水库型饮用水水源地生态安全评价及应用

闻常玲¹, 王莉红¹, 贺徐蜜¹, 金 鑫²

(1. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江省环境监测中心, 浙江 杭州 310012)

摘要 对中小水库型饮用水水源地生态安全评价进行了研究。构建了 4 个层次的安全评价指标体系, 考虑了影响水源地水质、水量的内外各种因素, 如人口密度、森林覆盖率等。通过数据归一化处理 and 权重分析, 计算了指标的安全性指数值以判断安全度。生态安全评价体系应用于天台县桐坑溪水库饮用水水源地, 结果表明指标层中污染防治和环境管理能力是影响该水源地安全的敏感指标, 这两项的安全度分别为差和中等。由此提出近期水源地环境保护中应采取的对策和措施。

关键词 水库型水源地; 生态安全; 综合评价; 饮用水

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2008)03-0091-04

Ecological security assessment and its application in drinking water source reservoirs

WEN Chang-ling¹, WANG Li-hong¹, HE Xu-mi¹, JIN Xin²

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China; 2. Zhejiang Environmental Monitoring Centers, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The ecological security assessment of medium and small drinking water source reservoirs was studied. Considering the internal and external factors affecting the water quantity and quality of the source area, which include population density and forest cover, a four-layer security assessment indicator system was developed. The security index was calculated through normalization and weighting analyses of data. Using Tongkengxi Reservoir of Tiantai County, Zhejiang Province as an example, we find that two indicators, the prevention and treatment of pollution and the capacity of environmental management, have low and moderate security indices, respectively. Current methods for protection of the water source area are put forward.

Key words water source reservoir; ecological security; integrated assessment; drinking water

饮用水水源安全是国家安全的一部分, 保障饮用水安全是我国当前及今后一个时期内环保工作中的重中之重。水源地生态系统在水分调节、水质净化等服务功能^[1]方面有更高的要求, 面源是主要的污染类型, 它给环境系统的保护、建设、管理带来困难^[2-6]。如何调控人类行为以维护饮用水水源地生态安全成为人们关注的热点。

在我国中小城镇中大多以中小型水库作为饮用水水源地, 当前在全国范围内正在全面开展饮用水

水源地环境保护工作。对中小型水库环境系统进行综合评价研究, 分析经济社会发展过程中影响其安全的敏感因素, 并在环境保护对策中提出针对性措施是一项非常必要而紧迫的任务。

1 水源地生态安全评价

水源地范围是指为保护水源洁净而划定的加以特殊保护、防止污染和破坏的一定区域, 为水库上游汇水区。生态安全又称生态环境系统安全, 其中包

表 1 水库型水源地生态安全评价指标体系及指标权重

目标层 A	准则层 B	指标层 C	因素层 D
区域生态安全 A	发展压力 B ₁ (0.105)	社会发展 C ₁ (0.332)	人口密度 D ₁ (0.250) \ 人口增长率 D ₂ (0.250) \ 人均 GDP D ₃ (0.500)
		资源供给 C ₂ (0.668)	人均供水量 D ₄ (0.637) \ 人均耕地面积 D ₅ (0.258) \ 单位面积产量 D ₆ (0.105)
	系统状态 B ₂ (0.637)	生态系统稳定性 C ₃ (0.334)	洪涝灾害 D ₇ (0.072) \ 生物丰度指数 D ₈ (0.449) \ 地面坡度比 D ₉ (0.219) \ 水土流失指数 D ₁₀ (0.071) \ 降雨强度 D ₁₁ (0.189)
		水源涵养能力 C ₄ (0.333)	森林覆盖率 D ₁₂ (0.654) \ 林种结构指数 D ₁₃ (0.192) \ 土壤类型 D ₁₄ (0.077) \ 土地利用情况 D ₁₅ (0.077)
		环境质量状况 C ₅ (0.33)	大气环境达标率 D ₁₆ (0.081) \ 水环境达标率 D ₁₇ (0.731) \ 酸雨频度 D ₁₈ (0.188)
	人文响应 B ₃ (0.258)	污染防治 C ₆ (0.600)	污水治理率 D ₁₉ (0.273) \ 固废无害化率 D ₂₀ (0.090) \ 化肥利用率 D ₂₁ (0.273) \ 内源防治 D ₂₂ (0.273) \ 农药使用量 D ₂₃ (0.091)
		人文社会 C ₇ (0.200)	中小学环境教育达标率 D ₂₄ (0.500) \ 环保投资 GDP 比重 D ₂₅ (0.500)
		环境监管能力 C ₈ (0.200)	水质监控系统 D ₂₆ (0.200) \ 水质预警系统 D ₂₇ (0.200) \ 标识牌树立 D ₂₈ (0.600)

括自然生态系统,经济生态系统和社会生态系统。水源地生态安全评价的目的是为了水质和水量能得到保障。

1.1 评价指标

生态安全评价研究主要为评价指标的构建和评价指标值的确定^[7],本文评价采用压力-状态-响应框架模型下的多因子大综合评价指标^[8-9]。框架模型中“压力”指经济社会发展对水源地调配供水能力的需求;“状态”指区域发展中的森林覆盖率、植被类型、土壤类型、生物多样性、富营养化水平等生态环境状况;“响应”指针对人类发展需求及区域生态环境状态所采取的水土流失治理、污染物治理、水质监控与预警系统建设等方面的措施。指标筛选过程中结合频度统计法和理论分析法,指标的选取遵循科学性、可操作性和综合性原则。科学性指选取的指标能科学地反应系统的状态及其在系统中的相互联系性和独立性。可操作性指资料的可获得性和常用性,这样指标才能说明问题,也是有效的。综合性指选取的指标反映影响水库水质的库内外因素及影响水库水量的因素。构建的评价指标体系见表 1,括号内数值为权重。

表 1 中各指标的定义参考国家标准和行业标准并结合国内外研究现状。水源地生态安全评价中典型指标的定义:

a. 人均供水量:

水源地供水区域内人均可供水量 = (区域水资源量 - 区域生态需水量) / 供水总人口

b. 生物丰度指数:

生物群中种群数与个体数自然对数的比值

$$r = (s - 1) \ln N$$

式中: r 为多样性指数; s 为种群数; N 为个体总数。

c. 森林覆盖率:

$$0.5 \times \frac{\text{林地面积}}{\text{流域面积}} + 0.3 \times \frac{\text{草地面积}}{\text{流域面积}} + 0.2 \times \frac{\text{农田面积}}{\text{流域面积}}$$

d. 林种结构指数: 区域内阔叶林、针叶林、灌木林等所占的比率。

e. 水土流失指数: 单位面积土壤流失量,理想状态为流失指数小于或等于 500 t / (km²·a)

f. 降雨强度: 年平均暴雨强度。

g. 土壤类型: 区域内的主要土壤,如红壤、黄壤、岩性土、水稻土等。

h. 污水治理率: 生活污水经人工湿地等处理后的无害化率。

i. 内源防治: 造成内源污染行为的防治情况。

j. 水质监控系统: 水文、水质、气象及相关信息的监控。

k. 水质预警系统: 信息分析、应急发布及处理系统。

l. 标识牌树立: 水源地各级保护区标识牌的树立情况。

1.2 评价指标值

1.2.1 指标数据的归一化

评价中各指标数据主要来自环保部门、水利部门、国土部门和林业部门。指标数据的单位不同,对评价结果的影响力和影响方向不同,需要把各指标数据无量纲归一化处理。归一化过程定量和半定量相结合,以减少评价中主观因素的影响。归一化方法采用安全效应指数法,即对区域生态安全有利的指标称为正效应指标,不利的指标称为负效应指标。定量化正效应指标归一化值

$$X_i = D_r / D_l$$

负效应指标归一化

$$X_i = (1 - D_r / D_l)$$

式中: D_r 为指标值; D_l 为目标值。

目标值赋值参考国家或行业标准及相关研究,如森林覆盖率目标值

$$F = PS_f / W S_f$$

式中: P 为历年一日出现频率较大的暴雨量; S_f 为

保护区面积 ; W 为森林土壤饱和蓄水量 ; S_1 为流域总面积。

半定量指标的归一化方法是依据指标对上级指标的影响程度对比分级 (1~7 级) 以确定分值 (0~1)。

1.2.2 指标权重的确定

权重是指层次模型中各指标因素对相应上一级指标的影响程度 ,采用 1~9 标度法^[10]选择各指标相对其他指标的重要程度构造模糊判断矩阵。利用判断矩阵的最大特征值和对应特征向量进行单层次一致性检验 ,在此基础上进行层次总排序一致性检验 ,如一致性比率值小于 0.10 则排序结果有满意的一致性 ,各一致性比率见表 2。最后通过一致性检验后确定各判断矩阵最大特征值的特征向量为对应指标因素的权重 ,见表 1 括号内数值。

表 2 生态安全评价中各单层次一致性比率

矩阵	$\lambda_{\max}$	R_C	矩阵	$\lambda_{\max}$	R_C
A - B	3.038	0.033	C ₃ - D	5.073	0.016
B ₁ - C	2.000	0.000	C ₄ - D	4.073	0.027
B ₂ - C	3.000	0.000	C ₅ - D	3.065	0.056
B ₃ - C	3.038	0.033	C ₆ - D	4.000	0.000
C ₁ - D	3.000	0.000	C ₇ - D	2.000	0.000
C ₂ - D	3.038	0.033	C ₈ - D	3.000	0.000

注 :A ,B ,C ,D 同表 1 总排序的一致性比率 $R_C = 0.019$ 。

单层次一致性比率

$$R_C = I_C / I_R \quad I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

式中 : I_C 为一致性指标 ; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值 ; n 为判断矩阵的阶数 ; I_R 为随机一致性指标。

层次总排序的一致性比率^[11]

$$R_C^{(4)} = \frac{I_C^{(4)}}{I_R^{(4)}}$$

式中 $I_C^{(4)}$ 、 $I_R^{(4)}$ 分别为因素层 (D) 对目标层 (A) 的一致性指标和随机一致性指标。

1.3 安全性指数值

区域生态安全性值的计算有多种模型 ,计算值表征生态安全度 ,指数值越大 ,安全度越高。水源地生态安全评价采用加乘复合综合指数模型^[12] ,则指标的安全性指数值

$$I = \sum_i^n b_i C_i(X_i) \quad (1)$$

式中 : b_i 为第 i 个因素权重 ; $C_i(X_i)$ 为第 i 个因素归一化值。

式 (1) 适用目标层、准则层和指标层指标安全性指数值的计算。

1.4 等级标准

针对水源地环境保护要求采用安全性指数值标准评定法^[13] ,生态安全等级划分为 4 级。当生态安

全指数值 $I \in (0.5 \sim 0.65)$ 时 ,生态安全度差 ;当 $I \in (0.65 \sim 0.75)$ 时 ,生态安全度为中等 ;当 $I \in (0.75 \sim 0.85)$ 时生态安全度为良好 ; $I > 0.85$ 时生态安全度为优良。

2 实例

天台县位于浙江省中部丘陵盆地生态区 ,属亚热带季风性气候 ,全县总面积 1421 km² ,水域总面积 50.78 km² ,年平均降雨量 1330 mm ,是典型的山区盆地。天台县现有水源地共 6 处 ,其中 4 处为水库型。本文拟对位于白鹤镇的桐坑溪水库进行水源地生态安全评价和分析。桐坑溪水库北高南低 ,正常库容 241 万 m³ (小一型) ,主流长度 4.0 km ,集雨面积 10.73 km² ,地势较高 ,居民稀少 ,面源污染是主要的污染类型。2006 年 7 月水环境质量达地表水Ⅰ类水标准及生活饮用水水源水质Ⅰ级标准 ,主要为周边 3 个镇 (街道) 供水 ,现供水人口约为 6 万人 ,是浙东部典型的中小水库型饮用水水源地。以水库型饮用水水源地生态安全评价方法对桐坑溪水库水源地进行评价 ,则各层指标安全性指数值见表 3。

表 3 桐坑溪水库水源地生态安全性指数值

层次	影响因素	指数值
目标层	区域生态安全	0.778
准则层	发展压力	0.819
	系统状态	0.829
	人文响应	0.638
指标层	社会发展	0.800
	资源供给	0.829
	生态系统稳定性	0.799
	水源涵养能力	0.875
	环境质量状况	0.782
	污染防治	0.595
	人文社会	0.750
	环境管理能力	0.657

桐坑溪水库水源地区域生态安全性指数值为 0.778 $\in (0.75 \sim 0.85)$,即安全度为良好。

由表 4 可知 ,影响污染防治指标安全度的因素污水治理率、固废无害化率、化肥利用率、内源防治与农药使用量归一化值均较低 ,有较大的提升空间。则依据桐坑溪水库水源地生态安全评价结果及水源地实际情况 ,对提高水源地安全度有较大提升空间的指标为人文响应准则层下的污染防治、人文社会及环境管理能力等指标 ,需要较长时间才能优化的指标为系统状态准则层下的生态系统稳定性、水源

表 4 影响因素的权重和归一值

影响因素	权重	归一值	影响因素	权重	归一值
污水治理率	0.273	0.426	内源防治	0.273	0.714
固废无害化率	0.090	0.426	农药使用量	0.091	0.750
化肥利用率	0.273	0.650			

涵养能力及环境质量状况等指标。为提高水源地生态安全性,近期的对策措施如下。

a. 全面生态修复。加快水源保护林体系的过滤带、防护林带和封山育林带的建设;减少水土流失,实现水土流失强度指数低于 $500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;改善区域农业生产基础条件,减少 25° 坡度以上耕种面积;优化植被结构,加大阔叶林和毛竹林的结构比例^[14]。

b. 加强污染防治。进行区域污染排查,限期拆除排污口,针对农村村落、农田区、禽畜养殖等面源污染采取防治措施,禁止库区水产养殖和旅游开发,满足水库的TP质量浓度小于 $0.02\text{ mg}/\text{L}$,TN质量浓度小于 $0.2\text{ mg}/\text{L}$ ^[2]。

c. 提高环境监管能力。对划定的饮用水水源保护区树立标识牌、界桩及警示标志,完善水源地表水水质监控系统、重要污染源在线监测系统,建设水质突发事件预警与应急系统,加强水源地环境保护宣传,提高水资源利用效率,加强水资源统一管理。

3 结 论

a. 在区域生态安全评价方法与水库环境保护研究相结合基础上,构建水库型饮用水水源地生态安全评价指标体系,计算安全性指数值,丰富了区域生态安全评价的内容。将所建立的方法应用于天台县桐坑溪水库水源地生态安全性评价,其结果显示评价结论与实际状况较吻合。

b. 实施水源地生态安全评价可为水源地环境保护规划决策提供明确思路。通过对各层指标的指数值计算,找出影响生态安全的主要因素,有针对性地进行治理,实现指数值的改善,达到生态安全性指数的提高。

水源地生态安全评价中各指标安全性指数在实际环境保护工作中的优化空间及可操作性尚需进一步探讨。如林种结构指数达到理想状态所需的时间和投资,水源地居民点污水治理率达到理想状态和居民的外迁分别所需的投资等均需做深入研究。

参考文献:

[1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT K, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capita[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.

[2] 金相灿. 湖泊富营养化 控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 1-14.

[3] 李成茂, 马履一, 王小平. 密云水库集水区区域可持续发展评价及其调控对策研究[J]. 北京林业大学学报, 2005(27): 51-55.

[4] TENLEY M C, RICHARD G L. Alternative land use regulations and environmental impacts: assessing future land use in an urbanizing watershed[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71: 1-15.

[5] CHRISTOPHER L L, STEVEN E K, JEFFREY B, et al. Using GIS-based ecological-economic modeling to evaluate policies affecting agricultural watersheds[J]. *Ecological Economics*, 2005, 55: 467-484.

[6] SAID A, SEHLKE G, STEVENS D K, et al. Exploring an innovative watershed management approach: From feasibility to sustainability[J]. *Energy*, 2006, 31: 2373-2386.

[7] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.

[8] 刘红, 王慧, 张兴卫. 生态安全评价研究述评[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 74-78.

[9] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架结构[J]. 土壤, 2003(1): 2-8.

[10] 赵焕臣, 许树柏, 和金生, 等. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1-29.

[11] 何琼, 孙世群, 吴开亚, 等. 区域生态安全评价的AHP赋权方法研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(4): 433-437.

[12] ODYSSEUS G M. Development of ecological indicators—a methodological framework using compromise programming[J]. *Ecological Indicators*, 2002(2): 169-176.

[13] 杨时民, 刘兵, 李玉文. 组团式城市群生态安全系统分析[J]. 林业科学, 2006, 41(1): 100-104.

[14] 蒋文伟, 姜志林, 余树全, 等. 安吉主要森林类型水源涵养功能的分析与评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 71-74.

(收稿日期 2007-01-08 编辑 舒建)

(上接第 68 页)

[13] STARK K, PLAZA E, HULTMAN B. Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base[J]. *Chemosphere*, 2006, 62: 827-832.

[14] MARRONE P A, HODES M, KENNETH A S, et al. Salt precipitation and scale control in supercritical water oxidation. Part B: Commercial/full-scale applications[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2004, 29(3): 289-312.

[15] BERMEJO M D, FDEZ-POLANCO F, COCERO M J. Experimental study of the operational parameters of a transpiring wall reactor for supercritical water oxidation[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2006, 39: 70-79.

[16] STENDAHL K, JAFVERSTROM S. Phosphate recovery from sewage sludge in combination with supercritical water oxidation[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(1): 185-190.

(收稿日期 2007-01-17 编辑 舒建)