

城市水源地生态风险评价

郭先华^{1,2}, 崔胜辉^{1*}, 赵千钧¹

1. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 鉴于保护城市水源地的重要性, 参考美国环境保护署(US EPA)的生态风险评价导则, 提出城市水源地生态风险评价的基本方法, 该方法将城市水源地生态风险评价分为研究区的界定、受体及评价终点分析、风险源分析、暴露及危害分析、综合风险评价等步骤. 以贵阳市的主要水源地——红枫湖为例进行生态风险评价, 将红枫湖分为南湖、中湖和北湖3个研究区域, 识别出主要生态风险源为点源污染源、面源污染源、湖泊沉积物、酸沉降、干旱和石漠化等. 以水质变化为评价终点, 通过暴露、危害分析, 采用基于因子权重的评价方法进行综合评价. 结果表明: 南湖的生态风险值最高, 为0.6324; 北湖的风险值为0.3449; 中湖的风险值相对较低, 为0.3335. 研究还发现, 对红枫湖生态风险值贡献较大的因子为红枫湖湖水营养物P和沉积物中的重金属, 二者的权重分别为0.2059和0.1751. 应用该方法可以找出对水源地危害较大的生态风险因子, 更好地保护水源地.

关键词: 环境风险; 生态风险评价; 水源地; 红枫湖

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2009)06-0688-07

Ecological Risk Assessment for Urban Water Sources

GUO Xian-hua^{1,2}, CUI Sheng-hui¹, ZHAO Qian-jun¹

1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: To protect water sources, this study proposes a framework of ecological risk assessment (ERA) based on the Guidelines of Ecological Risk Assessment of the US EPA. The main procedures of the ERA include: confirming risk assessment range, endpoint and receptor assessment, risk source assessment, hazard assessment, exposure assessment, and synthesis risk assessment. The proposed method was applied to assess the ecological risk of Hongfeng Lake, which is the main water source of Guiyang City. The Lake is divided into three regions—north lake, south lake and centre lake, and the water quality is defined as an assessment endpoint. The major ecological risk sources are analyzed, such as point pollution, non-point pollution, sediment pollution, acid rain, drought, karst desertification, and so on. Integrating hazard assessment and exposure assessment and applying the measure of weighting factors, the ecological risk of Hongfeng Lake was characterized. The results show that the risk values are 0.6324 in the south lake, 0.3449 in the north lake, and 0.3335 in the centre lake. The key ecological risk sources are TP in the water with weight coefficient 0.2059, and metals in the sediment with weight coefficient 0.1751. The framework of the ERA applied in this study is a key tool to analyze the ecological risks and therefore to protect the water source.

Key words: environmental risk; ecological risk assessment; water source; Hongfeng Lake

水源地是一个城市生存和发展的必要条件, 随着城市化进程的加快, 城市供水遇到前所未有的压力, 而保护水源地的工作相当滞后, 主要问题包括:

¹ 突发性安全事故对水源地的污染, 如2005年吉林化工厂发生爆炸, 使松花江部分江段受到严重污染, 导致哈尔滨市停水数天; ^④ 水库及湖泊富营养化, 如2007年太湖暴发大面积蓝藻, 无锡水厂被迫暂时关停; ^(四) 水源地受重金属或有机毒物的污染, 如2008年云南阳宗海砷污染事件. 如何防止类似事件的发生、有效保护城市水源地已经成为当前的研究重点, 而国内目前的研究大多集中在水源地环境规划、水质评价^[1-2]、重金属污染^[3-4]和富营养化方面, 对水源地复合风险、多种污染的协同作用、累积作用研究较

收稿日期: 2008-10-22 修订日期: 2008-12-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-422); 国家自然科学基金项目(40701059)

作者简介: 郭先华(1974-), 男, 湖北宜昌人, gxher@163.com.

* 责任作者, 崔胜辉(1973-), 男, 福建宁德人, 副研究员, 博士, 主要

从事城市生态环境规划与管理研究, shui@iue.ac.cn

少.因此,为保障城市供水的安全,保障居民的身体健康,有必要引入环境风险管理,对城市水源地进行生态风险评价.

生态风险评价在20世纪80年代由安全风险和健康风险评价发展而来,在美国、欧盟等发达国家/地区得到广泛应用,被视为环境决策的重要基础.我国目前的环境风险研究主要集中在危险化学品的突发事故上,对生态风险评价还没有明确的法律规定;生态风险评价的研究也多侧重于重金属污染^[5-8]、难降解有机毒物^[9-10]方面,对区域生态风险评价的危害分析和综合评价都建立在生态脆弱性和生态损失度^[11-13]的基础上,对城市水源地生态风险评价的研究关注较少.笔者参考美国环境保护署(US EPA)发布的生态风险评价导则,对城市水源地生态风险评价方法进行初步探讨,并以贵阳市水源地——红枫湖为研究对象,进行生态风险评价,以期成为当地政府选择城市水源地或加强水源地的保护提供相关依据.

1 城市水源地生态风险评价框架

生态风险^[14](Ecological Risk)是指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受外界胁迫,从而在目前和将来减少该系统内部某些要素或其本身的健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的可能性.它是指在一定区域内,具有不确定性的灾害、事故及人类行为对生态系统及其组分可能产生的不利影响,包括生态系统结构和功能的损害,从而危及生态系统的安全和健康^[15].

US EPA将生态风险评价的基本内容分为问题的形成、分析过程、风险表征及风险管理等部分.参考国内其他学者^[16-20]的研究方法,笔者提出城市水源地生态风险评价的基本框架(见图1).

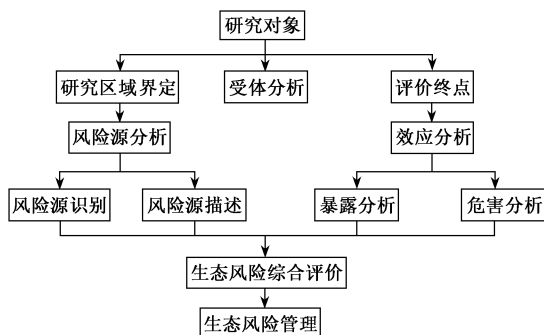


图1 水源地生态风险评价框架

Fig. 1 Ecological risk assessment framework

2 城市水源地生态风险评价方法

2.1 研究对象

水源地生态风险评价的研究对象主要包括地下水、河流、水库及湖泊(水库是人工湖泊,以下统称为湖泊)等多种类型水源地.

2.1.1 研究区域界定

进行生态风险评价首先要确定拟评价的区域,即评价的范围.根据水源地类型的不同,研究区域的界定方法也有差别:地下水水源地以地下水的补给范围来界定,以水文地质单元来划分,重点考虑地面环境因素(如固体废物和生活垃圾堆场等)对地下水的影响;河流以流域范围来确定;湖泊以湖泊主体及小流域来确定.

2.1.2 受体分析

受体即风险承受者.在生态风险评价中受体是指生态系统中可能受到来自风险源不利作用的组成部分,它可能是生物体,也可能是非生物体,通常是生态系统中对外部风险压力最敏感的因子.水源地的生态风险受体是地下水系统、河流水生生态系统及湖泊水生生态系统.

2.1.3 评价终点

评价终点是需要保护的對象实际生态价值的外在表达.评价终点的选择主要基于生态相关性,对胁迫因子(污染物)的易感性,以及与管理目标的相关性;潜在的评价终点可能是生态功能的丧失、生物种类的变化、生态系统营养级的变化等.

水源地的主要功能是为城市提供水资源,管理目标是以水资源量的大小和水质的好坏来衡量,根据不同类型水源地的特点来确定评价终点.水源地水质很好,没有大的污染源,对它进行生态风险评价可以选水量的变化为评价终点;相反,水量有保障,但周围环境污染风险较大,可以选水质的变化作为评价终点.

2.1.4 评价标准

根据研究对象、水源地的类型可以选择不同的评价区域进行对照,河流可选择上游或支流受人类活动影响较小的河段;地下水和湖泊等可选择水质功能较高标准的区域进行对照,如根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)划分的Ⅳ类或Ⅴ类水环境功能区;将各区域的评价结果与参照区域的生态风险值进行比较.

2.2 风险源分析

风险源分析是指研究区域内对生态系统或其组

分产生不利作用的干扰进行识别、分析和度量, 主要包括风险识别和风险源描述两部分.

2.2.1 风险识别

风险识别的目的是找出对水源地具有直接或间

接影响的因素: 可能是自然因素, 也可能是人为因素; 可能是突发性的污染事故, 也可能是渐进型、长期的影响; 对较大范围或对水生生态系统各层次有潜在危害的因素等. 水源地区域的基本风险源见表 1.

表 1 水源地生态风险源与胁迫因子

Table 1 Ecological risk sources and stressors of water source

风险类别	胁迫因子	生态风险源
渐进型	有毒有害物	点源(工矿企业三废排放、化学品泄漏等)、面源(农业污染、城镇化、交通运输、大气沉降、酸雨等)、地质条件影响、固体废物及生活垃圾堆场等
	氮磷营养物	工矿企业三废排放、湖泊沉积物、面源(城镇化、旅游业、农业、大气沉降、流域水土流失等)等
	水量变化	地下水超采、流域内其他工农业用水
概率型	生物因子	外来生物入侵
	气象因子	干旱、洪涝、极端气温等
	突发事件	危险化学品泄漏等突发性污染事故、蓝藻或水华爆发

2.2.2 风险源描述

风险源描述是对研究区域内的各种风险源进行定性、定量分析, 确定风险发生的概率、强度、时间和空间的变化, 以便估算各风险源的危害程度.

2.3 效应分析

效应分析是研究在各风险源的协同作用下, 水源地对压力的外在反应, 包括暴露分析和危害分析.

2.3.1 暴露分析

暴露分析是研究各风险源在评价区域中的分布、流动及其与风险受体之间的接触暴露关系^[21]. 各风险源对水源地的胁迫作用都通过一定的形式表现出来, 可以通过水量及水质的变化趋势、富营养化状态等进行分析.

水质变化趋势可以用水质的年际变化来表示, 富营养化状态采用综合营养状态指数法^[22]进行分析, 计算公式:

$$TLI_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI_j \quad (1)$$

式中, TLI_{Σ} 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; TLI_j 为第 j 种参数的营养状态指数(Chla, TP, TN, SD 和 COD_{Mn}); m 为评价参数的个数.

2.3.2 危害分析

危害分析是确定风险源对生态系统及其风险受体的损害程度. 风险源产生的压力会影响或降低生态环境因子的质量和功能, 危及经济的正常发展. 水源地的风险危害主要是造成供水企业的经济损失、城市居民生活缺水、当地经济发展受限以及饮用不合格水而带来的人体健康危害等.

2.4 生态风险综合评价

生态风险综合评价即评估危害作用的大小以及发生的概率过程; 将暴露分析和危害分析等结合起来, 考虑综合效应, 得出评价结论.

2.4.1 生态风险评价方法

根据评价终点的要求, 水源地的生态风险评价可以采用基于因子权重法的相对风险评价方法来计算生态风险值. 风险值是生态风险的表征, 风险值包含风险源的强度、风险受体的特征、风险源对受体的危害等信息.

水源地区域可以分为若干小区域: 河流可以分为支流、干流, 干流又可以分为几个部分, 如水源地一级保护区、二级保护区和准保护区等; 地下水水源地可以按水文单元来划分.

小区域的综合生态风险值可由下式计算:

$$R_i = \sum P_{ij} W_j' \quad (2)$$

式中, R_i 为第 i 个小区域的生态风险值; P_{ij} 为第 i 个小区域内第 j 类生态风险的发生概率或污染风险等评价指数; W_j' 为第 j 类风险的加权重.

2.4.2 生态风险评价指数体系

河流和湖泊可被认为是一个水体, 包括水、沉积物和水生生物 3 个层次, 其评价指标也相应含有灾害概率指数、生态指数(水生生物)、生态脆弱性指数(沉积物)以及污染风险指数(水)等信息(见图 2). 地下水水源地与湖泊及河流的评价稍有不同, 地下水的评价指数包括灾害概率指数、污染风险指数和敏感性指数.

灾害概率指数包括干旱及洪涝发生、安全事故的概率; 生态指数用生物多样性指数来表示; 氮磷污染指数和其他常规污染物风险指数以等标污染指数

表示,氮磷污染指数也可以用富营养化指数代替;重金属、有机毒物风险指数采用 H⁴kns_{on} 生态风险指数^[5,23];采用层次分析(AHP)法来确定各风险指数的权重,根据实际情况对评价指数进行增减。

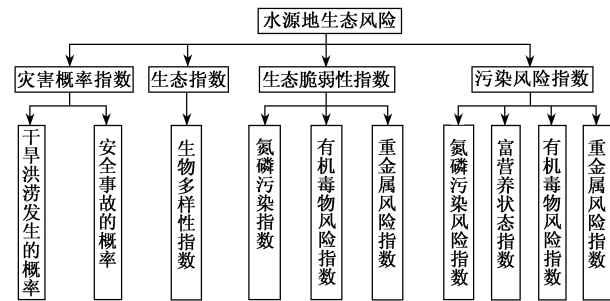


图 2 水源地生态风险评价的指数体系

Fig. 2 Index of ecological risk assessment of water source

2.4.3 评价指数的计算

2.4.3.1 综合风险概率

水源地小区域可能受不同或相同概率风险源的影响,其影响区域和程度是各风险源叠加的结果,其值为多个概率性风险源的加权值。

2.4.3.2 生态指数

生态指数反映评价区域的生态完整性、生态重要性及自然性大小,可以用生物多样性指数来表示。水生系统中,生物群落的变化可以间接反映水质的情况,生物多样性指数越高,生态系统越稳定,其生态风险越小;生物多样性指数越低,其生态风险越高。计算公式为:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

式中, D 为生物多样性指数; S 为水生生物的种数; N 为水生生物的丰度。

2.4.3.3 生态脆弱性指数

生态脆弱性是指某地区生态系统或环境在受到干扰时容易从一种状态转变为另一种状态,而且一经改变很难恢复到初始状态的能力^[24],其来自于环境的敏感性,是环境对外界干扰反应的灵敏程度。

河流和湖泊的沉积物为内源性污染物,在适当条件下其中的营养物、重金属、有机毒物等会释放出来,形成二次污染,故可以表征水源地的脆弱性。生态脆弱性指数可参考 H⁴kns_{on}^[5,23] 生态风险指数法计算:

$$RI = \sum_{i=1}^n T_f^i \cdot \frac{C_m^i}{C_s^i} \quad (4)$$

式中, RI 为沉积物的生态脆弱性指数; T_f^i 为第 i 类重金属或有机毒物的毒性响应系数; C_m^i 为第 i 类

重金属或有机毒物的实测值; C_s^i 为第 i 类重金属或有机毒物的标准值; n 为重金属及有机毒物的数量。

2.4.3.4 污染风险指数

污染风险指数可以通过等标污染指数来度量,具体公式为:

$$P_j = C_j / C_s \quad (5)$$

式中, P_j 为第 j 个污染指数的等标指数; C_j 为第 j 种污染物的实测浓度值; C_s 为第 j 种污染物的环境质量标准值。悬浮物中重金属及有机毒物风险指数用 H⁴kns_{on}^[5,23] 生态风险指数法计算。

2.4.4 数据标准化处理

指数单位不同,所表示的风险含义不同,对风险值的贡献也不同,计算时要对数据进行无量纲归一化处理;生物多样性指数与生态风险值负相关,采用式(6)的方法处理,其余指数与生态风险值正相关,采用式(7)的方法处理。

$$x = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

$$x = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

式中, x_i 为任意评价指数; x_{\min} 为一组数据的最小值; x_{\max} 为一组数据的最大值。

2.4.5 综合评价

通过以上各阶段的分析,将风险源分析、暴露分析和危害分析的结果相结合,并考虑综合效应和风险指数的权重,计算出水源地各小区域的生态风险值。

3 案例:红枫湖生态风险评价

3.1 研究区域界定

红枫湖是贵州省贵阳市和清镇市的主要水源地,每月供水在 350×10^4 t 左右。红枫湖建成于 1960 年,是贵州省大型人工湖泊之一,具有多种水环境功能,如水源地、发电、防洪、工农业用水、旅游等,但主要以城市水源地功能为主。

红枫湖流域包括贵州省清镇市、平坝县等行政区域,水域面积近 60 km^2 。红枫湖由北湖、中湖、南湖及后湖组成,水厂取水口位于红枫湖中湖后午附近,后湖被山体与南湖分隔,由地下溶洞与南湖连为一体,对取水影响较小,因此进行生态风险评价时暂不考虑后湖的影响。将红枫湖分为 3 个大的研究区域:北湖、中湖和南湖(见图 3)。

3.2 受体和评价终点

红枫湖属于人工湖泊,对其进行生态风险评价时选择水生生态系统作为风险评价的受体,将水质变化作为评价终点。

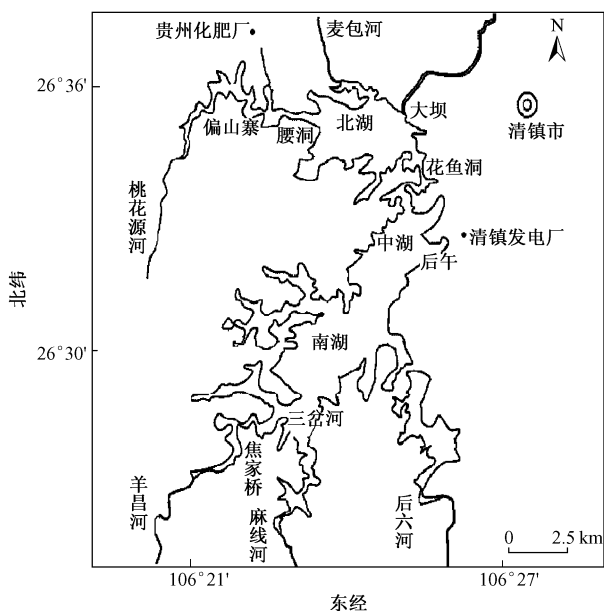


图3 红枫湖地理位置

Fig. 3 The map of Hongfeng Lake

3.3 风险源分析

通过分析确定红枫湖的主要风险源为点源排污(工矿企业的三废排放)、面源污染(农村面源污染、分散居民区生活污水)、内源污染物(湖泊沉积物)、干旱、酸沉降、流域内石漠化等。

3.3.1 入湖污染物总量

红枫湖主要由羊昌河、麻线河、后六河和桃花源河等汇流而成,流域内有多家化工厂排放的废水通过河流汇入红枫湖水体中。较大的人口集中区达20余个,有60多个大的污染源,直接和间接入湖的各种废水每年高达 2×10^8 t,主要污染物的年入湖量如表2所示。

表2 红枫湖主要污染物入湖量

Table 2 Pollution quantity into Hongfeng Lake

类别	污染物入湖量/(t/a)		
	COD _{Mn}	TN	TP
点源	1 934.4	1 920.8	47.2
面源	10 406.5	2 000.8	184.6
合计	12 340.9	3 921.6	231.8

注:数据由文献[25]整理而得。

3.3.2 干旱

红枫湖的水源补给主要来自于流域内的降雨,降水量对红枫湖水质的影响也是一个关键因素。据统计,1921—2000年红枫湖流域共发生旱年18年,涝年28年,其中,1936,1961,1972,1975和1981年为旱年^[26],特旱年(1981年)汛期降水量仅有215.14

mm。经统计,红枫湖流域发生干旱的概率为23%。

3.3.3 酸沉降

衡量酸雨强度的指标主要有降水酸度和酸雨频率。贵州省降水pH为4.46~7.06,其中,红枫湖流域内的平坝县年均降水pH为4.83,清镇市为5.12;清镇市酸雨频率最高,达97.4%。可见红枫湖流域正遭受严重的酸雨威胁。

3.3.4 石漠化

石漠化是一类发生在岩溶地区的土地荒漠化^[27]。红枫湖流域面积为1 596 km²,纯碳酸盐岩出露面积为877 km²,占流域总面积的54.95%,流域森林覆盖率仅为9.9%;水土流失面积为311.45 km²,占流域面积的20.24%。红枫湖上游平坝县的石漠化面积占其行政面积的50.58%,清镇市石漠化面积占其行政面积的36.73%,远高于贵州省平均水平的20.40%。石漠化直接导致红枫湖流域植被稀少,流域内生态蓄水量减少、水土流失,影响入湖的水量和水质。

3.4 暴露分析

3.4.1 水质趋势分析

长期受各风险源的胁迫作用,红枫湖水质逐年下降,其水质类别降到《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)的Ⅴ类。根据贵州省环境监测中心水质月报分析,红枫湖全湖的水质在1998—2007年主要为Ⅳ和Ⅴ类;表3为红枫湖近3年来7个主要监测垂线的情况,其中,南湖为焦家桥—三岔河;中湖为后午—花鱼洞;北湖为偏山寨—腰洞—大坝。

表3 红枫湖的水质类别

Table 3 Water quality grade of Hongfeng Lake

年份	南湖	中湖	北湖
2005	劣(Ⅴ)~Ⅴ类	Ⅳ~Ⅴ类	劣(Ⅴ)~(Ⅴ)~Ⅴ类
2006	劣(Ⅴ)~Ⅴ类	Ⅴ类	劣(Ⅴ)~(Ⅴ)~Ⅴ类
2007	Ⅴ类	Ⅴ类	劣(Ⅴ)~(Ⅴ)~Ⅴ类
类别 ¹⁾	Ⅳ~Ⅴ类	Ⅴ~Ⅴ类	Ⅳ~Ⅴ类

1)《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)。

由表3可以看出,各垂线的水质都达不到水环境功能的标准,经常超标的污染物主要有TN, TP, F和重金属等,其中TP等标污染指数的变化情况见图4。

3.4.2 富营养化状态分析

水体富营养化是指N和P等营养物大量进入水体后,水中藻类等浮游生物异常增殖,从而破坏了水体的生态平衡,使得水体失去原有的价值和功能。

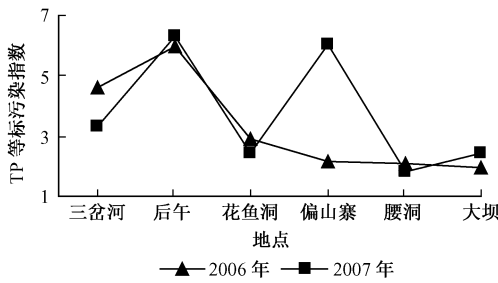


图 4 TP 等标污染指数变化趋势

Fig. 4 The TP pollution indicators in Hongfeng Lake

红枫湖在各风险因子的胁迫作用下, 其直接的暴露结果就是湖泊富营养化。

应用综合营养状态指数法, 计算得出 2006 年 1—10 月红枫湖综合营养状态指数 (TLI) (见图 5)。根据评价标准, $TLI \geq 50$, 表示湖泊呈中营养状态。图 5 显示, 红枫湖的 TLI 正接近或超过 50, 目前处于富营养的关键时期, 有进一步发展的趋势。

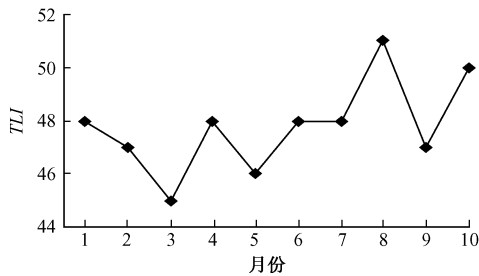


图 5 2006 年红枫湖综合营养状态指数

Fig. 5 Index of eutrophication of Hongfeng Lake in 2006

3.5 危害分析

红枫湖水质恶化有 2 个典型的表现形式: “翻

湖”和蓝藻爆发。“翻湖”是深水湖泊特有的现象, 在夏秋交际季节随着天气逐渐转冷, 湖泊表层湖水的温度下降较快, 表层湖水垂直向下位移, 造成湖底大量营养物和污染物上升到湖面。1994 年红枫湖发生一起“翻湖”事件, 造成全湖水水质恶化, 鱼类大量死亡。红枫湖目前处于富营养化快速发展阶段, 每年夏季都要发生不同范围的水华, 一旦发生水质恶化事件, 将对当地的生态环境和社会经济产生较大危害。如果红枫湖丧失饮用水源地和旅游功能, 贵阳市将有近 100×10^4 人的生活饮用水得不到保障, 清镇市每年损失的旅游收入将超过 6000×10^4 元, 将有 3000 人面临失业的危险。

3.6 生态风险综合评价

通过以上分析, 确定红枫湖的生态风险评价指数包括生物多样性指数^[28]、沉积物 N 污染指数、沉积物 P 污染指数^[29]、沉积物重金属风险指数^[23]、湖水 P 污染风险指数、湖水 F 污染风险指数、湖水重金属风险指数^[30]等。

3.6.1 风险源的综合权重

采用层次分析(AHP)法确定红枫湖生态风险评价指数(生物多样性指数、沉积物 N 污染指数、沉积物 P 污染指数、沉积物重金属风险指数、湖水 P 污染风险指数、湖水 F 污染风险指数、湖水重金属风险指数)权重分别为 0.083 5, 0.087 0, 0.162 1, 0.175 1, 0.205 9, 0.139 8 和 0.146 6。

3.6.2 综合评价

考虑综合效应和权重, 计算出红枫湖流域生态风险值(见表 4)。

表 4 红枫湖的生态风险值

Table 4 The ecological risk assessment of Hongfeng Lake

项目	南湖	中湖	北湖	大坝
生态指数				
生物多样性指数	3.93	3.89	4.72	5.46
沉积物 N 污染指数	2.900	2.290	3.020	2.660
生态脆弱性指数				
沉积物 P 污染指数	0.903	0.605	0.520	0.724
沉积物重金属风险指数	95.84	66.82	112.55	115.02
污染风险指数				
湖水 P 污染风险指数	2.20	5.96	2.15	2.00
湖水 F 污染风险指数	3.66	1.21	1.19	1.06
湖水重金属风险指数	260.64	210.91	241.28	331.00
加权归一处理	0.632 4	0.333 5	0.344 9	0.452 1

4 结果与讨论

对红枫湖流域的生态风险评价结果显示, 南湖的生态风险值最高, 为 0.632 4; 中湖的风险值相对较低, 为 0.333 5, 按风险值排序为南湖 > 大坝 > 北湖 > 中湖。风险值的高低反映了不同区域风险源的

特点: 南湖沉积物中 N 和 P 的污染风险值与其上游平坝县、羊昌河的污染有关; 北湖的重金属污染风险较高, 主要受化肥厂排放的废水、上游桃花源河流域小煤矿开采的影响; 中湖的生态风险值较小, 证明近年来当地政府对水源地的保护工作取得了一定的效果。

以往对红枫湖的研究主要集中在富营养化控制方面,而对多种污染源的复合风险研究较少。研究发现,对红枫湖生态风险值贡献较大的2个因子为湖水中的营养物P和沉积物中的重金属,二者的权重分别为0.2059和0.1751。重金属污染带来的生态风险危害比预期的要高。因为红枫湖是一个深水分层湖泊,容易发生翻湖现象,因此应加强对红枫湖流域小煤矿开采的控制,减少煤矿酸性废水的排放,以减少人体健康风险和生态风险。

5 结论

a. 参考US EPA的生态风险评价导则,建立了城市水源地生态风险评价的框架和基本方法,主要研究步骤包括研究区域的界定、受体及评价终点分析、风险源分析、效应分析、综合风险评价等。

b. 在以红枫湖为对象的案例分析中,将其分为3个大的区域,对风险源进行描述,通过暴露、危害分析,运用基于因子权重的相对风险评价方法进行综合评价,得出不同区域的生态风险值大小,识别出对生态风险贡献较大的因子。

c. 将生态风险评价及管理引入到对水源地的保护工作中,由于收集资料不全面,指标体系不够完善,可能有些比较重要的风险源和因子没有考虑到,评价结果存在一定程度的不确定性,在下一步的工作中应该逐步完善。

参考文献(References):

- [1] 陈炼钢,陈敏建,丰华丽.基于健康风险的水源地水质安全评价[J].水利学报,2008,39(2):235-239.
- [2] 闻常玲,王莉红,贺徐蜜,等.水库型饮用水水源地生态安全评价及应用[J].水资源保护,2008,24(3):91-94.
- [3] 沈军,王东启,史贵涛,等.黄浦江水源地水和沉积物中汞的分布[J].环境科学研究,2008,21(2):24-28.
- [4] 史贵涛,陈振楼,张翠,等.上海市饮用水源地周边环境中的重金属[J].环境科学,2008,29(7):1797-1805.
- [5] 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄.乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J].生态学报,1999,19(2):206-211.
- [6] 王军,陈振楼,王初,等.上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J].环境科学,2007,28(3):647-653.
- [7] 文军,骆东奇,罗献宝,等.千岛湖底泥重金属污染的生态风险评价[J].水土保持研究,2006,13(2):11-14.
- [8] 马德毅,王菊英.中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J].中国环境科学,2003,23(5):521-525.

- [9] 智昕,牛军峰,唐阵武,等.长江水系武汉段典型有机氯农药的生态风险评价[J].环境科学学报,2008,28(1):168-173.
- [10] 石璇,杨宇,徐福留,等.天津地区地表水中多环芳烃的生态风险[J].环境科学学报,2004,24(4):619-624.
- [11] 付在毅,许学工,林辉平.辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J].生态学报,2001,21(3):365-373.
- [12] 许学工,林辉平,付在毅.黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(1):111-120.
- [13] 程建龙,陆兆华,范英宏.露天煤矿区生态风险评价方法[J].生态学报,2004,24:2945-2950.
- [14] US EPA. EPA/630/R-95/002F Guidelines for ecological risk assessment[S]. Washington DC: Risk Assessment Forum, 1998.
- [15] LIPTON J, GALBRAITH H, BURGER J, et al. A paradigm for ecological risk assessment[J]. Environ Manage, 1993, 17: 1-5.
- [16] 陈辉,刘劲松,曹宇,等.生态风险评价研究进展[J].生态学报,2006,26(5):1558-1566.
- [17] 卢宏伟,曾光明,谢更新.洞庭湖流域区域生态风险评价[J].生态学报,2003,23(12):2520-2530.
- [18] 胡二邦.环境风险评价实用技术和方法[M].北京:中国环境科学出版社,2000:9-11.
- [19] 殷浩文.生态风险评价[M].上海:华东理工大学出版社,2001:21-37.
- [20] 殷浩文.水环境生态风险评价程序[J].上海环境科学,1995,14(2):11-14.
- [21] LLOYD P J. Measurement methods for human exposure analysis[J]. Environmental Health Perspectives Supplements, 1995, 103(3):35-43.
- [22] 金相灿.中国湖泊富营养化调查[M].北京:中国环境科学出版社,1990:57-63.
- [23] 黄先飞,秦樊鑫,胡继伟,等.红枫湖沉积物中重金属污染特征与生态危害风险评价[J].环境科学研究,2008,21(2):18-23.
- [24] 商彦蕊.自然灾害综合研究的新发展:脆弱性研究[J].地域研究与开发,2000,19(2):73-77.
- [25] 钟晓,廖国华,孙伟.红枫湖、百花湖网箱养鱼对湖库水质的影响分析及水资源保护[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2004,22(4):34-38.
- [26] 陈静.贵阳汛期暴雨与旱涝关系的分析[J].贵州气象,2001,25(3):3-4.
- [27] 王明章,王尚彦,杨秀忠.贵州岩溶石山生态地质环境研究[M].北京:地质出版社,2005:3.
- [28] 王智慧,杨祖丽.红枫湖春季原生动植物群落与水质的初步研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2004,22(3):25-29.
- [29] 张维.红枫湖富营养化特征及水质改善对策[J].贵州环保科技,2004,10(增刊):11-16.
- [30] 梁莉莉,王中良,宋柳霆.贵阳市红枫湖水体悬浮物中重金属污染及潜在生态风险评价[J].矿物岩石地球化学通报,2008,27(2):119-125.

(责任编辑:潘风云)