

基于综合权重灰色关联分析法的千鹤湖生态安全评价

邢广君¹, 赵孟伟^{2*}

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475002;

2. 河南省豫东水利工程管理局, 河南 开封 475002)

摘要:【目的】评价千鹤湖生态安全状况,有针对性地提出应对措施。【方法】基于“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)模型构建评价指标体系,采用专家打分法和熵值法相结合计算综合权重,利用灰色关联分析方法计算千鹤湖生态安全的关联度,以此对千鹤湖生态安全状况进行评估。【结果】社会经济影响层处于I级,水生态健康层处于IV级,服务功能层和管理调控层均处于III级,综合判断千鹤湖库区的安全生态状况所属的安全级别为III级;针对45项评价指标,计算I、II、III、IV、V级对方案层的贡献率,分别为2.05%、38.66%、34.19%、2.88%和22.22%;千鹤湖总体生态安全状况最重要的影响因素是长效管理机制构建,制约4个准则层生态安全的关键因素分别是单位面积点源COD负荷、综合营养指数、集中饮用水水质达标率和长效管理机制构建。【结论】千鹤湖生态安全处于一般级别,应加强对千鹤湖水生态健康层的保护,建立千鹤湖生态安全长效管理机制。

关键词:生态安全;综合权重;灰色关联分析;千鹤湖

中图分类号:

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180306

邢广君,赵孟伟. 基于综合权重灰色关联分析法的千鹤湖生态安全评价[J]. 灌溉排水学报,2019,38(3):121-128.

0 引言

随着全球环境与资源危机的日益加剧,生态安全问题已成为世界各国密切关注的热点,主要的生态安全问题包括水土流失、土地荒漠化、草场退化、森林资源危机、水资源短缺及生物多样性减少等^[1-3]。生态安全是由多种因素组成的自然生态系统,包括环境安全、生物安全和生态系统安全3个方面,是人类赖以生存、发展的物质基础,是构建和谐社会的重要保障,是社会经济的持续发展的重要因素。该概念一经提出,国内外学者对其展开了大量研究,主要集中在河流流域生态安全评价^[4-5]、地区城市生态安全评价^[6-8]、湖泊湿地生态安全评价^[9-10]以及生态安全评价方法^[11]等方面。李佩武等^[12]基于PSR概念模型,利用层次分析法与熵权法相结合对指标赋值,采用模糊综合法对深圳城市生态安全进行评价,结果表明,1997—2005年生态安全水平从临界安全向较安全状态发展;张凤太等^[13]基于PSR概念框架,构建均方差-TOPSIS模型对贵州2005—2012年水生态安全进行评价,结果显示水生态安全的压力和响应是影响贵州省水生态安全的关键且贵州整体水生态安全形势不容乐观;Wang等^[14]选取生态环境状况、社会经济压力等指标构建综合生态安全指标体系,对青海湖2000—2013年生态安全状况进行评价,结果表明整体生态安全逐步好转;Shi等^[15]构建了基于压力-状态-响应模型的生态安全指标体系,利用熵权法和层次分析法确定权重,评价了上海潮滩生态安全状况,结果显示崇明东滩和九段沙为生态敏感性并且生态安全较好。

当前水生态安全评价体系尚需完善,大多数是对城市水生态安全以及区域水资源生态安全的研究^[16-17],针对湖库生态安全的评价尚且少见,尤其是近年来新建的生态安全系统功能有待完善的人工湖库。加强新兴湖库水生态安全评价对于区域城市可持续发展具有重要意义,对其开展全面评价研究也属当务之急。

近年来,千鹤湖湖区的生态安全受到严峻威胁。因此,兹基于DPSIR模型构建3层次4因素45项指标的评价体系,利用专家打分法和熵值法相结合来计算综合权重,采用灰色关联分析模型对湖区的生态安全进

收稿日期:2018-05-30

作者简介:邢广君(1977-),女,硕士研究生,讲师,研究方向区域水资源优化配置、水生态安全管理等。E-mail: zfy12367@163.com

通信作者:赵孟伟(1990-),男,硕士研究生,研究方向区域水资源高效利用保持等。

行评估,根据分析结果对湖区采取相应措施进行修复,维护和保障生态系统的物质、能量良性循环,保持生态平衡,使生态环境满足于社会经济发展需要,使生态环境有利于人民健康状况改善和生活质量的提高。

1 研究区概况

千鹤湖水库于2004年建成,属于国家级中型水库,坐落于河南省鹤壁市,位于北纬 $35^{\circ}36'—36^{\circ}15'$,东经 $113^{\circ}19'—114^{\circ}17'$,属于海河水系卫河支流。千鹤湖流域位于温暖半湿润季风气候区,每年10月至翌年5月气候干燥,雨雪稀少;6—9月气候湿润多雨,年降水量655.3 mm,降水年度分布不均。千鹤湖属于人工淡水湖库,蓄水量6.08亿 m^3 ,可利用水资源量3.05亿 m^3 ,水域面积50.70 km^2 。湖库蓄水时间不长,淇河及千鹤湖生态系统发生较大变化,水生态环境尚不稳定,大量淹没区及即将淹没区污染物对库区水体水质的影响逐步显现。文中评价所采用的数据是2014年冬季在湖库内布置的生态安全监测点进行采样,实验室理化分析得到的实测数据。库区生态安全监测点具体布置如图1所示。



图1 水生态监测点位分布图

2 评价指标体系

目前,湖库生态安全评价指标的确定还没有达成共识。《湖泊生态安全调查与评估技术指南》中推荐的湖库生态安全评估模型为“驱动力—压力—状态—影响—响应”(DPSIR),该模型兼具DSR和PSR特点,整合了资源、发展、环境与人类健康等要素^[18],能够有效地反映湖泊生态影响、湖泊水生态系统健康、湖泊生态服务功能、人类的“反馈”措施对社会经济发展的调控及湖泊水质生态的改善作用等4个方面的相互关系。因此,根据此模型从社会经济影响(驱动力、压力)、水生态健康(状态)、服务功能(影响)和管理调控(响应)4个方面选定人口密度、人口增长率等45项指标建立评价指标体系,如表1所示。

3 研究方法

生态安全评价方法根据权重产生方法的不同主要分为主观赋权评价法和客观赋权评价法2大类。主观赋权评价法是根据专家或个人的知识和经验进行主观判断得到的权重,然后进行综合评价,其中包括专家打分法^[19]、层次分析法、综合评价法等,客观赋权评价法是根据指标的统计性质和各指标之间的相关关系来客观确定权重进行综合评价,其中包括熵权法、灰色关联分析法、神经网络分析法等^[20-22]。权重确定得是否合理,直接影响着评价结果的科学性,若某一指标的权重发生变化,整个评价结果将会受到影响。因此,权重的赋值必须做到科学和客观,这就要求寻找合适的权重确定方法。上述方法各有优缺点,为了保证本研究的评价结果更加科学合理,结合库区实际情况,本研究采用专家打分法与熵值法相结合计算综合权重,评价该人工水库的生态安全状况。

3.1 权重计算

3.1.1 专家打分法

该方法是由少数经验丰富的专家根据个人知识水平和研究经历并考虑反应某评价观点后定出权重,优点是概念清晰、简单易行,可抓住生态系统健康评价的主要因素。

本研究将评价指标做成调查表,邀请专家打分,满分为10分,分值越高表示越重要。通过对咨询结果进行整理,组成判断矩阵,以此计算指标的权重系数。假定准则层权重 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_i\}$,各准则层下指标层权重 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$,则指标层对于方案层的权重 $Q=\{q_1^1, q_2^1, \dots, q_p^1\}$ ($p=t \cdot k$),其中: $Q_i^j=y_i \cdot x_j$ 。

表1 湖库生态安全评价体系与分级标准

方案层	指标体系		单位	指标说明	分级标准				
	准则层(权重)	指标层(权重)			很安全 I级	安全 II级	一般 III级	不安全 IV级	很不安全 V级
社会影响	B1(0.3)	人口密度C1(0.019 2)	人/km ²	总人口/面积	200	400	800	1 000	2 000
		人口增长率C2(0.009 6)	%	(年末人口数-年初人口数)/年平均人口数×100%	10	20	40	60	80
		人均GDP C3(0.014 0)	元/人	GDP总量/总人口	100 000	50 000	30 000	10 000	5 000
		城镇用地比重C4(0.009 5)	%	城镇用地面积/总面积×100%	5	10	20	40	60
		耕地比重C5(0.005 5)	%	耕地/总面积×100%	30	40	50	70	90
		水利工程影响指数C6(0.008 9)	%	年水利投资总额/年GDP×100%	1	2	5	10	20
		单位面积面源COD负荷量C7(0.017 2)	t/(km ² ·a)	面源COD排放量/面积	10	50	100	200	500
		单位面积面源TN负荷量C8(0.019 5)	t/(km ² ·a)	面源TN排放量/面积	5	20	50	100	200
		单位面积面源TP负荷量C9(0.018 1)	t/(km ² ·a)	面源TP排放量/面积	1	5	10	20	50
		单位面积点源COD负荷C10(0.019 4)	t/(km ² ·a)	点源COD排放量/面积	10	50	100	150	300
		单位面积点源TN负荷C11(0.015 1)	t/(km ² ·a)	点源TN排放量 /面积	1	5	10	20	50
		单位面积点源TP负荷 C12(0.017 9)	t/(km ² ·a)	点源TP排放量 /面积	1	2	5	10	20
		主要入湖河流COD质量浓度C13(0.019 1)	mg/L	$C_1W_1 + \dots + C_nW_n$	0.1	1	2	5	10
		主要入湖河流TN质量浓度C14(0.019 1)	mg/L	$N_1W_1 + \dots + N_nW_n$	0.1	1	2	5	10
		主要入湖河流TP质量浓度 C15(0.019 1)	mg/L	$P_1W_1 + \dots + P_nW_n$	0.1	1	2	5	10
		生态安全评价	B2(0.2)	单位入湖河流水质C16(0.018 9)	mg/L	入湖水量/湖(库)蓄水量	0.1	0.2	0.4
溶解氧C17(0.011 7)	mg/L			参照 GB3838—2002	10	6	5	3	2
透明度C18(0.009 1)	m			参照 GB3838—2002	15	8	6	4	2
氨氮C19(0.009 8)	mg/L			参照 GB3838—2002	1	5	10	30	50
总磷C20(0.012 1)	mg/L			参照 GB3838—2002	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
总氮C21(0.012 7)	mg/L			参照 GB3838—2002	0.2	0.5	1	1.5	2
高锰酸盐指数C22(0.013 1)	mg/L			参照 GB3838—2002	2	4	6	10	15
水生态 叶绿素 a C23(0.012 2)	μg/L			参照 GB3838—2002	2	5	10	15	20
健康 综合营养指数C24(0.017 6)	mg/L			参照湖泊营养状态分级标准	10	20	40	50	60
沉积物总氮C25(0.012 0)	mg/kg			千鹤湖形成时间不长,沉积物总氮按土壤总氮测算	50	100	200	400	600
沉积物总磷C26(0.012 1)	mg/kg			沉积物总磷按土壤总磷测算	50	100	200	400	600
土壤有机质C27(0.013 4)	mg/kg			查阅相关文献	5	3	2	1	0.5
沉积物重金属风险指数C28(0.015 7)	无量纲			沉积物重金属含量按土壤中的重金属含量计算	0.2	0.5	0.7	0.8	1
浮游植物多样性指数C29(0.017 1)	无量纲			$-\sum(N_i/N)\log_2(N_i/N)$	10	7.5	5	2	1
浮游动物多样性指数C30(0.017 4)	无量纲			$-\sum(N_i/N)\log_2(N_i/N)$	5	2.5	2	1	0.5
底栖生物完整性指数C31(0.013 9)	无量纲			各构成指数的比值	1	0.6	0.4	0.2	0
服务功能	B3(0.2)	集中饮用水水质达标率C32(0.043 9)	%	(所有断面达标频次之和/全年所有断面监测总频次)×100%	100	90	80	60	40
		流域水质安全人口比例C33(0.038 3)	%	流域水质安全人口/流域总人口	100	85	70	50	40
		水源涵养指数C34(0.025 8)	%	湿地和沼泽覆盖率×0.5+林地覆盖率×0.35+草地覆盖率×0.15	0.4	0.2	0.1	0.05	0.01
		湿地面积占总面积的比例C35(0.022 3)	%	湿地面积/总面积×100%	20	10	5	2	1
		天然湖滨带比例C36(0.018 7)	%	天然湖滨带面积/(天然湖滨带面积+人工湖滨带面积)×100%	60	40	20	10	1
		湖滨带挺水植物覆盖度C37(0.018 2)	%	湖滨带挺水植物面积/湖滨带总面积×100%	0.5	0.3	0.2	0.1	0.01
		自然保护区级别C38(0.021 7)	无量纲	专家打分法,分值区间1~10	10	9	8	6	4
		珍稀物种生境代表性C39(0.027 4)	无量纲	专家打分法,分值区间1~10	10	9	8	6	4
管理调控	B4(0.3)	环保投入指数C40(0.051 0)	%	评价单元环境保护投资/评价单元地区生产总值×100%	0.3	0.2	0.1	0.05	0.01
		工业企业废水稳定达标率C41(0.064 4)	%	工业企业废水稳定达标率为85%	100	90	80	60	40
		城镇生活污水集中处理率C42(0.053 6)	%	各城镇污水处理厂的处理量/城镇污水产生总量	100	90	80	60	40
		农村生活污水集中处理率C43(0.050 8)	%	农村生活污水处理量/农村生活污水排放总量	100	80	60	40	20
		水土流失治理率C44(0.041 4)	%	某区域范围某时段内水土流失治理面积/原水土流失面积	100	80	60	40	20
长效管理机制构建C45(0.072 5)	无量纲	专家打分法,分值区间1~10	10	8	6	4	2		

3.1.2 熵值法

首先,构建评价指标的数据矩阵Z:

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

然后,将数据进行无量纲化处理,得到新的判断矩阵,其中元素的表达式为:

$$R = \{r_{ij}\}_{nm}, \quad (2)$$

根据 Weber-Fishna 定律^[23]进行无量纲化和标准化:

①正向型指标: $r_{ij}=x_{ij}/S_{ij}$, (3)

②负向型指标: $r_{ij}=S_{ij}/x_{ij}$, (4)

式中: x_{ij} 是 i 指标在采样 j 的实测值; S_{ij} 是指标因子的参考标准; r_{ij} 为评价指标的无量纲化值, 此处需满足 $0 \leq r_{ij} \leq 1$, 大于 1 的按 1 取值。

根据熵的定义, n 个样本 m 个评价指标, 可确定评价指标的熵为:

$$H = - \frac{\left[\sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right]}{\ln n}, \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}, \quad (6)$$

式中: $0 \leq H_i \leq 1$, 为使 $\ln f_{ij}$ 有意义, $f_{ij} = 0.00001$ 。

评估指标的熵权计算:

$$W_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^n H_i}, \quad (7)$$

式中: W_i 为评估指标的权重系数, 且满足 $\sum W_i = 1$ 。

准则层下指标的熵权:

$$W_i' = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (8)$$

式中: i 为各准则层指标的数目。

3.1.3 综合权重

根据专家打分法和熵值法分别确定的权重可以计算出综合权重, 公式为:

指标的综合权重: $RQ = \{rq_1, rq_2, \dots, rq_i\}$

准则层下指标的综合权重: $RY = \{ry_1, ry_2, \dots, ry_i\}$

3.2 评价模型

3.2.1 确定生态安全分级标准

指标标准值确定过程中, 主要参考: ①已有的国家标准、国际标准或经过研究已经确定标准尽量沿用其标准值; ②参考国内外具有良好特色的流域现状值作为分级标准; ③依据现有的湖库与流域社会、经济协调发展的理论, 定量化指标作为分级标准; ④对于那些目前研究较少, 但对其环境影响评价较为重要的指标, 在缺乏有关指标统计数据时, 暂时根据经验数据进行分级标准。各指标分级标准见表 1。

参考湖泊水库生态安全评估方法, 把千鹤湖生态安全等级分为很安全、安全、一般、不安全、很不安全 5 级。因此可以得到各级生态安全标准比较序列:

$$Y_j(k) = \{Y_j(1), Y_j(2), \dots, Y_j(n)\}, \quad (j=1, 2, 3, 4, 5), \quad (9)$$

式中: $Y_j(k)$ 为第 j 级生态安全标准中第 k 项评价指标的取值。

由于各指标系数数量纲不统一, 指标之间及指标内部不具有可比性, 因此所有数据都必须先进行无量纲化处理, 使各数据标准化而具备比较性, 根据 Weber-Fishna 定律进行无量纲化和标准化。

3.2.2 灰色关联分析模型

1) 样本序列

因为实测的样本指标有 45 个, 所以可以得到实测样本序列:

$$X_i(k) = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, \quad (10)$$

式中: $X_i(k)$ 为第 i 个样本序列中第 k 项评价指标的实测值。

2) 差序列

$$\Delta_{ij}(k) = |X_i(k) - Y_j(k)|, \quad (11)$$

3) 二级最大差和二级最小差

$$\Delta \max = \max_j \max_k |X_i(k) - Y_j(k)|, \quad (12)$$

$$\Delta \min = \min_j \min_k |X_i(k) - Y_j(k)|, \quad (13)$$

4) 关联系数

$$\varepsilon_{ij}(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta_{ij}(k) + \rho \Delta \max}, \quad (14)$$

式中： ρ 为分辨系数，取值范围在0~1之间，一般取0.5。

5) 关联度

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot \varepsilon_{ij}(k), \quad (15)$$

式中： ω_k 为由专家打分法和熵权耦合确定的综合权重。

6) 综合评价

求出第一个样本生态指标的关联度后，通过关联度大小的比较得出 R_{\max} ，即可确定该实测样本指标所处的生态安全等级。重复上述步骤即可得到其他实测指标所属的生态安全级别，最终得到所有实测指标的生态安全级别。

4 结果与分析

根据以上数据，由式(11)计算出归一化的差序列 $\Delta_{ij}(k)$ ；

结合式(12)和式(13)式可以计算出：

$$\Delta \max = \max_j \max_k |X_i(k) - Y_j(k)| = 1, \quad \Delta \min = \min_j \min_k |X_i(k) - Y_j(k)| = 0.$$

然后根据式(14)计算出的关联系数再结合式(15)可以得出关联度的值：

$$R = \{0.626, 0.697, 0.709, 0.679, 0.615\}.$$

由以上计算结果可以看出来 $R_{\max}=0.709$ ，则判断千鹤湖的生态安全状况处于III级，在参与评价的45项指标中有人口密度C1等12项指标处于I级，人均GDP C3等10项指标处于II级，耕地比重C5等10项指标处于III级，单位入湖河流水量C16等9项指标处于IV级，底栖生物完整性指数C31等4项指标处于V级。

图2为各指标的关联度。由图2可知，影响千鹤湖总体生态安全状况最重要的因素是长效管理机制构建，制约千鹤湖社会经济层、水生态健康层、服务功能层和管理控制层生态安全的关键因素分别是单位面积点源COD负荷、综合营养指数、集中饮用水水质达标率和长效管理机制构建。

同时，各级别指标对方案层的贡献率列于表2，由表2可知，处于II级安全状态的指标对千鹤湖生态安全状况的判定影响最大，随后依次是III级、V级、IV级

表2 各级别指标对方案层的方差贡献率 %

级别	I级	II级	III级	IV级	V级
方差贡献率	2.05	38.66	34.19	2.88	22.22

和I级，且III级和II级之间差别较小，综上所述，把千鹤湖的生态安全级别定为III级是合理的。

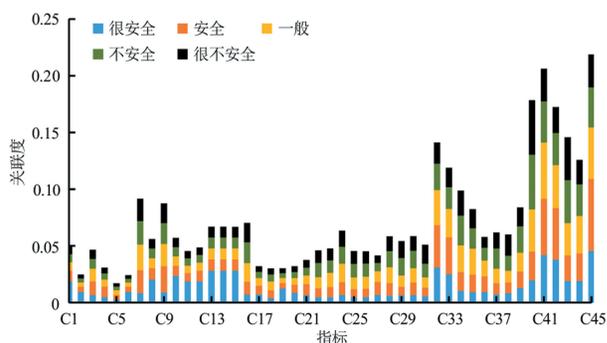


图2 各指标关联度

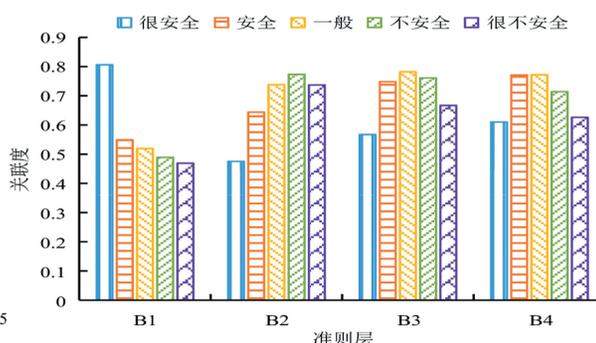


图3 各准则层关联度

同理，根据以上方法可以类推计算出各准则层指标相对于方案层的安全关联度，结果如图3所示。

据图3可以看出,各准则层关联度最大值分别为 $R_{B1}=0.806$ 、 $R_{B2}=0.773$ 、 $R_{B3}=0.782$ 、 $R_{B4}=0.772$,则可判断社会经济影响层B1处于I级,水生态健康层B2处于IV级,服务功能层B3处于III级,管理调控层B4处于III级。原因是评价社会经济影响层的16项指标中有人口密度C1等10项指标处于I级,人均GDP C3等3项指标处于II级,耕地比重C5等2项指标处于III级,单位入湖河流水量C16这一项指标处于IV级,因此得出社会经济影响层处于I级符合实际情况。同理,依照以上原因进行分析可以看出水生态健康层处于IV级,服务功能层处于III级,管理调控层处于III级也是符合实际情况的。

通过对社会经济影响层、水生态健康层、服务功能层、管理调控层这四个准则层所处的级别比较分析,我们同样可以得出千鹤湖的整体生态安全状况处于III级,这与利用45项指标来评价千鹤湖生态安全状况级别的结果保持一致。

5 讨论

本研究将专家打分法和熵值法相结合求出综合权重,然后利用灰色关联分析法进行评价,定量计算出千鹤湖库区的生态安全状况处于III级,与使用单一的权重计算方法相比,结果更加客观合理。王大洋等^[24]在对广西各市进行水资源管理水平评价时,利用层次分析-信息熵主客观相结合确定指标综合权重,评价结果较为准确;齐奇^[25]将熵权法和层次分析法相结合确定权重,采用综合指数法评价辽宁省2011—2015年的水生态安全状况,结果表明主客观结合的综合权重确定方法既避免了主观影响,又改进了熵权法中由于数据变异性偏差引起的与现实状况不对应的缺陷,权重确定客观合理;Shi^[15]等在上海潮滩生态安全状况评价中利用熵权法和层次分析法确定权重,结果同样表明评价结果真实可靠,较为接近实际状况。这说明基于综合权重的灰色关联分析模型是正确合理的,此方法在人工水库的生态安全评价研究领域中的应用尚属尝试,很大程度上丰富和发展了水生态安全评价方法,同时弥补和完善了生态安全评价体系的不足,今后可以推广该方法在河流域生态安全评价、地区城市生态安全评价、湖泊湿地生态安全评价以及生态安全评价方法的研究等方面的应用。

本文应用灰色关联分析方法评价千鹤湖生态安全状况,该方法在实际应用中可以较好地克服评价指标的灰色性和不确定性^[26],并且样本容量的大小没有强制要求,不需要典型的分布规律,计算量比较小,应用比较简便。从本文的评价结果来看,与千鹤湖生态安全实际情况比较相符,具有一定的科学性和合理性^[27]。

从评价结果来看,千鹤湖生态安全状况处于一般级别,有待进一步提高,当地政府需要对社会经济影响、水生态健康、服务功能以及管理调控各个环节加强管控力度,严格执行国家生态安全建设相关政策,确保千鹤湖生态安全健康可持续发展。

经过实地考察,千鹤湖上游至下游淇河段规划范围多属山区,实施调查的库区及沿河道流域内有12个乡镇,30多万人,工业以机械、采矿、食品加工为主,存在造纸污染企业;主要种植小麦、玉米、花生等作物,还有猪、羊、禽类等养殖业,区域面源污染主要是采矿、农业和畜禽牧养殖。千鹤湖流域山区存在散养和规模化养殖,对湖区营养物的输入影响较大,同时受到生活污水、水土流失、农田污染等影响,近几年湖区对外开放旅游,大量游客的涌入也造成了大量旅游垃圾对湖区的污染,湖区水体呈现一定的营养化趋势,对千鹤湖生态环境造成一定的影响。

针对以上问题,建议采取以下应对措施:①当地政府对采矿业、农业、养殖业规范管理,制定排污标准;②对生活污水进行先期的污水处理之后再排进湖库;③旅游区应大力宣传环保知识,景区内提供足够的垃圾箱,并派专人监督和制止乱丢垃圾等不文明行为。

本研究仅对湖库2014年的安全状况进行了评价,需要进一步整理、完善数据并开展多年安全状况变化特征研究,使得评价结果可以更准确地服务库区生态安全调控。

6 结论

1)根据社会经济影响、水生态健康、服务功能、管理调控这4个准则层所处级别分别为:I、IV、III、III级,综合得出千鹤湖生态安全级别为III级。

2)针对45项评价指标,计算I、II、III、IV、V级对方案层的贡献率,分别为2.05%、38.66%、34.19%、2.88%和22.22%,综合得到千鹤湖生态安全级别为III级。

3)千鹤湖总体生态安全状况最重要的影响因素是长效管理机制构建,制约4个准则层生态安全的关键

因素分别是单位面积点源COD负荷、综合营养指数、集中饮用水水质达标率和长效管理机制构建。

4)今后在千鹤湖库区生态安全保护方面应加强对水生态健康层的重视,服务功能层和管理调控也需要一定的投入。

5)当地政府应加强环保方面法律法规的制定,强化污水处理排放管理,加大引导监督力度,确保千鹤湖的生态安全状况定能得到有效改善。

参考文献:

- [1] 胡静霞,杨新兵.我国土地荒漠化和沙化发展动态及其成因分析[J].中国水土保持,2017(7):55-59.
- [2] 吕少宁,文军,康悦.黄河源区玛曲草原草场退化原因调查分析[J].生态经济,2011(2):166-170.
- [3] 胡彬,刘俊国,赵丹丹,等.基于水足迹理念的水资源短缺评价:以2022年冬奥会雪上项目举办地为例[J].灌溉排水学报,2017,36(7):108-116.
- [4] 申剑,史淑娟,周扬,等.基于改进灰色关联分析法的丹江口流域地表水环境质量评价[J].中国环境监测,2014,30(5):41-46.
- [5] 张松,郭怀成,盛虎,等.河流域生态安全综合评估方法[J].环境科学研究,2012,25(7):826-832.
- [6] 蒙晓,任志远,戴睿.基于压力-状态-响应模型的宝鸡市生态安全动态评价及预测[J].水土保持通报,2012,32(3):231-235.
- [7] 吴晓,吴宜进.基于灰色关联模型的山地城市生态安全动态评价:以重庆市巫山县为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(3):385-391.
- [8] JIANG X. Urban Ecological Security Evaluation and Analysis Based on Fuzzy Mathematics[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4 451-4 455.
- [9] 钟振宇,柴立元,刘益贵,等.基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估[J].中国环境科学,2010,30(S1):41-45.
- [10] 刘艳艳,吴大放,王朝晖.湿地生态安全评价研究进展[J].地理与地理信息科学,2011,27(1):69-75.
- [11] 魏彬,杨校生,吴明,等.生态安全评价方法研究进展[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2009,35(5):572-579.
- [12] 李佩武,李贵才,张金花,等.深圳城市生态安全评价与预测[J].地理科学进展,2009,28(2):245-252.
- [13] 张风太,苏维钧.基于均方差-TOPSIS模型的贵州水生态安全评价研究[J].灌溉排水学报,2016,35(9):88-92.103.
- [14] WANG H, LONG H L, LI X B, et al. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(2): 341-354.
- [15] SHI Y H, LI J Q, XIE M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 729-741.
- [16] 赵静静,柴立和,杜慧滨.基于MIEP模型的城市生态安全评价—以宁波市为例[J].环境科学学报,2015,35(9):2 989-2 995.
- [17] 代稳,张美竹,秦趣,等.基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J].环境科学与技术,2013,36(12):228-233.
- [18] 李玉照,刘永,颜小品.基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(6):971-981.
- [19] 郭平,马继涛,李鑫,等.一种基于专家打分权重的迭代算法构建与应用[J].昆明理工大学学报,2013,38(2):108-116.
- [20] 陈丽君,张兆同.我国有效灌溉面积影响因素的灰色关联分析[J].灌溉排水学报,2015,34(8):92-95.
- [21] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2 041-2 046.
- [22] 杨咪,屈文岗,钱会.基于熵权的贝叶斯模型及其在水质评价中的应用[J].灌溉排水学报,2018,37(1):85-90.
- [23] 李祚泳,彭荔红.基于韦伯-费希纳推广定律的环境空气质量标准[J].中国环境监测,2003,19(4):17-19.
- [24] 王大洋,莫崇勋,钟欢欢,等.基于综合权重可变模糊集的最严格水资源管理评价[J].人民珠江,2016,37(5):10-14.
- [25] 齐奇.基于PSR模型和层次分析—熵权法的水生态安全评价研究[J].水利发展研究,2017,17(10):57-61.
- [26] 侯保灯.基于灰色关联分析法的溃坝生命损失综合评价模型[J].水力发电,2012,38(10):76-80.
- [27] 侯保灯,李佳蕾,潘妮,等.基于改进熵权的灰色关联模型在湿地水质综合评价中的应用[J].安全与环境学报,2008,8(6):80-83.

Assessing the Ecological Health of Qianhe Lake Using Grey Correlation Analysis Method

XING Guangjun¹, ZHAO Mengwei^{2*}

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute;

2. Water Conservancy Administration Bureau of eastern Henan province, Kaifeng 475002, China)

Abstract:【Objective】 Keeping catchment ecology healthy is a critical criterion in developing sustainable ecosystems, and this paper presents an grey correlation method to analyze the ecological health of Qianhe Lake.【Method】 The research was based on baseline-survey of water ecology, water environment and social economy in the basin, and the ecological security of the lake was evaluated using the comprehensively-weighted grey correlation analysis model.【Result】 Social and economic impact layer was at level I, water ecological health layer was at level IV, and service function layer and the management control layer were at level III. The overall ecological health of the lake was at level III. For all 45 factors we analyzed, those at level I, II, III, IV and V contributed to the overall ecological health by 2.05%, 38.66%, 34.19%, 2.88% and 22.22%, respectively. The main factors af-

fecting the ecological security was social economic layer, while the water ecological health layer, service functions layer and management control layer were affected by point-source COD load per unit area, comprehensive nutrition index, the rate of compliance to centralized drinking water quality, and construction of long-acting management mechanism, respectively. **【Conclusion】** The ecological health of the Qianhe lake is at general-security level, and its future improvement should focus on protecting the ecological health layer and establishing a long-term management system.

Key words: Qianhe lake; ecological security; comprehensive weight; gray correlation analysis

责任编辑:赵宇龙

(上接第113页)

Analyzing the Effect of Reducing Aquifer Pumping from the Subsidized Center on Groundwater Utilization in Beijing Plain

QIN Huanhuan^{1,2}, ZHENG Chunmiao³, SUN Zhanxue^{1,2}, GAO Bai²

(1.State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2.School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, South University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract:【Objective】The objective of this paper is to study the influence of reducing groundwater pumping from the subsidized center on groundwater utilization in Beijing Plain. **【Method】**Based on the unsteady groundwater flow model and scenario analysis, four scenarios (BAU, PR100, PR50 and PR520) were designed to simulate the impact of groundwater-pumping reduction from the subsidized center on the groundwater utilization in Beijing plain. **【Result】**On average for the prediction period, scenario BAU will deplete 116 million m³ aquifer storage per year, while scenarios PR100, PR50 and PR520 will recover 352, 118 and 283 million m³ aquifer storage per year, respectively. An exploitation scenario R, which meets the land subsidence control goal in the future, is designed through the analysis of the above scenarios: pumping reduction amounts in the subsidence centers are 0.051 billion m³/a (100% reduction), 0.012 billion m³/a (20% reduction) and 0.18 billion m³/a (50% reduction) in zones Baxianzhuang, Tianzhu and Wangsiying, respectively. The total pumping amount is 1 928 million m³/a. **【Conclusion】**Groundwater pumping reduction in the subsidence center can effectively recover the groundwater level and aquifer storage and is the most direct and effective method to solve the serious groundwater overexploitation and related land subsidence in Beijing. However, the proportion of groundwater pumping reduction should be reasonably determined to ensure the coordinated development of social economy and groundwater.

Key words: groundwater pumping reduction; Beijing plain; subsidence center; scenario analysis

责任编辑:陆红飞