

# 美国流域生态健康评价体系的发展和实践\*

张 华\*\* 骆永明

(中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003)

**摘 要** 为了达到《清洁水法》规定的水质目标,美国环境部门在过去 20 多年的实践中逐步发展形成了涵盖整个流域,包括水文、化学、生物等多重指标在内的全国性流域综合生态健康评价体系.该体系已经成为美国流域水质管理系统的重要组成部分,为水环境保护和水生生态系统恢复提供了有力支持.本文从法律行政框架、生态功能分析、生态健康指标、综合评价体系和流域监测系统等方面系统总结了美国环境管理部门,特别是联邦环境保护局在流域生态健康评价方面的发展和实践;并介绍了美国水生资源调查采用的河流、湖泊、河口、海湾、湿地流域健康评价系统.在此基础上,根据我国水环境保护和治理的实际情况,提出了建立流域生态健康科学评价和决策支持体系建议.

**关键词** 流域 水质 生态健康评价 环境保护

**文章编号** 1001-9332(2013)07-2063-10 **中图分类号** S152.7, S512.1 **文献标识码** A

**Assessment system for watershed ecological health in the United States: Development and application.** ZHANG Hua, LUO Yong-ming (*Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(7): 2063-2072.

**Abstract:** To meet the water quality goals of the Clean Water Act, the environmental agencies in the United States (U. S.) have developed a comprehensive ecological assessment system of watershed health in the last two decades. The system employs a watershed approach, and includes a large set of hydrological, chemical, and biological indices, having become an essential part of the watershed water quality management system in the U. S. and provided strong support for the protection of water environment and the restoration of aquatic system. In this paper, the development and application of the ecological assessment system of watershed health by the U. S. environmental regulators, especially the U. S. Environmental Protection Agency (US EPA), were overviewed from the aspects of related laws and regulations, ecosystem function analysis, ecological health indicators, comprehensive assessment system, and monitoring and data management systems, and the health assessment systems for the rivers, lakes, estuaries, coasts, and wetlands adopted by the National Aquatic Resource Surveys (NARS) were introduced. Some suggestions for the future development of the scientific ecological assessment system of watershed health in China were put forward based on the understanding of the protection and remediation practices of our water environment.

**Key words:** watershed; water quality; ecological health assessment; environment protection.

伴随着工业化和城市化进程,我国大量河流、湖泊、海湾等水体正经受着不同程度的干扰和破坏,造成水质恶化以及生态功能退化甚至丧失<sup>[1]</sup>.国际上近几十年来水环境保护和治理的实践表明,水体健康取决于整个流域范围内的社会经济和自然生态状况,基于流域的管理方法才是解决水环境问题的有

效途径<sup>[1-4]</sup>.传统上根据单一目标评价和管理水质的方法已经不能够解决实践中遇到的复杂环境问题,亟需综合物理、化学、生物手段进行全面的生态分析,在生态评价的基础上制定保护和治理措施<sup>[5-8]</sup>.因此,从生态健康角度对流域水环境进行综合评价,已经成为环境保护和生态治理科学决策的迫切需要.

作为一个复杂的生态系统,流域中可能存在各种类型的生态胁迫因素,这些胁迫因素造成的生态

\* 国家自然科学基金项目(41271506)和青年千人计划项目资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: hzhang@yic.ac.cn

2012-10-15 收稿,2013-04-30 接受.

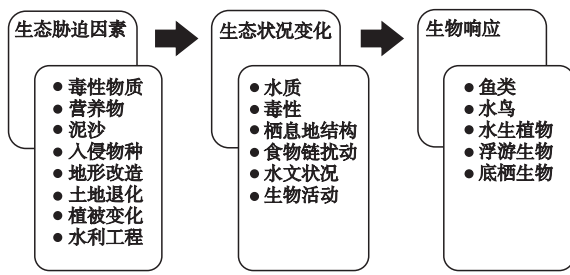


图1 流域内生态胁迫因子、生态状况和生物群落之间的关系

Fig. 1 Relationship between ecological stressors, ecosystem condition, and biological communities in a watershed.

干扰会导致流域内水体水文、化学、栖息地状况发生改变,进而导致河流、湖泊、海湾及湿地的生物群落状况变化(图1)。在流域生态健康评价中,需要充分掌握各种胁迫因素及其来源,将对环境状况反映最灵敏的生物群落作为最终标准,并根据生物群落对环境条件的响应关系,分析环境生态功能存在的障碍以及造成障碍的主要胁迫因素<sup>[9]</sup>。

在流域生态健康评价方面,我国目前仍然处在起步和探索阶段<sup>[1,5-6]</sup>。经过20多年的积累,美国已经在实践中逐步建立了涵盖整个流域、包含全面的生态健康评价指标、针对水体特定生态功能的流域健康评价体系,并将其纳入了水质管理的法律和行政框架中,为水质改善和生态恢复提供了有力支持。为此,本文综述了美国流域生态健康体系的发展和实践,以为未来建立适合我国环境保护和治理需要的相应管理体系提供参考。

## 1 基于流域生态健康的水质管理体系

### 1.1 法律行政框架

美国目前的水环境保护治理法规行政体系主要是基于1977年通过的《清洁水法》,该联邦法律提出了“恢复和保持全国水体的化学、物理和生物完整性”的水质目标。与流域生态健康评价直接相关的是该法律的305(b)和303(d)条款,305(b)条款规定地方政府(州、保留地、海外领)环保部门负责每两年对本州河流、湖泊、海湾、湿地等水体进行水质和功能评价,向国会报告本区水质情况,形成所谓的国家水质清单报告(national water quality inventory report);303(d)条款要求地方政府建立水质不达标的受损水体清单(list of impaired waters),对清单上的水体建立日最大负荷(total maximum daily load, TMDL)这一流域尺度上的总量控制规划<sup>[10]</sup>。联邦环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)作为负责机构,于1985年制定了

联邦法规第40条130条款(40 CFR Part 130)并随后进行多次修改,该条款对《清洁水法》相关条款进行细化,形成了联邦行政体系中主要的水质规划和管理规定。值得注意的是,该条款明确规定生物监测评价作为水质监测的组成部分,并要求污染排放对水生生态系统不能存在明显不利影响。该系列相互关联的法律法规构成了联邦层面上流域生态健康评价的实施基础<sup>[11]</sup>。

### 1.2 水质管理体系

流域生态健康评价是美国整个水质管理体系的重要一环(图2),是制定流域环境保护和综合治理方案的决策依据。基于流域生态健康的水质管理体系可以概括为以下几个过程:1)通过在整个流域尺度上全面的动态监测,管理和决策部门可以了解整个流域生态系统的化学、物理及生物完整性;2)结合水体的主要生态和社会功能(水生生态功能、人类健康功能、经济用水功能、水利功能、娱乐休闲功能等),采用综合评价模型,可以确定流域生态系统存在的主要功能障碍;3)应用生态健康模型进行胁迫因子分析(stressor identification),可以确定造成生态功能障碍的主要物理、化学及生物障碍因子(如有毒物质、营养物质、入侵物种、土地退化、水利工程等);4)针对流域范围内的主要生态障碍因子,在准确的定量生态模型的基础上,明确流域生态功能的各项物理、化学及生物指标的基准值;5)应用接纳水体水质模型并基于水体的自净和交换能力,核算流域环境容量,即保证生态功能达到要求的最大污染负荷量;6)应用流域模型分析整个流域范围内各个点源和非点源的污染负荷,通过利益相关方的协商,建立优化的污染负荷总量控制方案,确定各个污染源的负荷削减规划;7)在整个流域范围内,协调利益相关各方共同实施规划管理和综合治理方案,改善流域生态健康状况<sup>[10]</sup>。

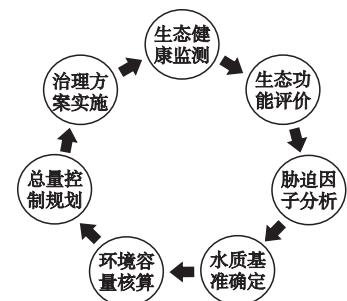


图2 基于流域生态健康的适应性水质管理体系

Fig. 2 Adaptive water quality management system based on watershed ecological health.

近年来,适应性管理(adaptive management)方式被越来越多地引入到流域水资源和水质管理系统中,这是一种在实践中持续调整、渐进改善的管理体系。由于流域生态系统的复杂性,人们对流域内的社会经济活动、气候变化、水文水动力过程、土壤和植被特性、物质和能量交换过程、生物地球化学反应、生物活动和毒理过程等的了解存在极大不确定性,对流域整体生态过程和变化所知有限,所做出的保护管理和治理恢复规划方案常常不能达到预定目的。因此,需要在规划制定实施过程中顾及到可能存在的环境因素变化,持续评估目标完成程度,根据反馈信息调整规划。长期的流域生态健康动态监测和评价是适应性流域水质管理的基础,可为环境保护和治理规划的制定和调整提供完整信息<sup>[10]</sup>。

## 2 流域生态功能分析

流域作为社会经济和自然环境的复合生态系统,其健康评价指标和评价方法取决于流域特定的生态性质和生态功能。流域所在的宏观生态区域决定了流域内地质、地形地貌、植被、气候、水文、土壤、土地利用和野生动物等生态系统特征,对于不同生态区域的流域需要建立适合当地状况的评价体系<sup>[11]</sup>。各地的社会经济状况决定了流域水体的生态功能和用途,而不同的水体指定用途(designated uses, DUs)也决定着流域健康监测指标和评价方法<sup>[11-13]</sup>。在对生态功能受损的流域进行评价的过程中,通常还需要在相同生态区域内寻找健康的参比流域(reference watershed)作为比较对象,确定水体可以达到的生态状况,以及建立各项指标的参比阈值<sup>[14]</sup>。

### 2.1 水文单元(hydrologic unit)和生态分区(eco-region)

流域生态健康评价是基于整体生态系统管理方法(holistic ecosystem management approach)的理论和方法,需要进行全国范围内的分级(hierarchical level)区域划分,在同一区域内的不同流域可以采用同一评价体系(评价指标和评价阈值)。美国地质调查局(USGS)的水文单元(hydrologic unit)分区和EPA的生态分区(eco-region)是两个具有代表性并被广泛采纳的区域划分方法。

研究自然和人为过程对水文水质的影响时,流域作为一个物质输入输出相对封闭的空间单元,被广泛采用为评价单元。USGS发展起来的水文单元地图(hydrologic unit map)为流域水文、水质及生态

管理提供了一个全国统一的标准地理和水文框架<sup>[15]</sup>。1987年以来,该系统发展成为一个多级系统,为基本的水文单元提供了2~8位的四级划分,不同位数的水文单元代码(hydrologic unit code, HUC)代表了不同级别的分类单元。随着应用的发展和深入,随后发展的流域边界数据集(watershed boundary dataset, WBD)进一步划分了10位和12位水文单元,形成了六级分区系统并提供了完整的地理信息系统数据。流域边界数据集与国家水文数据集(national hydrography dataset)相结合,提供了流域生态健康评价的基础水文空间数据(表1)。

EPA生态分区(eco-region)是一个多尺度多功能、结合陆地与水生生态系统并综合显示生态系统容量和潜能的空间模式的区域划分系统,相同的生态区域在植被覆盖、生物种群、土壤类型、地质状况、气象条件及水文特征等方面具有类似的空间模式。20世纪80年代以来,该系统经过不断细化,已经基本完成了覆盖整个北美大陆的四级分类,并发展到五级区划,从而成为流域生态健康评价的分区基础之一<sup>[12]</sup>。

在流域生态健康评价的实践中,水文单元和生态分区通常被同时采用。水文单元决定了流域评价的空间范围,根据不同的评价目的和评价尺度,可以选择不同的单元级别,目前在美国多数地区已经有比较丰富的数据积累,可以应用12位子流域作为基本评价单元。生态分区决定了评价方法体系,在同一生态分区内的流域的水文、水质及生态特征相对接近,具有一定的可比性,因此可以在分区内选择参比流域,针对性地建立各个分区特定评价指标和阈值<sup>[14]</sup>。

目前,中国已经建立了全国范围的生态功能区划<sup>[16-17]</sup>,但主要是针对陆地生态系统,难以作为流域生态健康评价的具体依据。尹民等<sup>[18]</sup>尝试以水资

表1 美国水文单元分类基本情况

Table 1 Basic classification of hydrological units in U. S.

单元级别 Hydrologic unit level	水文单元代码 Hydrologic unit code	分级名称 Unit name	平均面积 Average size (km <sup>2</sup> )	单元概数 Approximate number
1	2位 2-digit	区域 Region	459878	21
2	4位 4-digit	亚区域 Subregion	43512	222
3	6位 6-digit	水区 Basin	27444	370
4	8位 8-digit	亚水区 Subbasin	1813	2270
5	10位 10-digit	流域 Watershed	588	20000
6	12位 12-digit	子流域 Subwatershed	104	100000

源分区为主要依据,同时考虑自然和人为因素,建立了全国河流生态水文的三级分区.杨爱民等<sup>[19]</sup>结合高层单元的定性划分和底层单元的模糊聚类提出了全国生态水文二级区划.这两个方案类似于 USGS 水文单元分区,但目前精度较低,尚不足以支持具体应用.在局部范围内,孟伟等<sup>[20]</sup>以水文格局、地形地貌、植被和土壤等作为区划指标,提出了辽河流域层次的一级二次分区方案.吴建寨等<sup>[21]</sup>结合空间分析、实地调研及专家意见,提出了永定河(北京段)河流修复生态功能分区方案,划分 6 个区域并给出各区段的生态修复调控指标.迄今,我国的生态分区和水文分区已初步建立了大区域内的高级单元,但尚不能够细化建立微观尺度上的基层单元,因而在生态健康评价中的实际应用价值受到限制<sup>[22-23]</sup>.

## 2.2 水体指定用途

水体指定用途 (designated uses) 是美国水质管理中的一个重要法律概念,是流域水质和生态评价体系的重要组成部分,也是制定多数水质基准的基础,特定水体的指定用途决定了流域水文水质管理目标.《清洁水法》对水体指定用途的规定包括了水体目前用途、自 1975 年 11 月 28 日的曾经用途以及水体水质可以支持的其他用途.主要的水体用途包括:饮用水源(处理/未处理)、娱乐用水(长期/短期皮肤接触)、渔业用水、水生生物栖息地(温水性/冷水性)、农业用水和工业用水等.几乎所有的水体都有多项指定用途,大多数水体都应满足基本的可供游泳和鱼类生存 (fishable and swimmable) 的功能.根据水质分析和生态评价的结果,不能满足指定用途的水体将进入功能受损水体清单 (303d list),各州环保部门有责任为这些水体制定流域 TMDL.对于水质指标优于环境标准的水体,需要应用防止水质恶化条款 (antidegradation) 以保护这些优质水体<sup>[6,9]</sup>.

实质上,水体指定用途的划分包含社会经济和自然生态两方面的考虑.在法律行政程序上,划分和改变需要进行用途可达性分析 (use attainability analysis),通过公众评议,并得到 US EPA 的批准,在此过程中利益相关方的社会经济考量影响着水体指定用途划分<sup>[9]</sup>.从科学角度看,流域综合生态评价应该是用途可达性分析的核心内容,流域特定的生态特性决定着其所能达到的生态功能.加利福尼亚州采用的水体指定用途分类系统(表 2)就是社会经济和自然生态功能分类的混合.对于不同的水体指定用途,需要采用不同的物理、化学及生物评价指标

表 2 加利福尼亚州使用的水体指定用途分类

Table 2 Designated uses of water bodies in the state of California

水生生物用途 Aquatic life use	其他用途 Other designated use
温水性鱼栖息地	饮用水源
冷水性鱼栖息地	娱乐休闲水域(皮肤接触)
洄游鱼类产卵区	娱乐休闲水域(无皮肤接触)
洄游鱼类摄食区	农业用水
洄游鱼类越冬区	工业用水
河口栖息地	渔业用水
海洋栖息地	水电站用水
咸水栖息地	航道
贝类生物栖息地	防洪水域
珍稀物种栖息地	野生动物栖息地
	地下水补给区

判断水体功能状况<sup>[9,24]</sup>.

我国的水功能区划将水域划分为自然保护区、饮用水水源保护区、渔业用水区、工农业用水区、景观娱乐用水区以及混合区、过渡区等不同功能区域<sup>[25]</sup>,用于水体环境的评价与管理.在水质标准中,规定了部分水功能区的指标限值<sup>[26]</sup>.但目前仍然缺乏对于不同水域特定功能的用途可达性分析,未能建立水体功能与生态健康状况之间的联系.未来需要在相关研究中识别不同流域水生态功能的区域性差异及其主要控制因子,建立水体生态功能与生态健康胁迫因素之间的科学联系,在此基础上针对不同生态功能建立环境基准.

## 2.3 参比状况

评价流域生态健康状况时,需要确定相对没有或极少干扰情况下流域可以达到 (attainable) 的生态功能,进而确定生态功能完整情况下各项生态指标的背景值,也就是生态健康评价的参比状况 (reference condition).由于地形地貌、土壤类型、自然植被、气候条件及土地利用方式等生态特性存在巨大的空间变异性,不可能建立全国统一的参比状况.在实际应用中,建立参比状况可以采取两种方法——特定场地参比 (site-specific reference) 和区域参比 (regional reference)<sup>[8,14]</sup>.

特定场地参比方法建立在同一个流域内不同时空点的生态调查评价基础上,可以用来评价污染源单一和生态过程比较简单的流域内的生态功能.通过上游与下游的比较、以及历史数据比较等具体评价方法,可以建立针对特定评价对象和评价目标的参比状况.对于较大空间范围,以及存在复杂的点源和非点源污染以及其他生态干扰、多重复合污染、监测数据不完整等状况的流域,特定场地方法并不适用<sup>[8,14]</sup>.

区域参比方法可以部分克服特定场地参比方法存在的缺陷,该方法建立在生态分区的基础上,假设在相同生态分区内的流域具有比较接近的生态功能和生态特征.在特定生态分区内,可以在初步数据分析的基础上选择若干个具有代表性的候选流域,然后通过实地调查和监测确定较少生态干扰、功能相对完整的流域作为参比流域(reference watershed).对生态分区内其他流域的评价都将基于与参比流域的比较.在整个生态分区内流域广泛受到各种干扰,导致生态功能受损,不能找到合适的参比流域的情况下,可以采用统计描述确定统计意义上的参比指标<sup>[8,14]</sup>.

### 3 生态健康评价指标和方法

#### 3.1 评价指标

在流域生态健康评价中,可以采用的指标不胜枚举,大致可分为栖息地指标、水质指标和生物指标3大类(表3).在流域生态健康评价的实践中,不可能也不必要测定所有评价指标,仅需要根据生态区域和特定流域的实际状况,因地制宜地选择合适的指标集.选择评价指标时,应该注意以下标准:1)指标本身应该具有明确意义,并且能够直接与特定的生态功能相联系;2)尽量选择能灵敏反映流域内的生态扰动和污染过程,可以用来确定主要生态胁迫的因素;3)指标应尽可能容易测定,应尽量选择相对经济合算的指标;4)评价指标应该具有良好的重现性,应该存在统一的监测规范<sup>[5-6,8,27-29]</sup>.

河流、湖泊、海湾和湿地的生物群落是流域生态健康状况最直接的指标,能够灵敏反映整个流域内各种化学、生物和物理影响,因此生物健康状况评价是流域生态健康评价的核心内容.水体生物群落的结构组成和功能特性能够反映流域内存在的化学污染、流域下垫面改变、外来物种入侵、水资源过度利用、河岸植被带破坏等带来的水质恶化和栖息地破坏.多指标的生态种群度量(assembly metrics)方法已经在生物评价中广泛采用<sup>[5-6,8,27-32]</sup>.

#### 3.2 综合评价指数

最初,生物评价(bio-assessment)采用的方法是相对简单的指示生物法和单一指数法.由于这些评价方法采用的参数较少,每个生物参数只对特定干扰反应敏感,而且各参数反映干扰的敏感程度及范围不同,因此单独的生物参数只能反映狭窄范围的扰动因素和生态特性,并不能准确和完全地反映整个生态系统的健康状况和受干扰的强度.多量度指

表3 流域生态健康评价中的常用监测指标

Table 3 Commonly used indicators for monitoring of watershed ecological health

大类 Group	指标种类 Indicator type	指标 Indicator
栖息地指标 Habitat indicator	流域下垫面	面积、土地利用、地形地貌、土壤质量
	气候	降水、气温、风速、光照、干湿沉降
	水体	断面、弯曲度、底线、湖底海底地形
	水文水力	流量、流速、水深、水位、水利工程
	河岸带	岸坡稳定性、植被覆盖度及人工干扰
	沉积物	基质颗粒组成、化学成分、生物地球化学
	人为活动	污染排放、地形改造
水质指标 Water indicator	感官指标	温度、气味、浊度、色度、透明度
	离子指标	总溶解固体、电导率、总渗透压、硬度、盐度
	酸碱指标	pH、酸度、碱度
	含氧状况	总溶解氧、生物需氧量、化学需氧量
	营养物	氮(总量、氨态、硝态、有机态) 磷(总量、溶解态、颗粒态、有机态)
	泥沙	总悬浮固体
	重金属	颗粒态、溶解态
生物指标 Biology indicator	农药	降解产物
	持久性有机污染物	化学形态
	新型污染物	抗生素、激素
	细菌及其他病原体	大肠杆菌、粪大肠杆菌
	底栖大型无脊椎动物	生物完整性指数、多样性指数、均匀度指数、优势种、生物量、密度、耐污类群、摄食类群、有毒类群
	着生生物	
	水生植物	
	浮游动物	
	藻类浮游植物	
	鱼类	
贝类		
	野生动物	

数(multimetric index)方法定义了一系列在生物个体、生物群落和生态系统尺度上反映种群结构和组成的度量,然后整合这些度量形成综合指标,因而反映了影响生态健康的多种胁迫因素<sup>[5-6,8,27-32]</sup>.

在生物评价中可以采用的种群度量很多,良好的种群度量应该具有明确的生态功能意义、存在标准测量方法、重复性强、能灵敏反映环境污染和生态扰动,并且在实践中具有足够的技术支持.在实践中常用的度量指标可分为几类:反映生物多样性的种群丰富度(richness)指标;反映生物种群结构的分类单元组成指数(taxonomic composition);反映环境干扰的环境敏感耐受种指数(tolerance index);反映营养和栖息状况的摄食类种群指数(feeding group index)等.具体采用的指标需要根据监测水体的特定情况进行取舍.生物综合评价还需要综合各项量度得出综合评价指数,其基本方法是将指标测定值与参比值(通过参比流域分析和非参统计得到)相比

较,将指标值标准化给出指数评分,然后在各项标准化指数加和的基础上给出综合生态评分.在此基础上可以确定最终的生态指数阈值(bio-criteria),用来区分功能受损和功能达标流域.需要注意的是,评价得出的最终得分并非是确定流域生态健康状况的唯一依据,各项指标与参比状况的比较提供了流域内存在的生态障碍和胁迫因素的关键信息,对水环境保护和治理有着极为重要的指示意义<sup>[5-6,8,27-32]</sup>.

在美国生态监测评价中已经发展出包括生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)<sup>[33-34]</sup>、无脊椎动物群落指数(invertebrate community index, ICI)<sup>[35-36]</sup>、溪流状况指数(stream condition index, SCI)<sup>[37-38]</sup>、快速生物评价方案(rapid bioassessment protocols, RBP)<sup>[29]</sup>等多种综合生物评价方法.这些方法已被广泛用来评价包括底栖大型无脊椎动物、藻类浮游植物、水生附着生物、两栖动物、鱼类等多种生态种群的评价中,在各地的实践当中,对这些指数方法因地制宜进行了修改,建立了适合各地情况的评价指标体系<sup>[36-43]</sup>.

近年来,生物评价指数方法也在我国得到了应用<sup>[5-6]</sup>.如王备新和杨莲芳<sup>[44]</sup>采用大型底栖无脊椎动物的河流生物指数评价了秦淮河上游水质.马陶武等<sup>[45]</sup>在对太湖底栖大型无脊椎动物采样研究的基础上,通过生物指数的综合评估划分了太湖水质判别的生物基准.李春晖等<sup>[6]</sup>对国内外流域生态健康评价的理论和方法进行评述,对生物监测法和指标体系法进行比较,明确了指标选取的基本原则.考虑到我国各流域、各地区自然、社会、经济状况的巨大差异性,需要在全国范围内开展广泛研究,在积累丰富资料的基础上,因地制宜地制定不同流域的生态健康评价标准.

### 3.3 多元统计模型

由于在生态健康评价中涉及到数量庞大的各种参数,以及不同时空点上的海量数据,多元统计方法正得到日益广泛的应用.聚类分析(cluster analysis)、主成分分析(principal components analysis)、判别函数分析(discriminant function analysis)等方法已经被应用于建立评价参比状况和综合评价指数的过程中<sup>[28,30]</sup>.

在确定参比状况时,需要将潜在的参比流域进行分类,目前通常根据流域所在的生态分区进行分类,然后应用图形分析确定指标的参比值.但是,在不明确分区的情况下,可以在多变量分析的基础上,应用统计聚类分析建立不同生态功能的参比

状况的统计分类<sup>[28,30]</sup>.在生物监测和评价中通常涉及到非常多的生态指标,前面介绍的多量度指数方法是根据生态学的经验知识,将这些指标进行归类和标准化.同时,也可以采用因子分析(factor analysis)方法将这些指标归纳为几个综合因子.由于很多生态指标与环境胁迫因子存在非线性关系,因此线性方法如主成分分析在生态健康评价中应用有限.而典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)作为非线性多元直接梯度分析方法,可以结合多个环境因子一起分析,可直观明显地反映群落与环境的关系<sup>[30]</sup>.

判别模型指数(discriminant model index)已经被应用于海湾生态健康评价中<sup>[40-41]</sup>.该方法首先选择生态功能最完整的参比流域和干扰最严重的受损流域,然后通过判别函数分析建立多个生态变量的线性组合,最后应用线性组合变量判断待评价流域的功能状况分类.排序分析模型(multivariate ordination model)是一个建立在生态经验知识和统计分析基础上的评价方法<sup>[42-43]</sup>.该方法通过对校准数据进行排序分析,根据污染序列给出各个流域的评分,在此基础上计算各个种群的耐受值,根据耐受值建立模型,并给出各个流域的响应指数(benthic response index, BRI).

经验性的综合评价指数在目前仍然是应用最广泛的生态评价方法,这些评价指数比较直观,容易被决策和管理部门理解和接受.多元统计方法作为经验方法的有益补充,得到日益广泛的推广应用.随着数据的不断积累和统计方法的改进完善,生态统计模型将会在生态健康评价中占据更重要的地位.同时,生态和生物毒理的数值模型在近些年也有了长足发展,形成了例如AQUATOX的生态系统模型,也为流域生态健康评价提供了方法支持<sup>[46]</sup>.

## 4 流域生态健康评价的实施

### 4.1 多层次评价方法

流域生态评价的实施分为不同层次,从根据文献进行简单筛选到详细的田间调查采样和评价,获得的信息量和精度随之逐步增加.图3给出了EPA在湖泊和海湾生态评价中采用的多层次评价方法.随着调查精度的增加,需要包含的评价指标也需要相应增加,对生物群落的分类也应随之从科细化到属再到种,在相关的技术手册里,进一步详细列出了每一层次需要收集的数据和文献,以及采样中应该包含的各种指标<sup>[28,30]</sup>.

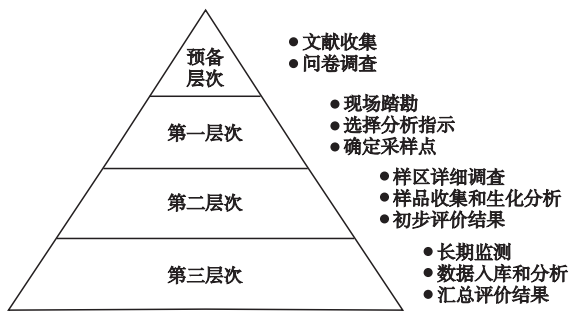


图 3 流域生态健康的阶段评价方法

**Fig. 3** Tiered assessment approach of watershed ecological health.

## 4.2 监测采样方法

实地调查和采样得到的各种数据,是流域生态健康评价的基础,因此需要在资料收集的基础上设计合理有效的监测和调查计划.在实践中,需要注意定位监测与随机采样的结合,根据评价目的和经济条件合理布置采样点的空间密度、分布、参比及重复.对于定位监测,还需要分析水文水质状况以及优化确定采样时间、频率与持续时间.生态健康评价需要建立野外和实验室标准采样测试方法,并制定质量保证和控制的计划<sup>[28,30]</sup>.

美国常规的水环境监测主要由各州的环境保护部门完成,由于各地社会经济状况和生态地理状况的差异,采用的评价指标、分析方法和最终生态功能的评价方法存在很大差异.因此,EPA提出了统一评价和汇总方法(consolidated assessment and listing methodology, CALM),为各州水体生态功能状况评价提供了统一框架.EPA规定各州的水质监测计划需要包括整体策略、目标、设计、核心和补充指标、质量保证、数据管理、数据分析和综合评价、结果汇报、计划评估及支持系统建设等10项基本元素.CALM确定了各州应用化学、生物、毒理、细菌、栖息地及其他类型数据确定水体功能状况及制定地方水质标准的方法框架<sup>[24]</sup>.表4是EPA推荐的评价4种典型指定用途的核心指标和补充指标.

表 4 评价典型指定用途的核心和补充指标

**Table 4** Core and supplemental indicators for general designated categories

指标类型 Indicator type	水生生物和野生动物 Aquatic and wild life	娱乐休闲 Recreation	饮用水 Drinking water	渔业和贝类 Fishery and shellfish
核心指标 Core indicator	生物群落状况、溶解氧、温度、电导率、pH、栖息地状况、水流状况、营养物、景观状况、湖泊富营养化、湿地水文地貌	病原微生物、水生植物、水流状况、营养物、叶绿素含量、景观状况、湖泊透明度、湿地水文地貌	微量元素、病原体 硝酸盐、盐度、泥沙、水流状况、景观状况	病原体、汞、杀虫剂、DDT、PCB、景观状况
补充指标 Supplemental indicator	水体和沉积物毒性物质、生物健康状况	危险物、美观度	挥发性有机物、杀虫剂、营养物、藻类	

## 4.3 数据管理

准确有效的流域生态健康评价必须建立在长期持续的海量数据积累基础上.除了对流域生态过程进行实地调查和长期监测外,还需要应用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)等技术手段在宏观尺度上获取流域内的地理、景观和生态信息.EPA开发的BASINS(Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources)软件是多功能的水质分析和模拟系统,其中包括了全国流域的地理信息系统和水质数据库,可以满足流域生态健康评价的基本数据需求<sup>[47]</sup>.

环境和生态信息的公开和数据共享,可以推动不同部门之间的合作及公众参与,最终促进环境保护和生态治理的健康发展.美国EPA在过去几年里,应用先进的信息技术手段,建立了供联邦和地方相关政府部门共享数据的数据交换网<sup>[48]</sup>,储存和显示物理、化学及生物监测数据的STORET(Storage and Retrieval)系统<sup>[49]</sup>,以及显示流域健康评价结果的WATERS(Watershed Assessment, Tracking & Environmental Results)系统<sup>[50]</sup>,这些网络数据管理系统为公众和相关部门提供了获取生态健康评价关键数据的便捷途径.

## 4.4 全国水生资源调查

为了确定美国水质基准状况,EPA与地方政府合作,开展了全国水生资源调查工作.NARS项目在全国范围随机采样,采用统一的生态指标和采样分析方法.该项目针对河流、湖泊水库、海岸带、湿地,根据生态功能建立指标集,包括栖息地和水体的生物、化学、物理指标,然后建立综合指数评价生态状况.2007年对全国1028个湖泊调查的结果表明,56%的湖泊生态功能良好,栖息地恶化和富营养化是造成湖泊生态功能障碍的主要胁迫因素<sup>[51]</sup>.2004年完成的对可涉水而过的溪流(wadeable streams)1392个随机样点的调查结果显示,42%的溪流生态功能恶化,氮磷营养物、泥沙及河岸带扰动是造成溪

流生态受损的主要因素<sup>[52]</sup>。2001—2011年对全国海岸带的调查提供了4个全国海岸带状况报告,持续提供了各地海岸带的水质指数、沉积物质量指数、海岸带栖息地指数、底栖指数、鱼类污染指数及综合指数评价结果,评价结果表明,美国海岸带水体的6%水质恶化,14%存在透明度问题,13%渔业功能受损<sup>[53-54]</sup>。目前,对湿地的调查评价工作仍在进行。在全国水生资源调查的研究、设计、实地调查、试验分析和汇报总结的实践过程中,EPA建立了一系列具有针对性的技术规范,可供我国在全国性流域生态健康评价工作中加以参考<sup>[32,55]</sup>。

## 5 总结和建议

近10年来,我国在流域生态健康评价方面已经开展了大量探索性工作<sup>[5-6]</sup>,逐渐构建了以流域水生态系统健康为目标的流域水质目标管理技术体系<sup>[1,22]</sup>。但是,目前我国流域生态健康评价工作仍然停留在研究阶段,还未能直接应用到环境保护的实践中<sup>[1,2,5-6,22]</sup>。从20世纪80年代以来,美国经过在环境保护和生态治理实践中的长期积累,形成了一套完整的流域生态健康综合评价的方法体系,已经成为水质和生态管理系统的重要组成部分。该系统为我国未来建立适合自身环境和生态实际情况的流域生态评价体系提供了非常重要的参照。

值得指出的是,流域生态评价是一个具有非常明确实践目的的具体工作,采用的技术方法手段必须通过在实际过程中不断修改并逐渐完善,而不能期望一次性形成全部的理论方法体系,更不能生搬硬套国外方法。结合以往的实际经验,笔者认为目前我国流域生态健康评价的研究和实践应该注意解决以下问题:1)以明确的法律法规和技术标准形式将流域生态功能评价纳入到我国环境保护的决策和执行系统中,将流域生态健康评价与环境监测、环境影响评价、水质标准制定、流域污染防治、排放总量控制及自然生态保护等相关工作紧密结合;2)建立全国统一的综合生态分区、水文单元划分及水体功能划分体系,在此体系支持下分析特定流域的社会经济功能和生态系统潜能,因地制宜地选择相应的评价指标、指标阈值和综合评价方法;3)建立应用地理信息系统和遥感技术,长期定位动态监测和大范围采样调查相结合,包含栖息地指标、水文指标、水质指标及生物指标的标准化监测项目和技术规程,具有完整的质量控制体系和开放兼容的数据库系统的流域生态健康监测系统;4)充分利用环境生态研

究中多元统计模型和数值机理预测模型的最新成果,在科学理论和数据积累的基础上建立基于生态和社会功能,综合考虑流域范围内水文、生物和地球化学过程的生态健康评价模型。

## 参考文献

- [1] Meng W (孟伟), Zhang Y (张远), Zheng B-H (郑炳辉), *et al.* The significance, challenge and key technologies in the application of ecosystem health method in watershed environmental management. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27** (6): 906-910 (in Chinese)
- [2] Deng H-B (邓红兵), Wang Q-L (王庆礼), Cai Q-H (蔡庆华). Watershed ecology: New discipline, new idea and new approach. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9** (4): 443-449 (in Chinese)
- [3] US EPA. The Watershed Protection Approach. The Annual Report 1992 (EPA 840-S-93-001). Washington, DC: US EPA, Office of Water, 1993
- [4] National Research Council. New Strategies for America's Watersheds. Washington, DC: National Academy Press, 1999
- [5] Luo Y-C (罗跃初), Zhou Z-X (周忠轩), Sun Y (孙轶), *et al.* Assessment methods of watershed ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23** (8): 1606-1614 (in Chinese)
- [6] Li C-H (李春晖), Cui W (崔巍), Pang A-P (庞爱萍), *et al.* Progress on theories and methods of watershed eco-health assessment. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2008, **27** (1): 9-17 (in Chinese)
- [7] US EPA. Surface Water Monitoring: A Framework for Change. Washington, DC: US EPA, Office of Water, Office of Policy, Planning and Evaluation, 1987
- [8] US EPA. Biological Criteria: National Program Guidance for Surface Waters (EPA-440/5-90-004). Washington, DC: US EPA, Office of Water, Office of Regulations and Standards, Criteria and Standards Division, 1990
- [9] Karr JR, Louis AT, Garman GD. Habitat Preservation for Midwest Stream Fishes: Principles and Guidelines (EPA-600-S3-83-006). Corvallis, OR: US EPA, Environmental Research Laboratory, 1983
- [10] National Research Council. Assessing the TMDL Approach to Water Quality Management. Washington, DC: National Academy Press, 2001
- [11] US EPA. Biological Criteria: National Program Guidance for Surface Waters (EPA 440-5-90-004). Washington, DC: US EPA, Office of Water, Regulations and Standards, 1990
- [12] Omernik JM. Ecoregions: A spatial framework for environmental management// Davis WS, Simon TP, eds. Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1995: 49-62



- [13] US EPA. Use of Biological Information to Better Define Designated Aquatic Life Uses in State and Tribal Water Quality Standards: Tiered Aquatic Life Uses (EPA 822-R-05-001). Washington, DC: US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, 2005
- [14] Hughes RM, Larsen DP, Omernik JM. Regional reference sites: A method for assessing stream potentials. *Environmental Management*, 1986, **10**: 629-635
- [15] Seaber PR, Kapinos FP, Knapp GL. Hydrologic Unit Maps (Water-Supply Paper 2294). Washington DC: U. S. Geological Survey, 1987
- [16] Ministry of Environmental Protection of China (中华人民共和国环境保护部), Chinese Academy of Sciences (中国科学院). Ecological Function Zoning in China. Beijing: Ministry of Environmental Protection of China, 2008 (in Chinese)
- [17] Fu B-J (傅伯杰), Liu G-H (刘国华), Chen L-D (陈利顶), *et al.* Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21** (1): 1-6 (in Chinese)
- [18] Yin M (尹 民), Yang Z-F (杨志峰), Cui B-S (崔保山). Eco-hydrological regionalization of river system in China. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2005, **25**(4): 423-428 (in Chinese)
- [19] Yang A-M (杨爱民), Tang K-W (唐克旺), Wang H (王 浩), *et al.* Eco-hydrological regionalization in China. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2008, **39**(3): 332-338 (in Chinese)
- [20] Meng W (孟 伟), Zhang Y (张 远), Zheng B-H (郑丙辉). Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(6): 911-918 (in Chinese)
- [21] Wu J-Z (吴建寨), Zhao G-S (赵桂慎), Liu J-G (刘俊国), *et al.* River eco-regionalization oriented by ecological restoration. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2011, **31**(9): 1843-1850 (in Chinese)
- [22] Meng W (孟 伟), Zhang Y (张 远), Zhang N (张楠), *et al.* Study on aquatic ecological function regionalization and water quality target management in the river basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2011, **31**(7): 1345-1351 (in Chinese)
- [23] Sun X-Y (孙小银), Zhou Q-X (周启星). Primary study of freshwater ecoregionalization in China. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **30** (2): 415-423 (in Chinese)
- [24] US EPA. Elements of a State Water Monitoring and Assessment Program (EPA 841-B-03-003). Washington, DC: US EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watershed, 2003
- [25] Ministry of Water Resources of China (中华人民共和国水利部). Water Function Zoning in China (Temporary). Beijing: Ministry of Water Resources of China, 2002 (in Chinese)
- [26] Ministry of Environmental Protection of China (中华人民共和国环境保护部). Environmental Standards for Surface Water (GB 3838-2002). Beijing: China Standards Press, 2002 (in Chinese)
- [27] Gibson GA, Barbour MT, Stribling JB, *et al.* Biological Criteria: Technical Guidance for Streams and Rivers (EPA 822-B-94-001). Washington, DC: US EPA, Office of Science and Technology, 1996
- [28] US EPA. Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria Technical Guidance Document (EPA 841-B-98-007). Washington, DC: US EPA, Office of Water, 1998
- [29] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, *et al.* Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish (EPA 841-B-99-002). 2nd Ed. Washington, DC: US EPA, Office of Water, 1999
- [30] Gibson GR, Bowman ML, Gerritsen J, *et al.* Estuarine and Coastal Marine Waters: Bioassessment and Biocriteria Technical Guidance (EPA 822-B-00-024). Washington, DC: US EPA, Office of Water, 2000
- [31] US EPA. Methods for Evaluating Wetland Condition: Introduction to Wetland Biological Assessment (EPA-822-R-02-014). Washington, DC: US EPA, Office of Water, 2002
- [32] Flotemersch JE, Stribling JB, Paul MJ. Concepts and Approaches for the Bioassessment of Non-wadeable Streams and Rivers (EPA 600-R-06-127). Washington, DC: US EPA, Office of Research and Development, 2006
- [33] Karr JR. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management. *Ecological Applications*, 1991, **1**: 66-84
- [34] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**: 21-27
- [35] DeShon JE. Development and application of the Invertebrate Community Index (ICI)// Davis WS, Simon TP, eds. Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1995: 217-243
- [36] Ohio EPA. The Use of Biocriteria in the Ohio EPA Surface Water Monitoring and Assessment Program. Columbus, OH: Ohio Environmental Protection Agency, Ecological Assessment Section, Division of Water Quality Planning and Assessments, 1990
- [37] Barbour MT, Gerritsen J, Griffith GE, *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**: 185-211
- [38] Shelton AD, Blocksom KA. A Review of Biological Assessment Tools and Biocriteria for Streams and Rivers in New England States (EPA 600-R-04-168). Cincinnati, OH: US EPA, 2004
- [39] Gerritsen J, Burton J, Barbour MT. A Stream Condition Index for West Virginia Wadeable Streams [EB/OL]. (2000-03-08) [2012-10-14] [http://www.wvdep.org/Docs/536\\_WV-Index.pdf](http://www.wvdep.org/Docs/536_WV-Index.pdf)
- [40] Engle VD, Summers JK, Gaston GR. A benthic index of environmental condition of Gulf of Mexico estuaries. *Estuaries*, 1994, **17**: 372-384
- [41] Davies SP, Somides LT, Courtemanch DL, *et al.* Maine

- Biological Monitoring and Biocriteria Development Program. Augusta, ME: Maine Department of Environmental Protection, Bureau of Water Quality Control, Division of Environmental Evaluation and Lake Studies, 1993
- [42] Allen MJ, Smith RW. Development of Demersal Fish Bointegrity Indices for Coastal Southern California. Westminster, CA: Southern California Coastal Water Research Project, 2000
- [43] Smith RW, Bergen M, Weisberg SB, *et al.* Benthic response index for assessing infaunal communities on the mainland shelf of southern California. *Ecological Applications*, 2001, **11**: 1073–1087
- [44] Wang B-X (王备新), Yang L-F (杨莲芳). Bioassessment of Qinhuai River using a river biological index. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23** (10): 2082–2091 (in Chinese)
- [45] Ma T-W (马陶武), Huang Q-H (黄清辉), Wang H (王海), *et al.* The selection of benthic macroinvertebrate based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(3): 1192–1200 (in Chinese)
- [46] Park RA, Clough JS. Aquatox (Release 3): Modeling Environmental Fate and Ecological Effects in Aquatic Ecosystems. Volume 2: Technical Documentation (EPA-823-R-09-004). Washington DC: US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, 2009
- [47] US EPA. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS). Version 4.0 (EPA-823-C-07-001). Washington DC: US EPA, Office of Water, 2007
- [48] US EPA. Environmental Information Exchange Network [EB/OL]. (2012-10-14) [2012-10-14]. <http://www.exchangenetwork.net/>
- [49] US EPA. STORET and WQX[EB/OL]. (2012-10-14) [2012-10-14]. <http://www.epa.gov/storet/>
- [50] US EPA. Watershed Assessment, Tracking & Environmental Results (WATERS)[EB/OL]. (2012-10-14) [2012-10-14]. <http://www.epa.gov/waters/>
- [51] US EPA. National Lakes Assessment; A Collaborative Survey of the Nation's Lakes (EPA 841-R-09-001). Washington, DC: US EPA, Office of Water and Office of Research and Development, 2009
- [52] US EPA. Wadeable Streams Assessment; A Collaborative Survey of the Nation's Streams (EPA 841-B-06-002). Washington, DC: US EPA, Office of Water and Office of Research and Development, 2006
- [53] US EPA. National Coastal Condition Report III (EPA 842-R-08-002). Washington, DC: US EPA, Office of Water and Office of Research and Development, 2008
- [54] US EPA. National Estuary Program Coastal Condition Report (EPA 842-F-06-001). Washington, DC: US EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watersheds and Office of Research and Development, 2007
- [55] US EPA. Indicator Development for Estuaries (EPA 842-B-08-004). Washington, DC: US EPA, Office of Water, 2008

---

作者简介 张 华,男,1977年生,博士,研究员.主要从事海岸带环境水文过程与模拟研究. E-mail: hzhang@yic.ac.cn

责任编辑 杨 弘

---