

南水北调东线工程运行对南四湖水环境影响评价

郭 华^{1,2}, 肖伟华², 尚静石², 王文川¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450045; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 在综合分析南水北调东线工程对南四湖水环境影响基础上, 将层次分析法改进, 结合模糊评价方法, 量化评价指标, 突出体现了这种方法在定性指标量化方面显示的优势。南水北调东线工程对南四湖的水环境影响评价最终结果是 0.640, 说明调水工程会对南四湖水生态环境产生一定正面影响。

关键词: 南水北调东线工程; 南四湖; 水环境影响; 层次分析法; 模糊综合评价法

中图分类号: TV211; X820 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0049-05

Impact Assessment of Eastern Route of South to North Water Diversion Project Operation on the Water Environment of Nansi Lake

GUO Hua^{1,2}, XIAO Wei hua², SHANG Jing shi², WANG Wei chuan¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the analysis of the impact assessment of the Eastern Route of South to North Water Diversion Project on the water environment of Nansi Lake, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was improved in combination with the fuzzy evaluation method to quantify the evaluation indicators which were mainly qualitative. The final evaluation result was 0.640, which indicated that the water diversion project has t certain positive impacts on the water environment of Nansi Lake.

Key words: Eastern Route of South to North Water Diversion Project; Nansi Lake; impact of water environment; Analytic Hierarchy Process; fuzzy evaluation method

南水北调东线工程跨长江、淮河、黄河和海河四大水系, 京杭运河将其串联。同时连通洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖作为调蓄水库, 经泵站逐级提水进入东平湖后, 水分两路, 一路向北穿黄河后自流到天津; 另一路向东自流, 经新辟的胶东输水干线接引黄济青渠道, 向山东半岛供水。其中, 南四湖是微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖等四个相连湖泊的统称, 位于山东省西南部, 自北向南流动。南水北调东线工程南四湖段^[1]规划输水规模为 200~100 m³/s, 调水时间为 10 月至翌年 5 月, 主要利用湖内航道输水, 输水线路全长 115.47 km, 昭阳湖中修建的二级坝将南四湖分为上级湖和下级湖两部分, 在二级坝处修建规模为 125 m³/s 的泵站, 由下级湖提水入上级湖。总体上, 南四湖在南水北调东线工程中地理位置比较典型, 所起到的输调水作用举足轻重, 评价南水北调东线工程运行对南四湖的水环境影响很有意义。已有研究表明, 南水北调东线工程的建设已经对生态环境产生了较大的影响, 但针对通水运行时工程对水环境的长期

影响尚未有涉及。

跨流域调水工程对沿线水生态环境的影响复杂多样, 可能是直接或间接的、短期或长期的、诱发或累积的。目前, 跨流域调水的生态环境影响评价研究大多数采用污染指数法、清单法、矩阵法、综合评价指数法、BP 神经网络法、模糊综合评价法^[2-4]等。马诗敏^[5]根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类标准, 对广西临桂县境内的太平河河段进行水质监测, 直接采用单分子污染指数法评价水质现状; 欧辉明^[6]分析了大风江流域调水工程对环境的影响; 窦明^[7]等则从生态环境的角度出发, 探讨了南水北调中线工程实施可能带来的问题; 高翔^[8]等采用层次分析法评价了引大入秦调水工程对秦王川灌区的环境影响。

根据南水北调东线工程南四湖段的工程概况和工程运行可能对水环境产生的影响, 采用改进层次分析法的模糊综合评价方法, 将可量化和涉及模糊因素的对象整合, 初步实现了定性指标的定量化。

收稿日期: 2013-05-22 修回日期: 2013-09-16 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.037.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009150)

作者简介: 郭 华(1988-), 女, 河北沙河人, 硕士, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 63410403@qq.com

1 评价指标分析

南水北调工程浩大,对水环境的影响复杂,评价指标体系的确定是调水工程水环境影响评价的基础,指标选择是否合适直接关系到评价结果的科学性。

1.1 评价指标体系构建的原则

评价指标的选择应该遵循以下原则^[8-10]。

(1) 独立性原则。相关联的指标尽可能选择其中一个来表征,减少冗余。

(2) 层次性原则。水环境系统受众多因素影响,各地区水文、生态、地质、资源等不同的侧面的基本特征不同。应将系统分解成相关联的不同层次,由宏观到微观层层深入,各指标之间相互独立又有一定的关联,以求形成一个全面的评价系统^[11]。

(3) 可操作性原则。要考虑到指标数据收集的方便性和可行性。

(4) 定性与定量结合原则。指标分为定性指标与定量指标两类,定量指标可根据统计计算,定性指标可根据专家打分来评估。

(5) 代表性原则。评价指标要能准确、直接地反映生态环境的信息。

1.2 评价指标的筛选

参考南四湖已有的水生态环境影响评价和分析成果^[11],同时根据调水工程运行可能对南四湖水环境造成的影响分析,本次评价通过水文气象、水生态环境、土壤及其他等相对独立的自然环境因素来反映南四湖水环境的特征,构建评价指标体系。根据前文评价指标的选择^[12]原则,经由专家咨询法^[10]筛选出有代表性的影响因子:水文气象因素由蓄水量变化、水位变化、调水周期、蒸发量、水温、流速等指标来反映;水生态环境因素由水质变化、水生动物和水生植物的变化来表征;土地盐碱化沼泽化、地下水位变化以及河道的连通性则用来反映土壤及其他因素。对具体指标分析如下。

蓄水量变化:南水北调一期工程规划南四湖上级湖仅作为输水通道,不参与调蓄,下级湖非汛期蓄水位拟从 32.3 m 抬高到 32.8 m,增加调节库容 3.06 亿 m³。下级湖水位抬高后,多年平均可增加供水 0.44 亿 m³,其中城市工业 0.18 亿 m³,农业 0.26 亿 m³。

水位变化:根据调节计算,下级湖非汛期(10月至翌年5月)各月多年平均水位均有抬高,水位抬高幅度 0.39~0.86 m。

调水周期:南水北调东线工程南四湖段规划调水时间为 10 月至翌年 5 月,调水周期为 8 个月。

蒸发量:随着蓄水量的增加,汇水面积增大,蒸发量随之增大。

水温:南四湖下级湖蓄水位抬高,可能出现泵站前水温稳定分层现象,在泵站抽水过程中,影响下游水温,改变水体年内热量分配。

流速变化:由于泵站的动力作用,南四湖水流尤其是泵站附近流速很大程度上依赖于人工调控。

水质变化:根据 2003 年淮河水资源公报,南四湖上级湖全年期水质评价面积 602 km²,IV 类水面积 300 km²,劣 V

类水面积 302 km²,主要超标项目为 COD_{Mn}、总磷、BOD₅;南四湖下级湖评价面积 664 km²,V 类水面积 332 km²,劣 V 类水面积 332 km²,主要超标项目为 NH₃-N。资料显示^[12-13],湖区特别是主渠道全年大部分时间大部分空间基本达到 III 类水要求,空间 III 类水达标率随时间变化;但总体上在 70% 以上,不达标时间主要集中在调水期结束、污染物经截污导流工程排入南四湖时。另外,每年 3 月、4 月,受温度回升、藻类生长繁殖等多方面因素的影响,污染物浓度较高。

水生动物产量变化:由于入湖径流年际变化较大,丰枯悬殊,特别是近年来常出现在死水位以下运行的情况,因此南四湖渔业发展难以保证^[14],目前单产水平不到 150 kg/hm²。根据山东省淡水水产研究所的计算,调水后鱼产潜力可达到 375 kg/hm²。

水生植物种类、数量、分布变化:南四湖水生植物可大致分为两类,一类是有直接经济价值的挺水植物和浮叶植物,如芦苇和莲藕,另一类是有间接经济价值的沉水植物,数量种类较多,主要作为底栖动物的食物和栖息场所^[15]。挺水植物和浮叶植物分布受水位影响较大,调水初期分布面积减少,并随着湿生带的推移,在新的湿生带繁殖,但由于湖滩的全面开发利用(周边挖塘抬田),湿生带面积缩小,挺水植物面积会降低,沉水植物影响不大。

盐碱化、沼泽化:南四湖下级滨湖区湖西地区地势西南、西北高,东部低,呈簸箕型半封闭地形,第四系孔隙地下水主要排入南四湖,水力坡度很小,常年枯水期地下水埋深 1 m 左右。近年来,随着地下水的开采,地下水埋深增加,但是调水后湖面水位升高将造成沿湖地下水抬高,低洼区可能出现盐渍化现象^[16]。南四湖湖东虽然总体地势较高,但在滨湖地区有高程低于 33.0 m 的洼地;湖西地区总体地势较低,这些地区都会受到盐渍化影响。

地下水位:针对湖西区地下水动态,采用河流附近地下水运动模型计算,预计调水后地下水埋深会由调水前的 1.4~2.4 m 变为 1.4 m。

河道的连通性:南四湖原本是在湖腰处建坝将湖分为上级湖和下级湖两部分,上级湖有输水任务,需要疏浚梁济运河口到南阳 34 km 的河道,水下开挖土方量 299.94 万 m³,弃土全部堆放在湖内航道两侧,运行期间形成湖内局部阻断。

根据上述指标分析,本文利用层次分析法^[17-18]建立起阶梯状层次结构的评价指标体系:目标层的指标为调水工程运行对南四湖水环境的影响,准则层分为 3 方面,约束层 12 个指标,详见表 1。

2 改进层次分析法的模糊综合评价模型

近年来的区域生态环境评价大都采用综合评价指数法,将评价对象的各项指标换算成可比的指数,逐级累积或算数平均,然后排序,得到一个级别的划分。但严格的分值区划表示的环境情况很容易造成与事实不相符,因为大多数情况中都有“亦此亦彼”客观存在。本文借助层次分析法的基本思想,建立起递阶层次结构,通过两两比较的同层指标的相对重要性,构造出每层指标的权重判断矩阵,利用 MATLAB 矩阵软件计算出最大特征根和特征向量,得出相对重要性的

权重和排序,再利用模糊隶属度函数^[19],给出评价指标的隶属度集,将每层指标的权重向量和相应的隶属度集结合,建立起改进层次分析法的模糊综合评价模型。

表 1 南水北调东线工程对南四湖水环境生态
影响评价指标体系

Table 1 The evaluation index system of ecological impact of the Eastern Route of South to North Water Diversion Project on the water environment of Nansi Lake

目标层	准则层	约束层
A 调水工程 运行对南四 湖水环境的 影响	B ₁ 水文气象	C ₁ 蓄水量变化
		C ₂ 水位变化
		C ₃ 调水周期
		C ₄ 蒸发量
		C ₅ 水温
		C ₆ 流速变化
	B ₂ 水生态环境	C ₇ 水质变化
		C ₈ 水生动物产量变化
		C ₉ 水生植物种类、数量、分布变化
	B ₃ 土壤及其他	C ₁₀ 盐碱化、沼泽化
		C ₁₁ 地下水位
		C ₁₂ 河道的连通性

2.1 构造判断矩阵

判断矩阵表示本层各指标相对上一层的优越程度。本文采用 9 标度法^[19],请水资源和水环境的 7 位专家打分,将指标两两相比较的结果定量描述。

2.2 计算权重及一致性检验

指标权重采用最大特征根法来确定:求解矩阵的最大特征根和对应的特征向量^[9],即判断矩阵 B 满足,其中 λ_{max} 为判断矩阵 B 的最大特征根, W 为相应的特征向量。将特征向量归一化,即得到权重向量 W 。

当两两指标比较的价值取向和定值技巧不同时,或者重要性等级赋值具非等比性时,判断矩阵会产生不一致性。因此,当判断矩阵阶数 $n > 2$ 时,通常要进行一致性检验。

(1) 计算一致性指标 (Consistency Index) CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

显然当判断矩阵具有完全一致性时, $CI = 0$, 而 $(\lambda_{max} - n)$ 越大, CI 越大, 则矩阵的一致性越差。为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性, 需要将 CI 与平均一致性指标 (Random Index, 简称 RI) 进行比较, 即:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

(2) 查找相应的平均随机一致性指标 RI 。

平均随机一致性指标 RI 是多次 (500 次以上) 重复进行随机判断矩阵特征值的计算之后, 取算术平均数得到的。表 2 给出了样本容量为 1 000 的 3~12 阶随机矩阵的 RI 值。

2.3 评语数值化

生态环境影响评价的首要任务是对所拟定的评价指标

表 2 样本容量为 1000 的 3~12 阶随机矩阵的 RI 值

Table 2 The RI values of 3~12 order of the random matrix (sample size of 1000)

矩阵阶数	RI 值	RI 样本中最小值	RI 样本中最大值
3	0.5149	0.0000	3.2203
4	0.8931	0.0000	2.8565
5	1.1185	0.1094	2.6163
6	1.2494	0.1712	2.5963
7	1.3450	0.3571	2.3197

特性的“优”、“劣”状况做出判断。为了避免评价结果模糊、抽象, 需要构建一个指标评价等级的集合。目前尚无公认的评价指标特性和评价等级标准, 本文采用 7 级法对跨流域调水的生态环境影响各指标进行评价^[10], 评语集 V 可表示为: $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7\} =$ (“产生很大正面影响”, “产生较大正面影响”, “产生一定正面影响”, “未产生明显影响”, “产生一定负面影响”, “产生较大负面影响”, “产生很大负面影响”)

将其数值化, 令 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7\} = (0.95, 0.8, 0.65, 0.5, 0.35, 0.2, 0.05)$

2.4 构造隶属度函数

对于定量的指标, 其隶属度由隶属度函数来计算。本文中的隶属度函数源自半梯形模糊分布^[20]。其中, 指标值越大越好时, 其隶属度函数为:

$$f = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} = \begin{cases} 1 & x \geq x_{max} \\ \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} & x_{min} < x < x_{max} \\ 0 & x \leq x_{min} \end{cases} \quad (3)$$

指标值越小越好时, 其隶属度函数为:

$$f = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} = \begin{cases} 1 & x \leq x_{min} \\ \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} & x_{min} < x < x_{max} \\ 0 & x \geq x_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f 为指标评价值; x 为指标取值; x_{min} 为指标下限值; x_{max} 为指标上限值。根据南水北调东线工程相关的环境影响分析成果, 确定部分定量指标的评价标准见表 3。

表 3 定量指标评价标准

Table 3 The evaluation criteria of quantitative indicators

定量指标	评价值							备注
	0.95	0.7	0.65	0.5	0.35	0.2	0.05	
水温变化 (°C)	—	—	—	1	1.5	2	2.5	水温差值的绝对值
水量变化率 (%)	35	25	15	0	—	—	—	调水后接近适宜水量
	—	—	—	0	15	25	35	调水后偏离适宜水量
水位变化 /m	1.2	0.8	0.4	0	—	—	—	调水后接近适宜水位
	—	—	—	—	0.4	0.8	1.2	调水后偏离适宜水位
水质变化	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	2	水质等级差

对于定性的指标, 则由多位专家打分投票得出相应等级, 见表 4。

表 4 定性指标评价征询意见

Table 4 The evaluation criteria of qualitative indicators

评语	产生很大正面影响	产生较大正面影响	产生一定正面影响	未产生明显影响	产生一定负面影响	产生较大负面影响	产生很大负面影响	专家签字
评价值	0.95	0.7	0.65	0.5	0.35	0.2	0.05	
勾选栏	()	()	()	()	()	()	()	
说明	(指标名称)							

2.5 计算评判得分

(1) 隶属度向量的计算。

$$F' = W'F \quad (5)$$

式中: F' 为隶属度向量; W' 为权重向量; F 为隶属度集。

(2) 相对评判得分计算。

$$S = F'V^T \quad (6)$$

式中: S 为评分结果; F' 为隶属度向量; V 为数值化的评语集。

计算出相应的得分后, 对应评语, 得出最终评价结果。

3 调水工程对南四湖水环境影响评价

3.1 建立判断矩阵群、计算权重及一致性检验

评价指标约束层有 3 个判断矩阵, 见表 5 至表 7。

表 5 南四湖“水文气象”指标判断矩阵及权重

Table 5 The judgment matrix and weights of the hydrologic and meteorological indicators of Nansi Lake

B ₁ 指标	C ₁ 蓄水量变化	C ₂ 水位变化	C ₃ 调水周期	C ₄ 蒸发量	C ₅ 水温	C ₆ 流速变化	相对权重
C ₁ 蓄水量变化	1	1	3	3	3	5	0.311
C ₂ 水位变化	1	1	3	2	2	5	0.265
C ₃ 调水周期	1/3	1/3	1	1	1/5	1	0.071
C ₄ 蒸发量	1/3	1/2	1	1	1/3	1	0.082
C ₅ 水温	1/3	1/2	5	3	1	5	0.213
C ₆ 流速变化	1/5	1/5	1	1	1/5	1	0.059

水文气象指标判断矩阵的 $\lambda_{max} = 6.3091, CI = 0.0618, RI = 1.2494, CR = 0.0493 < 0.10$ 。满足一致性检验。

表 6 南四湖“水生态环境”指标判断矩阵及权重

Table 6 The judgment matrix and weights of the hydro ecological environment indicators of Nansi Lake

B ₂ 指标	C ₇ 水质变化	C ₈ 水生动物	C ₉ 水生植物	相对权重
C ₇ 水质变化	1	3	3	0.600
C ₈ 水生动物	1/3	1	1	0.200
C ₉ 水生植物	1/3	1	1	0.200

水生态环境指标判断矩阵的 $\lambda_{max} = 3, CI = 0$ 。满足一致性检验。

土壤及其他指标判断矩阵的 $\lambda_{max} = 3.0649, CI = 0.0325, RI = 0.5149, CR = 0.0630 < 0.10$ 。满足一致性检验。

表 7 南四湖“土壤及其它”指标判断矩阵及权重

Table 7 The judgment matrix and weights of the soil and other indicators of Nansi Lake

B ₃ 指标	C ₁₀ 盐碱化沼泽化	C ₁₁ 地下水位	C ₁₂ 河道连通性	相对权重
C ₁₀ 盐碱化沼泽化	1	5	7	0.731
C ₁₁ 地下水位	1/5	1	3	0.188
C ₁₂ 河道的连通性	1/7	1/3	1	0.081

准则层有 1 个判断矩阵, 见表 8。

表 8 南四湖准则层判断矩阵及权重

Table 8 The judgment matrix and weights of the rule layer of Nansi Lake

A 指标	B ₁ 水文气象	B ₂ 水生态环境	B ₃ 土壤及其他	相对权重
B ₁ 水文气象	1	1	2	0.400
B ₂ 水生态环境	1	1	2	0.400
B ₃ 土壤及其他	1/2	1/2	1	0.200

准则层判断矩阵的 $\lambda_{max} = 3, CI = 0$ 。满足一致性检验。

3.2 各指标隶属度集

通过隶属度函数的计算, 综合专家意见分析, 确定出指标隶属度, 结果见表 9。

表 9 评价指标的隶属度集

Table 9 The membership degree sets of evaluation indicators

准则层	约束层	隶属度集
B ₁ 水文气象	C ₁ 蓄水量变化	(1, 0, 0, 0, 0, 0)
	C ₂ 水位变化	(0, 0.45, 0.55, 0, 0, 0)
	C ₃ 调水周期	(0, 0, 0, 0, 1, 0)
	C ₄ 蒸发量	(0, 0, 0, 1, 0, 0)
	C ₅ 水温	(0, 0, 0, 0.5, 0.5, 0)
	C ₆ 流速变化	(0, 0, 0, 1, 0, 0)
B ₂ 水生态环境	C ₇ 水质变化	(1, 0, 0, 0, 0, 0)
	C ₈ 水生动物产量变化	(0, 0.8, 0.2, 0, 0, 0)
	C ₉ 水生植物变化	(0, 0, 0, 0.6, 0.4, 0)
B ₃ 土壤及其他	C ₁₀ 盐碱化、沼泽化	(0, 0, 0, 0, 0, 1)
	C ₁₁ 地下水位	(0, 0, 0, 0, 0.5, 0.5)
	C ₁₂ 河道的连通性	(0, 0, 0, 0.5, 0.5, 0)

3.3 模糊综合计算评价

由表 5 可知, “水文气象”中 6 项指标的权重向量

W_{B1}' 为:

$$W_{B1}' = (0.311, 0.265, 0.071, 0.082, 0.213, 0.059)$$

对应隶属度集为 F_{B1} :

$$F_{B1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0.55 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则“水文气象”的隶属度向量 F_{B1}' 为:

$$F_{B1}' = W_{B1}' F_{B1} = (0.311, 0.119, 0.146, 0.248, 0.178,$$

0, 0)

相对评判得分 S_{B1} 为:

$$S_{B1} = F_{B1}' V^T = 0.672$$

依次计算得:“水生态环境”和“土壤及其他”指标系统的

隶属度向量和相对评判得分为:

$$F_{B2}' = (0.60, 0.16, 0.04, 0.12, 0.08, 0, 0), S_{B2} = 0.812$$

$$F_{B3}' = (0, 0, 0, 0.04, 0.13, 0.83, 0), S_{B3} = 0.232$$

准则层相对于目标层的隶属度集为:

$$F_A = \begin{pmatrix} 0.311 & 0.119 & 0.146 & 0.248 & 0.178 & 0 & 0 \\ 0.60 & 0.16 & 0.04 & 0.12 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.13 & 0.83 & 0 \end{pmatrix}$$

由表7可知“水文气象”“水生态环境”和“土壤及其他”

相对于目标层的隶属度向量为:

$$W_A' = (0.4, 0.4, 0.2)$$

则准则层的隶属度向量为:

$$F_A' = (0.364, 0.112, 0.074, 0.155, 0.130, 0.165)$$

最终评判得分为:

$$S_A = 0.640$$

3.4 评价结论

由以上计算结果对应2.3中评语数值化的评语集可得出以下结论。

(1) 水文气象要素计算评判得分为0.672, 水生态环境的计算评判得分为0.812, 土壤及其它的计算评判得分为0.232。说明南水北调东线工程对南四湖的水文气象产生了一定的正面影响, 对水生态环境有较大的正面影响, 而对土壤及其它因素产生较大的负面影响。

(2) 水环境影响评价最终结果是0.640, 说明总体来说东线工程对南四湖水环境影响是正面的, 有利于保护和促进南四湖水生态环境健康持续发展。

参考文献(References):

[1] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 923-931. (ZHAO Shi-xin, ZHANG Chen, GAO Xue-ping, et al. The Impact of the Operation of Eastern Route Project of The South to North Water Diversion Project on Water Quality In Lake Nansi[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 923-931. (in Chinese))

[2] Hirji R. Inter-Basin Water Transfers: Emerging Trends of Environment Matters[Z]. Washington D C: The World Bank, 1998.

[3] 潘立武, 周建中, 江兴稳, 等. 三峡工程对长江中下游生态环境的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 97-99, 201. (PAN Li-wu, ZHOU Jianzhong, JIANG Xing-wen, et al. Influence of Three Gorges Project on Ecor environment in Middle and Lower Reaches of Yangzte River [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 97-99, 201. (in Chinese))

[4] 李恒, 王海玲, 张嵘嵘. 浅谈水环境影响评价方法和水环境影响预测[J]. 广东化工, 2008, 35(10): 62-65. (LI Heng, WANG Hai-ling, ZHANG Zhong-rong. Shallow Discussion on Water Environment Assessment Methods and Water Environment Effect Prospect[J]. Guangdong Chemical Industry, 2008, 35(10): 62-65. (in Chinese))

[5] 马诗敏. 广西洛清江支流太平河段环境影响评价[J]. 地质与资源, 2006, 15(2): 129-132. (MA Shi-min. Assessment of the Environmental Impact of Taipinghe Reach of Luqingjiang River in Guangxi Region [J]. Geology and Resources, 2006, 15(2): 129-132. (in Chinese))

[6] 欧辉明. 大风江调水工程对环境的影响和评价[J]. 广西水利水电, 2003, (3): 23-25. (OU Ming-hui. Influences and Evaluation to the Environment for the Dafengjiang Water Transfer Project [J]. Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, (3): 23-25. (in Chinese))

[7] 窦明, 左其亭, 胡彩虹. 南水北调工程的生态环境影响评价研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 63-66. (DOU Ming, ZUO Qi-ting, HU Cai-hong. Assessment of Influence of Water Transfer Project from South to North on Ecological Environment [J]. Journal of Zhengzhou University: Eng Sci, 2005, 26(2): 63-66. (in Chinese))

[8] 高翔, 王爱民. 引大调水工程的环境影响评价[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 48-53. (GAO Xiang, WANG Ai-min. Environmental Impact Assessment in Yindaruqin Project [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13(2): 48-53. (in Chinese))

[9] 薛建航. 基于层次分析法的家庭困难学生认定研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012. (XUE Jian-hang. Research of Students from Economically Disadvantaged Families [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))

[10] 郭潇, 方国华. 跨流域调水生态环境影响评价研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (GUO Xiao, FANG Guo-hua. Inter Basin Water Diversion Ecological Environmental Impact Assessment Studies [M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))

[11] 姜永生, 田忠志. 南水北调东线工程环境影响及对策[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2012. (JIANG Yong-sheng, TIAN Zhong-zhi. Environmental Impact and Countermeasures of The East Route of South to North Water Diversion Project [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 2012. (in Chinese))

[12] 张金凤. 南四湖污染对南水北调东线水质的影响及应对方法探索[J]. 中国高新技术企业, 2012, (32): 8-9. (ZHANG Jin-feng. The Explore And The Influence of Water Quality on Nansihu Pollution of the East Route of South to North Water Diversion Project [J]. Chinese High-tech Enterprises, 2012, (32): 8-9. (in Chinese))

5 结论

(1) 天津滨海新区的营城水库出现了轻度富营养, 其余水库均为中营养, 但沙井子水库和钱圈水库综合营养状态指数已接近于中营养的上限。

(2) 北大港水库总氮、总磷及化学需氧量指标整体超过地表水Ⅲ类水质标准, 不能满足饮用水水质标准, 因此, 在真正作为饮用水源地之前应当进行治理。北塘水库总磷超标两倍, 而总氮及化学需氧量指标均满足地表水Ⅲ类水质标准。沙井子水库、营城水库、钱圈水库个别指标超过《地表水环境质量标准》(GB 3838 2002) Ⅲ类水质标准。

(3) 除钱圈水库外, 天津滨海新区各水库均为磷限制性水库。

参考文献(References):

- [1] 张宇龙, 王启山, 贺兰曦, 等. 北大港水库调蓄“引江水”水质变化[J]. 城市环境与城市生态, 2005, (2): 24-26. (ZHANG Yulong, WANG Qishan, HE Lanxi, et al. Water Quality of South to North Transfer Water in Beidagang Reservoir[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2005, (2): 24-26. (in Chinese))
- [2] 赵文玉, 王启山, 伍婷, 等. 天津滨海地区水库水质咸化问题及机理分析[J]. 海河水利, 2006, (3): 33-35. (ZHAO Wenyu, WANG Qishan, WU Ting, et al. Reservoir Water Salinization and Mechanism Analysis in Tianjin Binhai Area[J]. Haihe Water Resources, 2006, (3): 33-35. (in Chinese))
- [3] 赵文玉, 刘国庆, 刘景兰, 等. 北大港水库水质咸化数学模型[J]. 桂林工学院学报, 2007, (2): 236-239. (ZHAO Wenyu, LIU Guoqing, LIU Jinglan, et al. Water Salinization Mathematical Model in Beidagang Reservoir[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2007, (2): 236-239. (in Chinese))
- [4] 赵文玉. 天津滨海地区水库水质咸化机理分析及实验研究[D]. 天津: 南开大学, 2006. (ZHAO Wenyu. Experiment Research and Mechanism Analysis of Water Salinization in Beidagang Reservoir[D]. Tianjin: Nankai University, 2006. (in Chinese))
- [5] 赵文玉, 王启山, 刘军, 等. 风对北大港水库水质咸化影响的理论分析与实验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2005, (3): 16-18, 24. (ZHAO Wenyu, WANG Qishan, LIU Jun, et al. Theoretical and Experimental Bases for the Dual Water Model for Interpretation of Shaly Sands[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, (3): 16-18, 24. (in Chinese))
- [6] 姜翠玲, 裴海峰. 天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 428-433. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Reasons of Water Salinization and Its Prevention Measures in Beitang Reservoir, Tianjin City[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(4): 428-433. (in Chinese))
- [7] 陶晓东, 严志程, 崔勇. 滨海平原水库的主要水环境问题及对策分析[J]. 水利规划与设计, 2012, (4): 17-18, 53. (TAO Xiaodong, YAN Zhicheng. Main Environment Problems and Measures Analysis of the Coastal Plain Reservoir[J]. Water Resources and Planning and Design, 2012, (4): 17-18, 53. (in Chinese))
- [8] 彭焱梅, 姜翠玲, 朱立琴, 等. 天津市滨海新区拟建水库水质咸化风险试验研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 31-33. (PENG Yamei, JIANG Cuiling, ZHU Liqin, et al. Experimental Study on Water Salinization Risk of Proposed Reservoir in Coastal Region of Tianjin City[J]. Water Resource and Power, 2013, 31(3): 31-33. (in Chinese))
- [9] 湖泊(水库)富营养化评价方法分级技术规定[R]. 北京: 中国环境监测总站, 2001. (Eutrophication Evaluation Method and Separation Technique Method of the Lakes (Reservoir) [R]. Beijing: China National Environmental Monitoring Centre, 2001. (in Chinese))
- [10] Li R X, Zhu M Y, Chen S, et al. Responses of Phytoplankton on Phosphate Enrichment in Mesocosms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 603-607.
- [13] 赵群群, 杨凯. 南四湖污染物排放对南水北调东线水质的影响及治理措施[J]. 价值工程, 2010, 29(8): 105-106. (ZHAO Qunqun, YANG Kai. Influence and Governance of Nansi Lake Pollutants on Water Quality of South to North Diversion Project Eastern Route[J]. Value Engineering, 2010, 29(8): 105-106. (in Chinese))
- [14] 李峰, 曾光明, 宋建军, 等. 南四湖鱼类群落对南水北调东线工程的响应[J]. 河南科学, 2008, 26(4): 467-471. (LI Feng, ZENG Guangming, SONG Jianjun. The Fish Community of Nansi Lake in the Response of the East Route of South to North Water Diversion Project[J]. Henan Science, 2008, 26(4): 467-471. (in Chinese))
- [15] 翟晓萌, 付荣恕. 南四湖大型底栖动物群落结构的初步研究[J]. 山东林业科技, 2013, (1): 25-29. (ZHAI Xiaomeng, FU Rongshu. Preliminary Study on Macrozoobenthos Community Structure of Nansi Lake[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2013, (1): 25-29. (in Chinese))
- [16] 孙媛媛, 张祖陆, 李爽. 南四湖表层沉积物营养元素分布分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 37-40. (SUN Yuanyuan, ZHANG Zulu, LI Shuang. Analysis of Nutrient Distribution in Surface Sediment of Nansihu Lake[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 37-40. (in Chinese))
- [17] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [18] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1986. (XU Shubai. Principle of Analytic Hierarchy Process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1986. (in Chinese))
- [19] Biswas R. An Application of Fuzzy Sets in Student's Evaluation[J]. Fuzzy Set and Systems, 1995, (74): 197-194.
- [20] 李安贵, 张志宏, 孟艳, 等. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005. (LI Angui, ZHANG Zhihong, MENG Yan. Fuzzy Mathematics and Applications[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005. (in Chinese))

(上接第 53 页)