

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.008

基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价

王 栋¹, 梁忠民¹, 常文娟², 卜 慧¹, 唐甜甜¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:从经济、社会和生态环境 3 个层面构建引江济太调水效益评价指标体系。考虑到评价标准边界值的模糊性,采用模糊集对分析评价模型评估调水工程对受水区的综合影响等级,并与综合指数法对比;用 Cronbach 系数 α 检验指标体系内部一致性可信度,在确定指标权重时,使用博弈论综合赋权法将主观权重(层次分析法)和客观权重(熵值法)集成,得到相对均衡的综合权重。运用上述方法对 2014 年引江济太调水进行综合评估,两种方法的评估结果都表明引江济太工程给受水区带来较大的正面影响,但模糊集对分析法用模糊联系度描述评价对象和评价标准的确定性和不确定性,能提供相对丰富的信息。

关键词:引江济太调水工程;效益评估;综合评价;模糊集对分析;博弈论;综合赋权

中图分类号:TV213.4;TV68 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)01-0035-06

Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis

WANG Dong¹, LIANG Zhongmin¹, CHANG Wenjuan², BU Hui¹, TANG Tiantian¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, 443002, China)

Abstract: An evaluation indicator system was constructed from the aspects of economic, social, and ecological environments to evaluate the benefit of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake. With consideration of the fuzziness of boundary values of the evaluation criteria, the fuzzy set pair analysis assessment model was used to evaluate the comprehensive impact grade of the water diversion project on the intake area, and the assessment results were compared with those of the comprehensive indicator method. The Cronbach's α coefficient was used to test the internal consistency reliability of the indicator system. To determine the indicator weight, game theory was used to integrate the subjective weight (the analytical hierarchy process method) and the objective weight (the entropy method). Thus, the relatively balanced comprehensive weight was obtained. With the methods mentioned above, the benefit of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake in 2014 was evaluated comprehensively. The assessment results of both methods show that the Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project has had a significantly positive effect on the intake area. However, the fuzzy set pair analysis method, which used the fuzzy connection degree to describe the certainty or uncertainty of the evaluation object and evaluation criteria, can provide more information.

Key words: Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project; benefit evaluation; comprehensive evaluation; fuzzy set pair analysis; game theory; comprehensive weighting

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAB06B01); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ12_0240)

作者简介: 王栋(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文不确定性理论与应用。E-mail: wangd1986@163.com

通信作者: 梁忠民, 教授。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

随着气候变化和人类活动影响的加剧,水资源的时空分布不均匀性与人类需水的矛盾日益突出。为了缓解水资源短缺和水污染问题,实现水资源的合理开发和利用,采用工程调水是解决此矛盾从而实现水资源时空重新分配的一项有效工程措施,如美国加州北水南调、国内的南水北调和引江济太等工程。工程调水旨在实现不同区域之间的水资源优化调配,给当地的经济、社会和生态环境带来一系列有形和无形的效益或影响。因此,为了未来调水的发展以及维持调水工程的长期良性运行,对调水工程运行现状进行科学合理的评估具有重要意义。

目前,有关调水工程对生态环境的影响、调水效益评估是水资源研究中的热点问题。如研究调水后受水区水质变化、调水给受水区带来的社会经济收益等。Davies 等^[1]以南非、澳大利亚和美国调水工程为例,评价调水工程对受水区产生的生态影响,指出对调水工程评估的重要性;Hu 等^[2]分析了引江济太工程对太湖的环境影响,发现长江清水的引入,有提高太湖水质的可能;翟淑华等^[3]通过构建水环境评估指标体系对引水期间河网和太湖水环境改善效果做出了全面评估;常文娟等^[4]建立了调水影响下的产业用水系统协调度评价模型,评价了引江济太调水工程对受水区产业用水系统的宏观影响;Matete 等^[5]构建并应用基于生态经济框架的经济评估模型,综合评价和分析了莱索托高原调水工程的运行现状;冯晓晶等^[6-7]采用分摊系数法等,定量分析了引江济太工程给受水区带来的社会经济收益;席清海等^[8]研究了引黄济津工程的调水费用及给天津市生产生活带来的经济效益;吴浩云等^[9]选用综合指数法和价值估算法对阳澄淀泖区的调水综合效益进行了初步评估,定性评估出引江济太调水综合效益等级,并且分析了两种方法研究结果之间的关系。

然而,对调水效益评估不确定性分析的相关研究却鲜有报道。鉴于定性评价标准的边界模糊性,集对分析能够较好地分析评价对象和评价标准之间的确定性与不确定性,本文以引江济太调水工程为研究对象,构建调水效益评估指标体系,并对其进行可靠性分析,采用博弈论综合赋权方法确定指标综合权重;基于模糊集对分析模型全面定性评价出2014年度引江济太调水工程对受水区的影响等级,并与综合指数法评估结果对比分析。

1 调水效益评价指标体系

考虑到水资源时空分布不均、水污染问题严重制约了长三角地区经济社会的可持续发展,2002年

1月引江济太调水试验工程正式启动。遵照“以动治静、以清释污、以丰补枯、改善水质”的方针,通过望虞河将水质较好的长江水引入太湖及周边河网。长江清水的调入改善了流域水体水质状况,提升了水环境承载能力^[9-10];同时,增加了太湖流域的水资源量和流域周边地区的供水,促进了流域水资源综合利用,取得了显著的经济、社会以及环境效益,推动了受水区社会经济的全面发展。

依据全面性、科学性、代表性和可操作性等原则,首先从经济、社会和生态环境3个层面初步构建引江济太调水效益综合评价指标体系,反映引江济太工程对受水区的调水综合影响;其次对指标进行适应性分析,采用合并、替换、剔除等手段进一步筛选;同时通过公众参与、专家分析评价筛选出最终的指标体系;最后根据参考文献^[11],选取的经济影响层面的3个指标分别为调水对农业产值的贡献率 C_1 、调水对工业产值的贡献率 C_2 、调水对服务业产值的贡献率 C_3 ;社会影响层面的5个指标分别为调水对人均水资源占有量的贡献 C_4 、对区域可持续发展的影响 C_5 、突发事件或重大活动应急调水 C_6 、调水工程的公众认可度 C_7 、居民生活亲水舒适度 C_8 ;生态环境影响层面的6个指标分别为水源地水质改善度 C_9 、受水区水体水质指标改善度 C_{10} 、水功能区达标率 C_{11} 、调水对河道外环境用水影响 C_{12} 、调水对河网生态系统的影响 C_{13} 、调水对太湖蓝藻数量的影响 C_{14} 。

为检验指标体系是否具有稳定性和可靠性,需对构建的指标体系进行内部一致性可信度分析,本文以克隆巴哈(Cronbach)系数 α 评价指标体系的内部一致性^[12]:

$$\alpha = \frac{p\bar{r}}{1 + (p - 1)\bar{r}} \quad (1)$$

式中: p 为评价指标的个数; \bar{r} 为 p 个评价指标相关系数的均值; $\alpha \in (0, 1)$ 。

α 越大,表明评价指标间的相关性越好,内部一致性可信度越高。相关研究表明,若 $\alpha > 0.8$,则表示指标体系内部一致性极好;在实际应用中, α 值最好能大于0.7^[13]。

2 模糊集对分析评价模型

2.1 模型方法概述

模糊集对评价是基于集对分析理论,综合考虑了评价标准的边界值的模糊性以及不同指标的权重影响的一种综合评价方法^[14]。假设评价指标为集合 $\{P_n | n=1, 2, \dots, L\}$ (L 为评价指标数目),相应的指标等级评价标准为集合 $\{Q_m | m=1, 2, \dots, K\}$

(K 为评价标准等级数), 根据集对分析原理, 集对 H (P_n, Q_m) 的 K 元联系度为

$$\mu_{P_n-Q_m} = \sum_{n=1}^L w_n a_n + \sum_{t=1}^{K-2} \sum_{n=1}^L w_n b_{n,t} i_t + \sum_{n=1}^L w_n c_n j \quad (2)$$

式中: $\mu_{P_n-Q_m}$ 为集对 $H(P_n, Q_m)$ 的联系度; w_n 为指标 P_n 的权重; a_n 为指标 P_n 隶属于该评价指标 1 级标准的可能性; $b_{n,t}$ 为指标 P_n 隶属于该评价指标 $t+1$ 级标准的可能性 ($t=1, 2, \dots, K-2$); c_n 为指标 P_n

$$\mu_{P_n-Q_m} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & x_n \geq s_1 \\ \frac{2x_n - s_1 - s_2}{s_1 - s_2} + \frac{2s_1 - 2x_n}{s_1 - s_2} i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x_n < s_1 \\ 0 + \frac{2x_n - s_2 - s_3}{s_1 - s_3} i_1 + \frac{s_1 + s_2 - 2x_n}{s_1 - s_3} i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & \frac{s_2 + s_3}{2} \leq x_n < \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \vdots & \\ 0 + 0i_1 + \dots + \frac{2x_n - 2s_{K-1}}{s_{K-2} - s_{K-1}} i_{K-2} + \frac{s_{K-2} + s_{K-1} - 2x_n}{s_{K-2} - s_{K-1}} j & s_{K-1} \leq x_n < \frac{s_{K-2} + s_{K-1}}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 1j & x_n < s_{K-1} \end{cases} \quad (3)$$

对于越小越好的指标(负向指标), 指标 P_n 与其评价标准的模糊联系度为

$$\mu_{P_n-Q_m} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & x_n \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_n}{s_2 - s_1} + \frac{2x_n - 2s_1}{s_2 - s_1} i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & s_1 < x_n \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_n}{s_3 - s_1} i_1 + \frac{2x_n - s_1 - s_2}{s_3 - s_1} i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 0j & \frac{s_1 + s_2}{2} < x_n \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ \vdots & \\ 0 + 0i_1 + \dots + \frac{2s_{K-1} - 2x_n}{s_{K-1} - s_{K-2}} i_{K-2} + \frac{2x_n - s_{K-2} - s_{K-1}}{s_{K-1} - s_{K-2}} j & \frac{s_{K-2} + s_{K-1}}{2} < x_n \leq s_{K-1} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 1j & x_n > s_{K-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_n 为指标 P_n 的取值; s_1, s_2, \dots, s_{K-1} 为指标评价标准的边界值。

针对调水效益评估问题, 采用置信度准则判断引江济太工程对受水区的综合影响等级, 令 $f_1 = \sum_{n=1}^L w_n a_n, f_2 = \sum_{n=1}^L w_n b_{n,1}, \dots, f_K = \sum_{n=1}^L w_n c_n, f_k$ 为评价样本隶属于 k 级标准的可能性, $k=1, 2, \dots, K$ 。则其影响等级属于 h_k 对应的 k 级:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda \quad k=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中, λ 为置信度, 一般而言 $\lambda \in [0.5, 0.7]$, 本次取 $\lambda=0.6$ 。

2.2 指标权重的确定

指标权重直接影响多指标综合评价结果, 采用不同的指标权重将会得到不同的评价结果, 因此, 合理地确定指标权重显得尤为重要。按照主客观性的不同, 确定指标权重的常用方法可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。但是这两类方法各有利弊, 因此综合权重法应运而生, 比如, 将主、客观权重取

隶属于该评价指标 K 级标准的可能性; i_t 为差异不确定性系数, 在 $(-1, 1)$ 区间视不同情况取值, 有时仅起差异标志作用; j 为对立系数, 且 $j=-1$, 有时起对立标志作用。

由于评价指标等级标准边界值的模糊性, 依据模糊分析方法, 对于越大越好的指标(正向指标), 指标 P_n 与其评价标准的模糊联系度为

算术平均作为综合权重。本文采用层次分析法^[15](主观赋权)和熵值法^[16](客观赋权)分别确定指标权重, 然后运用博弈论的方法将主观权重和客观权重加以综合, 得出相对均衡的综合权重。基于博弈论综合赋权的主要理论如下^[17]:

由 l 种方法确定的指标基本权重集为 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_l\}$, 将这 l 个权重向量以任意线性组合可构成一个可能权重向量

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^l \alpha_i \mathbf{w}_i^T \quad \alpha_i > 0 \quad (6)$$

式中: α_i 为线性组合系数; l 为确定指标权重方法的个数。

因此, 关键是从可能权重集中确定最优的综合权重 \mathbf{w}^* , 采用博弈论方法确定 \mathbf{w}^* 的核心是在不同权重之间寻找一种均衡, 通过对式(7)中 i 个线性组合系数 α_i 进行优化, 优化目标是使 \mathbf{W} 与各个基本权重之间 \mathbf{w}_i 的偏差最小化, 其优化模型为

$$\min \left\| \sum_{i=1}^l \alpha_i \mathbf{w}_i^T - \mathbf{w}_j^T \right\|_2 \quad j=1, 2, \dots, l \quad (7)$$

根据矩阵的微分性质,可得最优化一阶导数条件。

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & \cdots & w_1 w_l^T \\ \vdots & & \vdots \\ w_l w_1^T & \cdots & w_l w_l^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_l w_l^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

求解方程组解 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)$,然后对系数 α_i 归一化处理后代入式(6),求得最优综合权重 w^* ,根据 w^* 计算各指标隶属于相应影响层面的相对权重。相对权重也即是该指标在其相应影响层面中所占的权重,比如, C_1 的相对权重是指 C_1 在经济影响层面中所占的权重。

3 调水效益综合评价

以2014年引江济太调水工程为例,采用模糊集对分析方法评估引江济太工程对受水区的综合影响等级,并与综合指数法^[9]评估结果进行对比。其中 $C_5 \sim C_8, C_{12} \sim C_{13}$ 指标的分值通过咨询水利、环保和经济等领域专家代表来确定;其余指标的分值通过查阅相关统计年鉴和水利部太湖流域管理局提供的调水资料计算获得。

3.1 指标内部一致性分析与评价标准

分别计算经济、社会、生态环境3个层面以及整体指标体系的Cronbach系数 α ,分析指标体系内部一致性可信度,结果见表1。

表1 评估指标体系内部一致性检验结果

影响类别	α	指标数
经济影响	0.83	3
社会影响	0.86	5
生态环境影响	0.90	6
整体影响	0.92	14

由表1可知,引江济太调水效益评估指标体系中,不论是经济、社会、生态环境3个层面还是整体指标体系, α 均在0.8以上,表示指标体系内部一致性程度甚佳,各个层面中的指标均能较好地反映该影响层面的特点,各个影响层面间的指标具有独立性,从而表明构建的引江济太调水效益评估指标体系具有良好的可信度。

因选取的指标取值范围不一致,且部分指标无法量化,为得到恰当的综合评价结果,本文将所有指标评价标准归一化处理,使各指标取值范围一致。根据相关研究资料,参考国内外调水的实际情况,并结合研究区经济发展状况、相关政策和水利发展规划等,将调水效益评价指标等级标准分为7个等级(表2)。

表2 评估指标等级划分标准

评价指标等级	量值范围	影响程度
1级	[0.7, 1]	显著正面影响
2级	[0.4, 0.7)	较大正面影响
3级	[0.1, 0.4)	较小正面影响
4级	[-0.1, 0.1)	无影响
5级	[-0.4, -0.1)	较小负面影响
6级	[-0.7, -0.4)	较大负面影响
7级	[-1, -0.7)	显著负面影响

3.2 指标权重计算

表3给出由层次分析法和熵值法计算出的各指标权重 w_{l1}, w_{l2} 。

表3 层次分析法和熵值法确定的各指标的权重

指标	w_{l1}	w_{l2}	指标	w_{l1}	w_{l2}	指标	w_{l1}	w_{l2}
C_1	0.143	0.081	C_6	0.107	0.055	C_{11}	0.017	0.056
C_2	0.045	0.098	C_7	0.040	0.054	C_{12}	0.011	0.054
C_3	0.034	0.100	C_8	0.058	0.055	C_{13}	0.035	0.055
C_4	0.205	0.078	C_9	0.054	0.084	C_{14}	0.095	0.091
C_5	0.102	0.055	C_{10}	0.054	0.084			

由表3可知,采用这两种方法确定的指标权重有差异,因此有必要将这两者综合,按照博弈论综合赋权方法,根据式(6)和式(8)计算综合权重 w_l^* 及各指标的相对权重(表4)。

表4 评价指标的综合权重及相对权重

影响类别	指标	w_l^*	相对权重
经济影响 (0.228)	C_1	0.138	0.605
	C_2	0.050	0.219
	C_3	0.040	0.176
	C_4	0.194	0.393
社会影响 (0.493)	C_5	0.098	0.199
	C_6	0.102	0.207
	C_7	0.041	0.083
	C_8	0.058	0.118
生态环境影响 (0.279)	C_9	0.056	0.201
	C_{10}	0.056	0.201
	C_{11}	0.020	0.072
	C_{12}	0.015	0.054
	C_{13}	0.037	0.132
	C_{14}	0.095	0.340

根据表4,相比于经济影响层面,调水对社会、生态环境影响的权重较大,即认为引江济太工程对社会、生态环境的影响比较重要。

3.3 评估结果与分析

依据表2的指标划分标准,取 $K=7$;指标个数 $L=14$,其中 C_{14} 为负向指标,其他均为正向指标;表5给出了采用模糊集对分析模型计算评价指标与其标准的7元模糊联系数;最后,通过式(2)和式(5)评估引江济太工程对受水区的经济、社会、生态环境及综合影响等级(取 $\lambda=0.6$),评价结果见表6。

然而,目前综合评价的方法众多,为分析模糊集对分析综合评价结果是否可信,本文同时采用文献

[9]中综合指数法评估引江济太工程对受水区的综合影响等级,评估结果见表7,并且分析比较上述两种方法的评估结果。

表5 评价指标与其标准的模糊联系度

联系度	a_n	$b_{n,1}$	$b_{n,2}$	$b_{n,3}$	$b_{n,4}$	$b_{n,5}$	c_n
μ_1	0	0.75	0.25	0	0	0	0
μ_2	0	0	0.8	0.2	0	0	0
μ_3	0	0	0.64	0.36	0	0	0
μ_4	0	0.533	0.467	0	0	0	0
μ_5	0	0.633	0.367	0	0	0	0
μ_6	1	0	0	0	0	0	0
μ_7	0	0.833	0.167	0	0	0	0
μ_8	0	0.785	0.215	0	0	0	0
μ_9	0.365	0.635	0	0	0	0	0
μ_{10}	0.167	0.833	0	0	0	0	0
μ_{11}	0	0.68	0.32	0	0	0	0
μ_{12}	0	0.167	0.833	0	0	0	0
μ_{13}	0.333	0.667	0	0	0	0	0
μ_{14}	0	0	0.52	0.48	0	0	0

注: $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{14}$ 分别表示 C_1, C_2, \dots, C_{14} 各指标与其标准构成的集对的联系度。

表6 模糊集对分析模型综合评价结果

影响类别	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	等级
经济影响	0	0.454	0.439	0.107	0	0	0	3
社会影响	0.207	0.497	0.296	0	0	0	0	2
生态环境影响	0.151	0.441	0.245	0.163	0	0	0	3
综合影响	0.144	0.472	0.314	0.07	0	0	0	2

表7 综合指数法综合评价结果

影响类别	分值	等级
经济影响	0.359	3
社会影响	0.489	2
生态环境影响	0.409	2
综合影响	0.437	2

对比表6、7可知,除生态环境影响层面外,模糊集对分析模型和综合指数法的评价结果一致。结合表2的指标评价标准,两种方法的评价等级表明:引江济太给受水区的经济发展带来较小正面影响;给社会发展带来较大的正面影响;而给生态环境影响方面分别带来较小(模糊集对分析模型)和较大(综合指数法)正面影响;综合影响均表现为较大的正面影响。此外,在生态环境影响层面,表7中综合指数法的分值为0.409,接近于指标评价等级标准边界值0.4,而表6中 $f_1 + f_2 = 0.592$,接近置信度 $\lambda = 0.6$,表明两种方法的评估结果十分接近,而由于指标评价等级标准边界值的模糊性,造成了两种方法的评估等级差异。因此,相比于综合指数法,模糊集对分析评价模型考虑了评价标准边界值的模糊性,用模糊联系度反映评价对象和评价标准的确定性和不确定性,因此其评价结果包含的信息也相对丰富。

另外,与社会影响层面对比,引江济太对受水区经济和生态环境层面正面影响较小。由于2014年引江济太工程调引水量较小,并且因调水带来的受水区产业结构的调整已基本趋于稳定,因此调水对农业、工业和服务业产值增长贡献率较小。然而,在引江济太实际运行过程中,调水所发挥的保障流域水安全、改善水环境的效果最为社会各界所关注;因此,对于未来引江济太调水工程的发展和运行,应注重其对生态环境的影响。改善受水区的生态环境措施很多,在目前状况下,可通过合理配置引水量,提高城镇、林业等生态用水,改善其生态环境;在太湖蓝藻高暴发时期,通过调水降低水体温度和蓝藻浓度,以减缓太湖水体富营养化程度。

4 结语

a. 指标体系的合理性决定评估结果是否稳定,本研究以Cronbach系数 α 分析指标体系内部一致性可信度,所有层面的 α 均在0.8以上,表明本次构建的指标体系稳定可靠,可用于引江济太调水工程对受水区的综合影响评估。

b. 指标权重直接影响综合评价结果,本文从主观、客观赋权中分别选取层次分析法和熵值法确定指标的权重,再运用博弈论综合赋权将主观权重和客观权重加以综合,使综合权重与相应的主观、客观权重偏差最小。该方法确定的综合权重相对均衡,评估结果也会相对可靠,并且该方法理论简明清晰,便于实际应用。

c. 选取模糊集对分析评价模型与综合指数法进行对比,验证其评价结果是否可信,得出两种方法的评估结果基本一致,均反映引江济太调水工程对受水区有较大的正面影响。然而,模糊集对分析评价模型考虑了评价标准边界值的模糊性,用模糊联系度描述评价对象和评价标准之间的确定性和不确定性,能提供更丰富的信息,可为其他调水工程的效益评估提供借鉴和参考。

鉴于资料条件限制,本文仅对2014年调水加以分析,今后将加强相关资料收集工作,进一步分析评价指标体系的合理性。另外,本研究可认为是一种定性评估,只给出相应的影响程度,未能提供量化的效益值,比如调水工程的运行改善受水区水体水质、流速等所带来的生态、环境、健康等效益值,值得今后进一步研究探讨。

参考文献:

[1] DAVIES B R, THOMS M, MEADOR M. An assessment of the ecological impacts of inter-basin water transfers,

- and their threats to river basin integrity and conservation [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1992, 2(4): 325-349.
- [2] HU W P, ZHAI S J, ZHU Z C, et al. Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 34(1): 30-49.
- [3] 翟淑华, 张红举, 胡维平, 等. 引江济太调水效果评估 [J]. *中国水利*, 2008 (1): 21-23. (ZHAI Shuhua, ZHANG Hongju, HU Weiping, et al. Evaluation on result of Yangtze-Taihu water diversion [J]. *China Water Resources*, 2008(1): 21-23. (in Chinese))
- [4] 常文娟, 梁忠民, 冯晓晶. 调水工程对区域产业用水系统协调性影响研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9 (5): 19-22. (CHANG Wenjuan, LIANG Zhongmin, FENG Xiaojing. Impact of basin water transfer project on the coordination of regional industrial water use system [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9 (5): 19-22. (in Chinese))
- [5] MATETE M, HASSAN R. An ecological economics framework for assessing environmental flows: the case of inter-basin water transfers in Lesotho [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2): 193-200.
- [6] 冯晓晶, 金科, 梁忠民, 等. 引江济太工程调水效益评估 [J]. *水电能源科学*, 2012, 30 (6): 135-138. (FENG Xiaojing, JIN Ke, LIANG Zhongmin, et al. Research on benefit evaluation of Yangtze River water transfer project [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(6): 135-138. (in Chinese))
- [7] 吴浩云, 刁训娣, 曾赛星. 引江济太调水经济效益分析: 以湖州市为例 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 888-892. (WU Haoyun, DIAO Xundi, ZENG Saixing. Analysis of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake: case study in Huzhou City [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19 (6): 888-892. (in Chinese))
- [8] 席清海, 冯平. 引黄济津应急调水的费用效益分析 [J]. *天津大学学报(社会科学版)*, 2012, 14(5): 396-400. (XI Qinghai, FENG Ping. Cost-benefit analysis of water diversion from Yellow River to Tianjin [J]. *Journal of Tianjin University (Social Sciences)*, 2012, 14 (5): 396-400. (in Chinese))
- [9] 郝文彬, 唐春燕, 滑磊, 等. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40 (2): 129-133. (HAO Wenbin, TANG Chunyan, HUA Lei, et al. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40 (2): 129-133. (in Chinese))
- [10] 周小平, 翟淑华, 袁粒. 2007—2008 年引江济太调水
- 对太湖水质改善效果分析 [J]. *水资源保护*, 2010, 26 (1): 40-43. (ZHOU Xiaoping, ZHAI Shuhua, YUAN Li. Influences of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on water quality of Taihu Lake between 2007 and 2008 [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1): 40-43. (in Chinese))
- [11] 吴浩云, 周丹平, 何佳, 等. 引江济太工程综合效益的评估及方法探讨 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 639-647. (WU Haoyun, ZHOU Danping, HE Jia, et al. Integrated benefit assessment of the project water diversion from Yangtze River to Lake Taihu and discussion on the methodology [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20 (5): 639-647. (in Chinese))
- [12] CRONBACH L J. Coefficient alpha and the internal structure of tests [J]. *Psychometrika*, 1951, 16(3): 297-334.
- [13] CARLBRING P, BRUNT S, BOHMAN S, et al. Internet vs. paper and pencil administration of questionnaires commonly used in panic/agoraphobia research [J]. *Computers in Human Behavior*, 2007, 23(3): 1421-1434.
- [14] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 85-88.
- [15] SAATY T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process [J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48 (1): 9-26.
- [16] FAGBOTE E O, OLANIPEKUN E O, UYI H S. Water quality index of the ground water of bitumen deposit impacted farm settlements using entropy weighted method [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, 11(1): 127-138.
- [17] 黄振芳, 刘昌明. 基于博弈论综合权重模糊优选模型在地下水环境风险评价中的应用 [J]. *水文*, 2010, 30 (4): 13-17. (HUANG Zhenfang, LIU Changmin. A fuzzy optimization model based on comprehensive weight calculated with game theory and its application in environment risk assessment of groundwater system [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-02 编辑: 徐娟)

