

层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价

庞振凌¹, 常红军², 李玉英¹, 张乃群¹, 杜瑞卿^{1,*}, 胡兰群³

(1. 南阳师范学院生命科学院, 河南南阳 473061; 2. 河南安阳师范学院, 河南安阳 455002;

3 南阳市环境保护监测站, 河南南阳 473000)

摘要:层次分析法(AHP)是一种多指标多因素综合评价法,其理论内容深刻而表现形式简单,包括递阶层次结构模型、判断矩阵的建立及其求值、一致性检验和综合指数计算等运算过程。在南水北调中线水源区3个采样点进行了2a的水体浮游植物和9项理化指标的检测,并应用层次分析法通过季节4因素和6项理化指标对水质进行综合评价。结果表明:层次分析综合指数 PI 在3采样点有差异并且变化灵敏,渠首(陶岔 S_1) $PI=0.5697$,水质属于污染;库心(小太平洋 S_2) $PI=0.3619$,水质属于尚清洁;丹江入库上游(大石桥 S_3), $PI=0.7755$,水质属于中污染;AHP分析结果与实际基本相符。根据结果分析认为:层次分析法做为综合评价法对水质评价有重要性,值得推广应用;丹江口水库是重要的水资源,但目前水质状况并不理想,因此做好水源区的长期生态监测,加强理论和技术研究,改善水质,极为重要。

关键词:南水北调中线水源区;浮游植物生物检测;理化检测;层次分析法;水质评价

文章编号:1000-0933(2008)04-1810-10 中图分类号:X824 文献标识码:A

Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China

PANG Zhen-Ling¹, CHANG Hong-Jun², LI Yu-Ying¹, ZHANG Nai-Qun¹, DU Rui-Qing^{1,*}, HU Lan-Qun³

1 Department of Life Science, Nanyang Teachers' College, Nanyang 473061, China

2 Anyang Teachers' College, Anyang 455002, China

3 Nanyang Environmental Prevention and Supervision Station, Nanyang 473000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1810 ~ 1819.

Abstract: Based on four seasons of monitoring phytoplankton communities and 9 water quality variables-total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll a, chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), dissolved oxygen (DO), secchi depth (SD), pH and water temperature (T) at three observatory sites, the water quality of Danjiangkou Reservoir was evaluated using Analytic Hierarchy Process (AHP). The biological diversity index showed the reservoir to be mesotrophic. The water quality variables showed that the reservoir belonged to grade III according to the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838-2002) of China, which suggested the reservoir status could be regarded as lightly polluted. AHP evaluation showed that the water quality was different between the three sample sites, of which the middle reservoir site was the cleanest site (pollution index = 0.3619) and the upper reservoir site was the worst (pollution index = 0.7755). This study indicates that more attention is required for the upstream pollution of the

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0511030700)

收稿日期:2007-01-15; 修订日期:2007-12-12

作者简介:庞振凌(1956~),女,河南内乡人,副教授,从事生态学教学与研究。

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: duruiqing8@163.com

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of Henan Province (No. 0511030700)

Received date: 2007-01-15; **Accepted date:** 2007-12-12

Biography: PANG Zhen-Ling, Associate professor, mainly engaged in ecology.

Danjiangkou Reservoir, and that AHP is a useful tool for water quality evaluation in surface water bodies such as Danjiangkou Reservoir.

Key Words: Danjiangkou Reservoir; the middle line project of transfer water from south to north; biological diversity index; analytical hierarchy process; water quality assessment

南水北调中线水源区——位于豫、鄂、陕三省交界处的丹江口水库,是亚洲最大的人工淡水湖,控制流域面积 $9.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,总库容量达 $408.5 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$,取水源头在河南省南阳市境内包括西峡、淅川和内乡 3 个县(图 1)。丹江口水库的入库河流水量大,水质较好。但随着库区周围地区经济的不断发展,自然和人为因素使入库干、支流水质发生变化,必将影响丹江水库的水质^[1,2]。

水环境决定了生物种群或群落结构特征。生物个体、种群或群落的变化,同样可以客观反映出水体质量的变化规律^[3,4]。在水环境中,许多化合物和潜在的污染物质所产生的有害生物效应往往是现有的分析手段无法测出的。因此,对水源水质的科学评价要在生态调查基础上从理化和生物学角度综合进行。水环境质量的评价,往往涉及到多指标,而每项指标的实测值与水环境质量标准的分类级别指标值相比,表现出参差不齐。如果仅从某一两项指标来确定水质类别,既是困难的,也是不全面、不科学的,应该采用多指标合理的综合评价法,对水质做出客观的评价。

层次分析法(AHP)是 20 世纪 70 年代中期由美国学者 T L. Saaty 创立的一种能用来处理复杂的社会、政治、经济、科学技术等决策问题的新方法^[5]。由于 AHP 具有理论内容深刻而表现形式简单,并能统一处理决策中的定性与定量因素的特点而广泛用于许多领域。环境分析与评价实际上是一个多因素综合决策过程,因而将 AHP 应用于环境质量评价不但可行,而且具有简单、有效、实用的特点。但文献检索表明,目前国内 AHP 在水环境质量评价方面应用不多,特别是在南水北调中线工程水源环境质量评价上尚未见报道。

作者在深入广泛的科学调研基础上,利用所获得的理化和生物学指标值,采用层次分析法对丹江口水库水质,进行了综合评价,旨在为南水北调中线工程水源环境的保护、持续发展规划、科学研究提供一定的依据,同时为建立水源区生态监测机制提供基础资料。

1 研究方法

1.1 采样点布设

国家环境监测总站授权南阳市环境保护监测站监测南水北调中线水源区而设置的 S1、S2 和 S3 依次为渠首(陶岔)、库心(小太平洋)和丹江入库上游(大石桥)3 个水质监测点(图 1)。

1.2 样品采集与鉴定

1.2.1 水样采集

2004 年 3 月至 2006 年 8 月,分季节在 S1、S2、S3 等 3 个点按水样采集标准采集生物检测样和理化检测样。现场进行水温 $T(\theta_{\text{H}_2\text{O}})$ 、溶解氧(DO)和 pH 等部分理化指标的常规检测。定性样品用 25 号浮游植物采集网采集,定量样品用采水器分层采取 1000 ml,现场加鲁哥氏液固定。实验室浓缩样品并进行种类鉴定^[6,7]。

1.2.2 浮游植物的鉴定和细胞计数

定性样品:取定性水样在普通显微镜下鉴定,将浮游植物鉴定到种或属^[8~10]。

定量样品:将加有固定液的水样按常规方法沉淀、去除上清液、收集藻类细胞、定容至 30 ml,用浮游植物计数框在光学显微镜下作定量计数。计数时充分摇匀后取 0.1ml 浓缩液于 0.1 ml 计数框中,在 10 × 40 倍显微镜下观察,计数 100 个视野,然后换算成每升水样中藻类的细胞个数^[11,12]。

1.2.3 多样性指数的计算

藻类多样性指数分别运用 Margalef 多样性指数计算公式 $d = (S - 1) / \ln N$ 和 Menkinick 多样性指数计

算公式 $\alpha = (S/N) \times 1000$ 进行计算. 式中 d 和 α 均表示多样性指数, S 为种类数, N 为细胞密度^[13,14]。

1.2.4 水质的理化检测

S1 水质的理化检测由设在渠首的自动监测仪测定 (同时进行人工平行样测定)。其它两个点的水温 T (θ_{H_2O})、pH、溶解氧 DO 由便携式仪器测定。透明度采用塞氏盘法测定。总磷 (TP)、总氮 (TN)、生物耗氧量 (BOD)、化学耗氧量 (COD) 参照 2002 年《水和废水监测分析方法 (第 4 版)》测定^[6]。

1.3 层次分析法

层次分析法的原理和步骤^[16] 是通过建立层次分析结构模型, 构造判断矩阵, 利用求特征值的方法, 确定各环境因子重要性权重^[15]。再根据综合权重按最大权重原则来确定水相应污染程度。

1.3.1 明确问题, 建立层次结构

用层次分析法来确定水体环境影响评价中各环境组成和环境因子的权重时, 首先需要将被评价的环境组成和环境因子按照评价的目标层次进行排列, 建立起层次结构的综合评价体系, 见图 2。

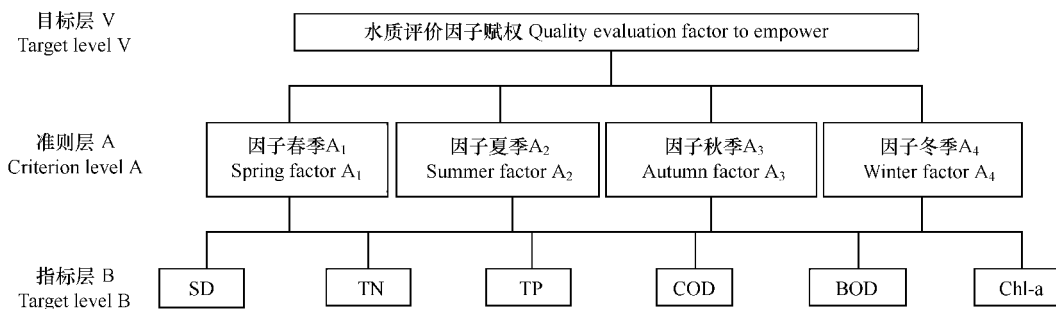


图2 水质综合评价层次结构体系

Fig. 2 Level structure system of water quality synthesis evaluation

1.3.2 建立判断矩阵

(1) V-A 层 (准则层) 判断矩阵

根据四季在综合评价中的重要性, 即依据各季指标值的大小, 确定它们之间的相对重要性, 然后依据比较标度法^[17], 春夏同等重要, 秋冬同等重要, 春夏较秋冬稍微重要, 于是可得准则层判断矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

(2) A-B 层 (指标层) 判断矩阵

(1) 标准化处理

标准化处理就是把每个采样点的每季每个指标测量值除以每个指标允许的最大值 (C_s)。由于透明度 (SD) 要转化成反向指标, 即标准化值越小水质越好, 所以标准化值 = C_s / SD , 即指标允许的最大值 (C_s) 除以指标测量值。3 个采样点的实测值见表 1。标准化值见表 2。

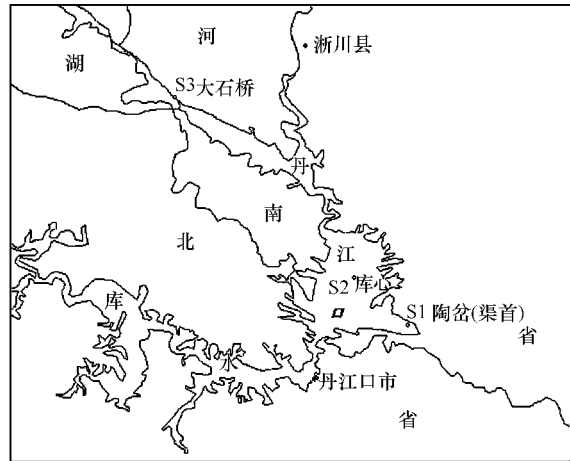


图1 采样点布设位置

Fig. 1 Location of the sampling sites of water source area

S1: 陶岔 (渠首) Taocha (Qushou); S2: 库心 Kuxin; S3: 大石桥 Dashiqiao; 下同 the same below

表 1 南水北调中线水源区理化检测结果

Table 1 The result of physicochemical monitoring on water source area of the middle line project of transferring water from south to north

采样点 Sampling point	采样时间 Sampling time	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH	DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	透明度(SD) Transparency (m)	TN ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	BOD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Chl-a ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
S1	春季 Spring	10.2	6.91	8.37	1.40	0.835	0	10	2	0.006
	夏季 summer	23.0	7.32	8.15	1.50	0.827	0	10	2	0.007
	秋季 autumn	27.4	7.50	7.67	0.90	0.717	0.005	12.6	2.34	0.005
	冬季 winter	18.6	8.33	8.12	2.50	0.709	0.005	17.9	4.1	0.002
S2	春季 Spring	10.0	6.94	8.74	3.77	0.714	0	10	2	0.004
	夏季 summer	22.0	7.32	8.49	2.10	0.726	0	10	2	0.005
	秋季 autumn	27.0	8.47	7.02	2.65	0.637	0.005	11.0	2.27	0.002
	冬季 winter	19.6	8.29	8.24	3.00	0.614	0.005	10.0	2.00	0.001
S3	春季 Spring	17.0	8.35	7.06	1.50	0.872	0.001	20.0	3.99	0.005
	夏季 summer	22.0	7.70	7.85	1.60	0.856	0.001	18.0	3.24	0.007
	秋季 autumn	21.0	8.34	6.78	1.00	0.805	0.006	15.4	3.54	0.003
	冬季 winter	18.5	7.53	7.69	2.80	0.750	0.006	16.4	4.0	0.001
CS					0.12	7.00	1.20	54.0	12.00	10.00

S1, S2, S3 三采样点 Three sample point; T : 水温 Water temperature; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; BOD: 生化需氧量 Biochemical oxygen demand; Chl-a: 叶绿素 Chlorophyll; CS: 各指标允许的最大值 CS indicators of the maximum permissible

(2) 建立判断矩阵

每采样点每季 6 指标值依据标度法^[17]形成 6×6 矩阵, 每采样点形成 4 个判断矩阵。具体如下:

① 令因子 $A_k (k=1, 2, 3, 4)$ 的 6 个指标的标准化值为 $\beta_{kj} (j=1, 2, 3, 4, 5, 6)$

② 对于准则 A_k , 令 $\beta_{k1} = \max\{\beta_{kj} \mid j=1, 2, 3, 4, 5, 6\}, k=1, 2, 3, 4$

$\beta_{k2} = \min\{\beta_{kj} \mid j=1, 2, 3, 4, 5, 6\}, k=1, 2, 3, 4。$

$$\Delta_k = \frac{\beta_{k1} - \beta_{k2}}{9} (9 \text{ 为标度值}) \quad (1)$$

表 2 南水北调中线水源区理化检测结果标准化值

Table 2 The result on Standardized value of physicochemical monitoring on water source area of the middle line project of transferring water from south to north

采样点 Sampling point	采样时间 Sampling time	透明度(SD) Transparency	TN	TP	COD	BOD	Chl-a
S1	春季 Spring	0.0852	0.1193	0	0.1852	0.1667	0.0006
	夏季 Summer	0.0804	0.1181	0	0.1852	0.1667	0.0007
	秋季 Autumn	0.1333	0.1024	0.0042	0.2333	0.1950	0.0005
	冬季 Winter	0.0480	0.1013	0.0042	0.3315	0.3417	0.0002
S2	春季 Spring	0.0318	0.1020	0	0.1852	0.1667	0.0004
	夏季 Summer	0.0571	0.1037	0	0.1852	0.1667	0.0005
	秋季 Autumn	0.0452	0.0910	0.0042	0.2037	0.1892	0.0002
	冬季 Winter	0.0400	0.0877	0.0042	0.1852	0.1667	0.0001
S3	春季 Spring	0.0800	0.1246	0.0008	0.3704	0.3258	0.0005
	夏季 Summer	0.0750	0.1223	0.0008	0.3333	0.2700	0.0007
	秋季 Autumn	0.1200	0.1150	0.0050	0.2852	0.2950	0.0003
	冬季 Winter	0.0428	0.1071	0.0050	0.3037	0.3333	0.0001
CS		0.12	7.00	1.20	54.00	12.00	10.00

CS 各指标允许的最大值; 透明度(SD) 取反向指标, 标准化值 = G_s / SD CS indicators of the maximum permissible; Transparency (SD) is a reverse indicator, Standardized value = CS / SD

$$\textcircled{3} \text{ 设 } \gamma_{st} = \frac{\beta_{ks} - \beta_{kt}}{9} \quad (s, t = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (2)$$

④对于任意的 β_{ks} 与 β_{kt} 相比,其判断矩阵元素 b_{st} 由以下确定;

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } |\gamma_{st}| \leq 1, \text{取 } b_{st} = 1 \\ \text{当 } \gamma_{st} > 1, \text{取 } b_{st} = \gamma_{st} \\ \text{当 } \gamma_{st} < -1, \text{取 } b_{st} = \frac{-1}{\gamma_{st}} \\ b_{st} = \frac{1}{b_{ts}} \quad b_{ss} = 1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

利用公式(1)、(2)、(3),每采样点每季形成一个 6 阶方阵,每采样点可形成 4 个判断矩阵:

$$B_k = (b_{st})_{s \times t} \quad (s, t = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (k = 1, 2, 3, 4,)$$

1.3.3 求解特征值和特征向量

常用的计算方法有方根法和积法 2 种,方根法的主要步骤如下:

令判断矩阵 $A = (a_{st})_{s \times t} \quad (s, t = 1, 2, 3, \dots, n)$

计算判断矩阵每一行元素的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, a_{ij} 是判断矩阵元素。

(2) 计算 M_i 的 n 次方根 $\overline{W}_i$:

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (5)$$

(3) 对向量 $\overline{W} = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \dots, \overline{W}_n]$ 正规化:

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i} \quad (6)$$

对向量 $\overline{W}$ 做正规化后得到特征向量 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ 是最大特征值对应的特征向量。

用公式(4)、(5)、(6)可以求出 $B_k = (b_{st})_{s \times t}$ 的归一化特征向量。

(4) 计算判断矩阵的最大特征值。

由矩阵理论可知判断矩阵 B_k 有最大特征根,其值由下式求得:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^6 \frac{B_{kj} W_j^T}{6 W_j} \quad (7)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 是判断矩阵 B_k 的最大特征值; B_{kj} 表示判断矩阵 B_k 的 j 行向量, W^T 为 B_k 的归一化特征向量(列向量), W_j 为 W^T 的第 j 行元素。

1.3.4 一致性检验

对上述计算结果进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 6}{6 - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中, RI 为平均随机一致性指标,其值见表 3^[17]。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,否则需要对判断矩阵进行调整。

表 3 平均一致性指标
Table 3 Average consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

1.3.5 水环境质量综合评价指数的计算

以 S1 为例,简述水环境质量综合评价指数的计算。

设 VA 是判断矩阵 A 特征向量(行向量), $S1D$ 是 $S1$ 采样点 4×6 的标准化值的矩阵, $S1C$ 是 $S1$ 采样点 4 个判断矩阵特征向量(最大特征值对应的特征向量)组成的 4×6 矩阵。

$$\text{综合指数} \quad PI = \sum_{i=1}^4 (S1D_i) \times (S1C_i)^T \times VA_i \quad (9)$$

式中, $S1D_i$ 、 $S1C_i$ 分别是 $S1D$ 、 $S1C$ 的行向量, VA_i 是 VA 的元素。

以上运算用 MATLAB 软件编程计算。

2 结果与分析

2.1 水源区浮游植物检测结果及分析

3 个采样点共检测到藻类 8 门 63 属 96 种及变种, 其中硅藻门 22 属 43 种及变种; 绿藻门 23 属 32 种及变种; 蓝藻门 10 属 11 种; 甲藻门 3 属 3 种; 裸藻门 1 属 3 种; 黄藻门 2 属 2 种; 金藻门 1 属 1 种和隐藻门 1 属 1 种。浮游植物的细胞密度是水生生态系统功能和水质评价的重要参数之一, 结果见表 4。种类多样性指数是常用的水质评价指标, 主要依据藻类细胞密度和种群结构的变化评价水体的污染程度, 通常情况下指数值越大, 水质越净^[12]。表 4 列举了应用 Margalef 多样性指数和 Menkiniek 多样性指数计算公式, 对各采样点浮游植物的种类多样性进行计算的结果。

表 4 南水北调中线水源区藻类年均细胞密度与种类多样性指数

Table 4 Annual average cell density and diversity index of species in water source area of the middle line project of transferring water from south to north

采样点 Sampling point	种数 Species number	细胞密度 ($\times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)	污染指示种 Indicator species				多样性指数 Diversity index	
			β -中污	β - α -中污	α -中污	寡污	d	a
S1	56	126.61	17	3	2	12	3.91	49.77
S2	63	103.73	12	1	0	8	4.48	61.86
S3	59	97.64	15	3	1	8	4.21	59.71

评价标准 Evaluated standards (Margalef, 1958; James&Jerrold, 1977): $d > 3$, 轻或无污染 Oligosaprobic or cleanness; $d = 1 - 3$, 中污染 Mesosaprobic; $d = 0 - 1$, 重污染 Hypersaprobic; $\alpha = 5$, 清洁 Cleanness; $\alpha > 4$, 寡污 Oligosaprobic; $\alpha > 3$, β -中污 β -mesosaprobic; $\alpha < 3$, α -中污 α -mesosaprobic

从生物学角度看, 污染指示种显示水质应属于 β -中污; 从多样性指标值 d 来看, 水质应属于轻污染。但从表 1 的理化指标值与“地表水环境质量标准 GB3838-2002”比较, 很多指标已达到 III 类水质, 水质应属于污染状态。生物学指标考查, 对水质评价有一定的参考价值。

2.2 水源区理化检测指标结果及分析

3 个检测点同步理化检测结果见表 1。从单项指标看, 根据“地表水环境质量标准 GB3838-2002”, 总氮(TN)、生物耗氧量(BOD)、化学耗氧量(COD) 指标值属于 III 类水质标准。由于温度、pH 没有分级, 溶解氧(DO)变化不大, 都属于 I 类水质标准, 所以在影响结果不会太大的情况下, 为了减少计算量, 采用 TN(总氮)、TP(总磷)、COD(化学需氧量)、BOD(生化需氧量)、Chl-a(叶绿素)、SD(透明度)六项指标按春、夏、秋、冬四季分别对 3 个采样点进行层次分析, 分析层次结构见图 2, 分析结果如下:

2.2.1 权重系数及综合评价指数

利用公式(4)、(5)、(6), 计算出准则层判断矩阵 A 的最大特征值对应的特征向量 $VA = [0.6864 \ 0.6708 \ 0.2236 \ 0.2236]$, 也就是春、夏、秋、冬四季权重系数依次为: 0.6864 0.6708 0.2236 0.2236。利用公式(7)、(8), 一致性检验: $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性。

$S1$ 的标准化矩阵 $S1D$:

$$S1D = \begin{bmatrix} 0.0852 & 0.1193 & 0 & 0.1852 & 0.1667 & 0.0006 \\ 0.0804 & 0.1181 & 0 & 0.1852 & 0.1667 & 0.0007 \\ 0.1333 & 0.1024 & 0.0042 & 0.2333 & 0.1950 & 0.0005 \\ 0.0480 & 0.1013 & 0.0042 & 0.3315 & 0.3417 & 0.0002 \end{bmatrix}$$

利用公式(4)、(5)、(6)计算 S1 的 4 个判断矩阵的特征向量,并形成 S1 的特征向量矩阵 $S1C$:

$$S1C = \begin{bmatrix} 0.2367 & 0.2944 & 0.0606 & 0.6910 & 0.6103 & 0.0608 \\ 0.1797 & 0.2965 & 0.0613 & 0.6991 & 0.6193 & 0.0616 \\ 0.2568 & 0.1977 & 0.0642 & 0.7645 & 0.5499 & 0.0631 \\ 0.0903 & 0.1401 & 0.0715 & 0.6855 & 0.7016 & 0.0698 \end{bmatrix}$$

它表示各指标在各个季节上的权重系数。

利用公式(7)、(8),S1 的四个判断矩阵的 $CR < 0.1$,判断矩阵具有满意的一致性。

依据公式(9)计算 S1 的综合评价指数 PI , $PI = 0.5697$

根据水质分级标准(见表 5)^[17],S1 采样点的水质已属污染状态,从各分指标来看,根据“地表水环境质量标准 GB3838-2002”,总氮(TN)、生物耗氧量(BOD)、化学耗氧量(COD)指标属于 III 类水质标准。评价结果也基本上与实际情况符合。

与 S1 的计算过程相同,S2 和 S3 的结果如下:

S2 的标准化矩阵 $S2D$:

$$S2D = \begin{bmatrix} 0.0318 & 0.1020 & 0 & 0.1852 & 0.1667 & 0.0004 \\ 0.0571 & 0.1037 & 0 & 0.1852 & 0.1667 & 0.0005 \\ 0.0452 & 0.0910 & 0.0042 & 0.2037 & 0.1892 & 0.0002 \\ 0.0400 & 0.0877 & 0.0042 & 0.1852 & 0.1667 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

S2 的 4 个判断矩阵的特征向量形成 S2 的特征向量矩阵 $S2C$:

$$S2C = \begin{bmatrix} 0.9688 & 0.1109 & 0.1103 & 0.1114 & 0.1113 & 0.1103 \\ 0.1362 & 0.2583 & 0.0629 & 0.7074 & 0.6375 & 0.0631 \\ 0.1102 & 0.2004 & 0.0669 & 0.7067 & 0.6630 & 0.0649 \\ 0.0870 & 0.1572 & 0.0748 & 0.6662 & 0.7163 & 0.0724 \end{bmatrix}$$

S2 的 4 个判断矩阵的 $CR < 0.1$,判断矩阵具有满意的一致性。

依据公式(9)计算 S2 的综合评价指数 PI , $PI = 0.3619$

根据水质分级标准(见表 5)^[17],S2 采样点的水质属尚清洁状态,从各分指标值来看,S2 采样点总体上好于 S1。S2 是库心,水质受环境影响较小,水质较好。

S3 的标准化矩阵 $S3D$:

$$S3D = \begin{bmatrix} 0.0800 & 0.1246 & 0.0008 & 0.3704 & 0.3258 & 0.0005 \\ 0.0750 & 0.1223 & 0.0008 & 0.3333 & 0.2700 & 0.0007 \\ 0.1200 & 0.1150 & 0.0050 & 0.2852 & 0.2950 & 0.0003 \\ 0.0428 & 0.1071 & 0.0050 & 0.3037 & 0.3333 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

S3 的 4 个判断矩阵的特征向量形成 S3 的特征向量矩阵 $S3C$:

$$S3C = \begin{bmatrix} 0.1227 & 0.1555 & 0.0683 & 0.7334 & 0.6431 & 0.0682 \\ 0.1256 & 0.1741 & 0.0688 & 0.7960 & 0.5575 & 0.0688 \\ 0.1685 & 0.1645 & 0.0614 & 0.6741 & 0.6948 & 0.0603 \\ 0.9690 & 0.1103 & 0.1099 & 0.1112 & 0.1113 & 0.1098 \end{bmatrix}$$

S3 的 4 个判断矩阵的 $CR < 0.1$,判断矩阵具有满意的一致性。

依据公式(9)计算 S3 的综合评价指数 PI , $PI = 0.7755$

S3(大石桥)居于上游,受环境影响较大,各项理化指标值总体水平大于 S1(渠首)、S2(库心),而且大多数指标值达到 III 类水质标准,有的接近 IV 类水质标准。综合评价指数 PI 为 0.7755,水质属于中污染水平。

表 5 水质的分级标准

Table 5 Water quality graduation standard

级别 Level	I	II	III	IV	V	VI	VII
<i>PI</i>	<0.10	<0.24	<0.38	<0.50	<0.70	<0.90	>0.90
标准 Standard	最清洁 Cleanest	清洁 Clean	尚清洁 Still clean	轻污染 Light Pollution	污染 Pollution	重污染 Pollution	严重污染 Serious pollution

2.2.2 水质营养状态

从各项指标值与水质营养状态划分标准对比来看,大部分指标值已达中营养水平以上。利用叶绿素(Chl-a)浓度来评价湖泊富营养化常采用营养状态指数 TSI。计算公式:

$$TSI_{Chl-a} = 10 \times [6 - (2.04 - 0.681 \ln Chl-a) / \ln 2],$$

式中,Chl-a 为叶绿素质量浓度(mg/m^3)。

利用 TSI 评价水库营养状态的评价标准: $TSI \leq 37$ 贫营养型。 $37 < TSI \leq 53$ 中营养型。 $TSI > 53$ 富营养型^[18~20]。本次检测中,渠首为 0.005mg/L,大石桥为 0.004 mg/L,库心的最低,为 0.003mg/L,3 个水样点 Chl-a 平均值为 0.004 mg/L,计算 $TSICNa$ 为 44.169,故水源区水体处于中营养状态。对水质营养状态的评价,应该采用多项指标综合评价比较准确,由于篇幅有限,未能综合评价。

3 结论

丹江口水库作为南水北调中线工程重要的水资源之一,又是一个较大的水资源,其水质好坏营养度高低对本地区经济、人民生活健康以及京、津等供水区居民健康、工农业发展都有重要意义。从以上生物学指标值、理化检测指标值的结果和分析来看,总结出以下结论:

①上游水源污染比较重,各项指标值都比较高,水质属于中污染状态,营养状态属于中营养。

②水库自净能力较好,库心水质属于尚清洁状态,营养状态属于中营养。渠首受周围环境的影响,水质属于污染状态,营养状态属于中营养。

从层次分析法应用结果来看,可以得出:

①多因素多指标综合评价法优于单指标分别评价。本文采用的层次分析法既包含了多指标较丰富的信息,又具有科学合理的数学运算方法,所得结果比较全面准确地反映了实际的水质情况,是值得推广应用的好方法。以 $S1$ 为例来看,溶解氧(DO)值属于 I 级标准,透明度(SD)春季为极贫营养,夏冬季为中营养,秋季为富营养;总氮(TN)为 III 级;总磷(TP)为 I 级;化学耗氧量(COD)春夏秋为 II 级,冬季为 III 级;生物耗氧量(BOD)为 I 级;Chl-a 指示为中营养;各指标值在级别上表现为参差不齐,很难从单指标确定水质的总体状况。但大部分指标值属于 III 级标准,AHP 分析水质属于污染状态,与实际基本相符。

②AHP 分析结果比较灵敏。从 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 的 6 指标来看,变化不大, $S1$ 、 $S3$ 总体上略高于 $S2$, $S1$ 与 $S3$ 差异更不明显, $S3$ 略高于 $S1$ 。但 PI 在三区上变化比较灵敏, $S1$ 的 $PI = 0.5697$,库心(小太平洋 $S2$) $PI = 0.3619$,丹江入库上游(大石桥 $S3$) $PI = 0.7755$,反映了它们的不同水质状况。

4 讨论

据调查,目前影响中线水源水质的因素主要有:一是库区生态环境比较脆弱,生态环境质量有待提高。二是上游流域区内森林覆盖率低,涵养水源功能不足。三是上游流域区内的工业企业主要是资源开采型和资源消耗型,技术含量低,治污能力差,是该流域区的主要污染源。另外入库干、支流的沿岸城镇生活污水、工业废水大都未经处理排入水库,据有关统计,丹江口库区城、乡和工业企业向丹江水库年排污水达 $1 \times 10^8 t$ 。加上库区农业生产力水平低下,自然资源的掠夺性开发,且不适当地使用化肥、农药,使库区局部有富营养化发生趋势和条件。因此做好水源区的长期生态监测,加强理论和技术研究,改善水质,极为重要^[2]。

层次分析法的不足:

①标度法比较主观,标度值可能会影响评价结果。

②—一致性检验的客观标准、特征值计算是否是排序的最好方法,还没有获得满意的解决。

③应用方面,也有局限性,它能用于从已知方案中优选,但不能生成方案。

④在水环境质量评价方面,更有待进一步改进,如水质综合评价的递阶层次结构模型、评价指标体系的确立、标度值的确定,特别是水质的分级标准综合指数值的制定。随着上述问题的深入研究,层次分析法在水环境质量评价方面会得到更广泛更深入的应用。

References:

- [1] Xu L, Li G H. Ecological environment comprehensive treatment in the Mid-Line Project of South to Noah Water Diversion. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2003, 24(2) : 74 — 77.
- [2] Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management; An overview. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6) : 1035 — 1039.
- [3] Deng Y X, Zhang A J. The use of algae in water contamination monitor. Resource Development & Market, 1998, 14: 197 — 198.
- [4] Gu Y Jie, Lu Y H. The vertical distribution of diatoms in the sediments and water quality change of Suzhou Creek. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11) : 3618 — 3622.
- [5] Saaty T L, Bennett J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy. Behavioral Science, 1997, 22 : 237 — 245.
- [6] The Editorial Committee of Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method. Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method, 4th edn. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 56 — 58.
- [7] Xin X Y. Assessment of water pollution using population structure of floating diatom in Nanwan Reservoir in Henan. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(5) : 125 — 126.
- [8] Han M S. The Atlas of Freshwater Plankton. Beijing: China Agriculture Press, 1980. 1 — 89.
- [9] Rao Q Z. Folia Algae Sinicarum Aquae Dulcis, Tomus. I. Zygomataceae. Beijing: Science Press, 1988. 98 — 112.
- [10] Teaching and Research Section of Aquatic Species of Fisheries College of Xiamen. The Common Fresh water Algae. Beijing: China Agriculture Press, 1980. 47 — 63.
- [11] Wang Z H, Chen J F, Qi S. Studies on quantitative distribution and species composition of phytoplankton in star lake and the evaluation of its trophic status. Journal of Wuhan Botanical Research, 2000, 18 : 405 — 411.
- [12] Kuang Q J, Hu Z Y, Zhou G J. Investigation on phytoplankton in Xiangxi River watershed and the evaluation of its water quality. Journal of Wuhan Botanical Research, 2004, 22 : 507 — 513.
- [13] Marglef D R. Information theory in ecology. General Systems, 1958, 3 : 36 — 71.
- [14] James E B, Jerrold H Z. Field and laboratory Methods for General Ecology. American Public Health Association, Washington D C, 1977. 136 — 145.
- [15] Liu Z B, Wang Y, Shao L N. evaluation of groundwater quality in AHP-based. Opencast Mining Technology, 2006, 2 : 48.
- [16] Wan N F, Jiang J X, Xu J X. Application of the analytic hierarchy process to pest management in the rice fields of Shanghai City. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11) : 2998 — 3002.
- [17] Li Z Y, Ding J, Peng L H. evaluation of environmental quality in AHP-based analyse decision. In : Li Z Y ed. Principles and methods on environmental quality evaluate. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2004. 38 — 53.
- [18] Liu J, Chen H. Analysis on Xinyun aquatic ecosystem changes and the changes eutrophication. Yunnan Environmental Science, 2000, (2) : 42 — 44.
- [19] Wang L W. research on plankton of layered reservoir. Hydropower Design, 1999, 3 : 63 — 70.
- [20] Cui W L, Wang Y. Discussed on chlorophyll-a content and extent of eutrophication of reservoir Laoshan. Shandong Environment, 1999, 3 : 50 — 51.

参考文献:

- [1] 徐黎, 李光华. 南水北调中线工程源头生态环境的综合治理. 华北水利水电学院学报, 2003, 24(2) : 74 ~ 77.
- [2] 林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用. 生态学报, 2001, 21(6) : 1035 ~ 1039.

- [3] 邓义祥,张爱军. 藻类在水体污染监测中的运用. 资源开发与市场,1998,14(5):197~198.
- [4] 顾咏洁,吕亚红. 苏州河沉积物中硅藻的垂直分布与水质变化. 生态学报,2006,26(11):3618~3622.
- [6] 水和废水监测分析方法编委会,水和废水监测分析方法,第4版,北京:中国环境科学出版社,2002. 56~58.
- [7] 辛晓云. 河南南湾水库浮游硅藻的种群结构与水质污染评价初步研究. 生态学杂志,2003,22(5):125~126.
- [8] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱. 北京:中国农业出版社,1980. 1~89.
- [9] 饶钦止. 中国淡水藻志第一卷,双星藻科. 北京:科学出版社,1988.98~112.
- [10] 厦门水产学院水生生物教研组. 淡水习见藻类. 北京:中国农业出版社,1980.47~63.
- [11] 王朝晖,陈菊芳,杞桑. 肇庆星湖浮游植物状况及其营养化评价. 武汉植物学研究,2000,18(5):405~411.
- [12] 况琪军,胡征宇,周广杰. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价. 武汉植物学研究,2004,22(6):507~513.
- [15] 刘志斌,王永,邵立南. 基于层次分析法的地下水质量评价. 露天采矿技术,2006,2:48.
- [16] 万年峰,蒋杰贤,徐建祥. 层次分析法在上海市农田有害生物治理中的应用. 生态学报,2005,25(11):2998~3002.
- [17] 李柞泳,丁晶,彭荔红. 基于层次分析决策的环境质量评价. 见:李柞泳主编. 环境质量评价原理与方法. 北京:化学工业出版社,2004.38~53.
- [18] 刘俊,陈红. 星云湖水生生态系统变迁及富营养化的变化分析. 云南环境科学,2000,(2):42~44.
- [19] 王立武. 分层型水库浮游生物的研究. 水电站设计,1999,(3):63~70.
- [20] 崔文连,王勇. 崂山水库叶绿素 A 含量与富营养化程度探讨. 山东环境,1999,(3):50~51.