基线判定导则

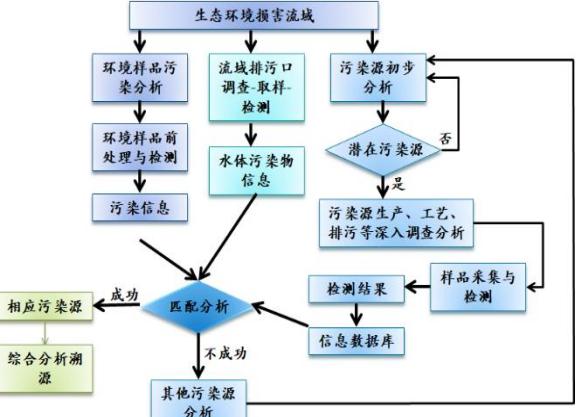


湖泊基线判定导则



损害鉴定指南（国标发布）

■ 成果二：完善了淡水生态环境损害因果关系溯源技术方法体系



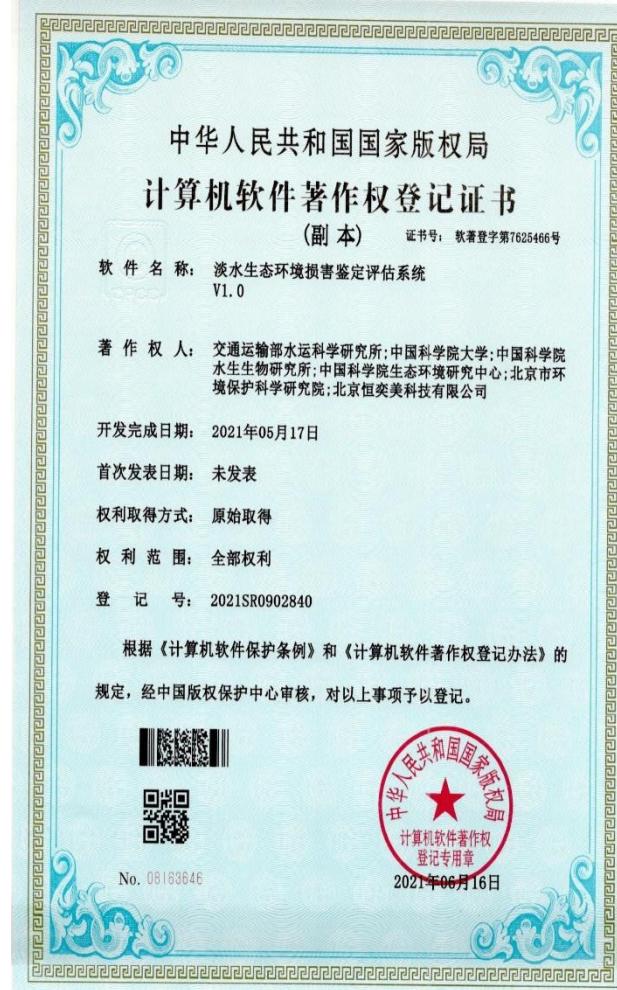
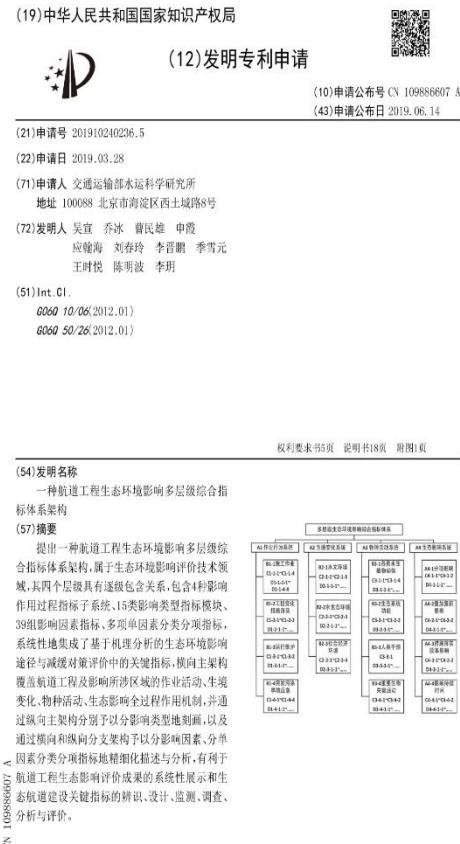
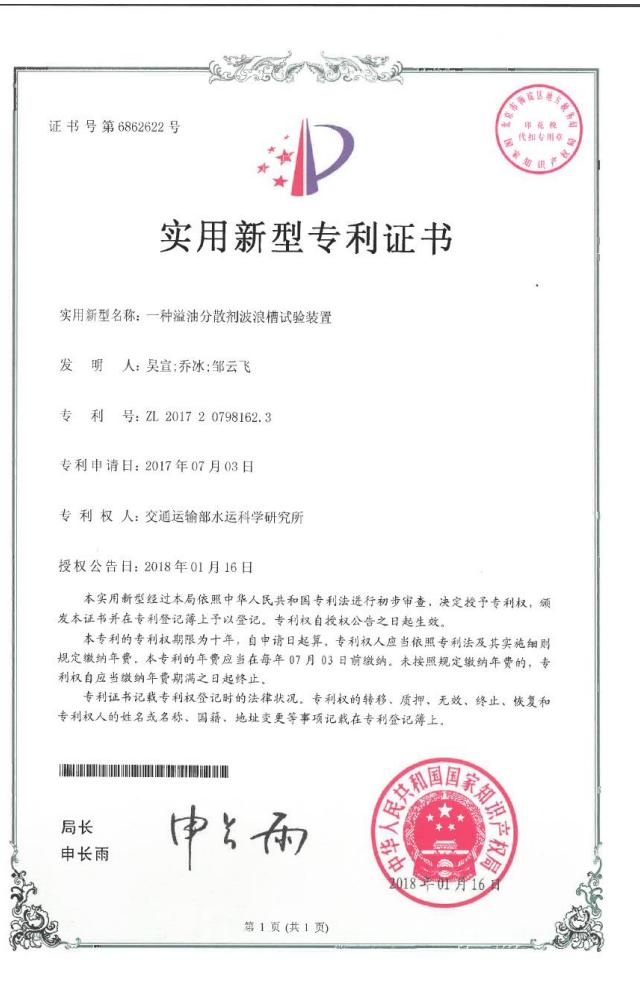
微生物溯源技术

物化溯源技术

模型溯源技术



■ 成果三：构建了淡水生态环境损害多层次综合指标评价体系模型



损害模拟装置

评价体系构建

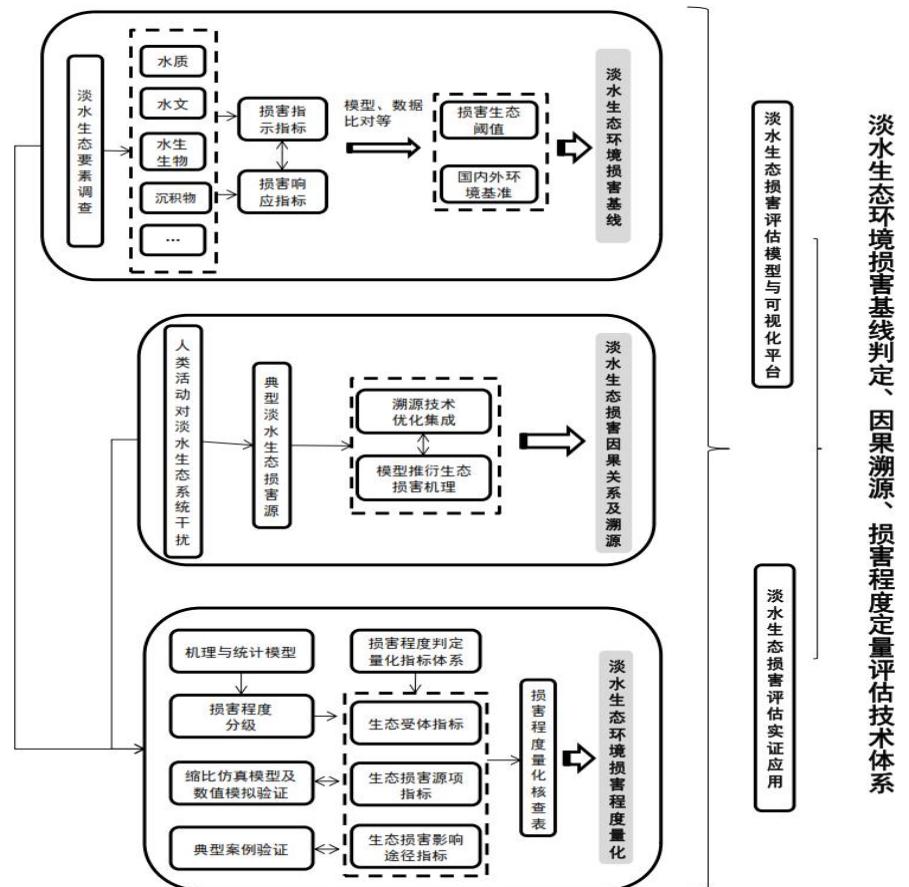
APP量化平台

■ 成果四：集成了数据库模块，实现了淡水生态环境损害鉴定APP平台应用

**淡水生态环境损害鉴定
APP集成应用平台
(价值量化合计14383.5万元)**

基线判定模块 → **因果溯源模块** → **量化模块** → **赔偿核算模块**

七、感谢重点研发计划项目的支持



课题编号: 2016YFC0503601

密 级: 公开

国家重点研发计划 课题任务书

课题名称: 淡水生态环境损害基线、因果关系及损害程度的判定技术方法

所属项目: 生态环境损害鉴定评估业务化技术研究

所属专项: 典型脆弱生态修复与保护研究

项目牵头承担单位: 中国科学院大学

课题承担单位: 中国科学院大学

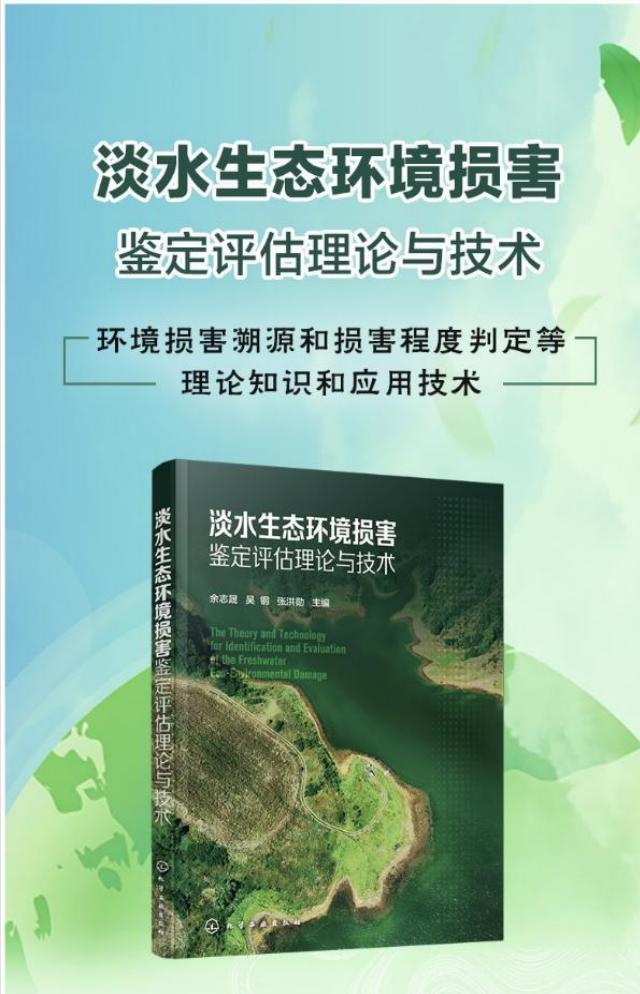
课题负责人: 余志最

执行期限: 2016年07月 至 2020年12月

中华人民共和国科学技术部制

2016年07月22日

感谢国家重点研发计划课题（2016YFC0503601）和项目（2016YFC0503600）的支持



京东: <https://item.jd.com/10054875332252.html>

淘宝: <https://m.tb.cn/h.fEGd0ym?tk=jw9X2oWJmMC>

A photograph of a lush green forest with a flowing stream. The stream flows over several large, mossy rocks, creating white, foaming water. The surrounding trees and bushes are dense and green. In the center of the image, the word "谢谢!" (Thank you!) is written in large, bold, red Chinese characters.

谢谢!