

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.02.008

模糊数学方法在生态系统服务价值评估中的应用

樊 皓¹,葛 慧²,雷少平¹,闫峰陵¹,黄振平²

(1. 长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051;2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要 :为了综合考虑多种因素对生态系统服务价值的影响,并对其作出定量描述,以南水北调中线工程水源地——丹江口水库库区为研究对象,将生态系统划分为农业生态系统、森林生态系统、淡水生态系统和草地生态系统 4 个子系统,分别采用模糊综合评价方法对研究区域生态系统服务价值进行评估。结果表明,该区域生态系统服务价值量为 166.473 1 亿元,区域生态资源丰富。研究结果可为今后生态补偿标准的制定提供理论依据。

关键词 :生态补偿;南水北调中线工程;生态系统服务价值;模糊综合评价

中图分类号 :TV213.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2011)02-0034-03

Estimation of ecosystem services value based on fuzzy mathematic method

FAN Hao¹, GE Hui², LEI Shao-ping¹, YAN Feng-ling¹, HUANG Zhen-ping²

(1. Water Resources Protection Research Institute of Changjiang River, Wuhan 430051, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In order to comprehensively consider the influence of various factors on the value of ecosystem services and to evaluate the value quantitatively, taking Danjiangkou Reservoir, the water source for the middle line of the South-to-North water diversion project, as an example, the ecosystem was divided into four subsystems: the agriculture ecosystem, forest ecosystems, freshwater ecosystem, and grassland ecosystem. The value of ecosystem services of each subsystem was estimated with the fuzzy comprehensive evaluation method. The results showed that the ecosystem services value of this study area was 16.647 billion RMB and the regional ecological resources were abundant. The results could provide a theoretical basis a standard of ecological compensation in the future.

Key words : ecological compensation; middle line of South-to-North water diversion project; ecosystem services value; fuzzy comprehensive evaluation

20 世纪 90 年代以来,生态补偿作为调整生态环境利用、保护和建设过程中利益相关方的关系,维护和改善生态系统服务的手段而日益受到世界各国的重视。目前,国际上“生态补偿”比较通用的是“生态服务付费(PES)或生态效益付费(PEB),主要有 4 个类型:直接公共补偿、限额交易计划、私人直接补偿和生态产品认证计划。而国内则主要集中在补偿的必要性及理论基础、补偿的具体模式、补偿资金的筹集渠道、补偿标准等几方面。

我国水资源分布呈南多北少特征,与生产力布

局不相适应。因此,跨流域调水工程应运而生。目前,我国已实施的调水工程有引滦入津工程、引黄济青工程等,而正在实施的调水工程——南水北调工程更是举世瞩目的巨型工程^[1]。为保证一江清水送北京,需对中线工程水源地即丹江口水库采取相应的水资源保护及周边地区生态环境保护措施,在作生态修复、水资源保护决策前,需要知道付出多大的代价才能维持和促进生态系统向良性循环的方向发展。将生态系统服务的经济价值融入市场经济运行中去,可以明确生态系统服务的价值,有利于政府和

企业科学决策,促进对环保措施的科学评价,有利于生态功能区划及生态建设规划,促进可持续发展目标的实现。

1 生态系统服务价值的内涵

生态系统服务价值的内涵源自于对生物多样性的研究^[2]。生态系统服务是对人类生存和生活质量有贡献的生态系统产品和生态系统功能。因此,将生态价值划分为生态物品价值(即实物性产出(有市场价值,可以在市场上进行自由交换)和生态系统服务价值(一般不存在有效市场,不能够自然以价格形式在市场上进行转移)^[3]。生态系统服务是生态系统功能的表现,其具体价值组成如图1所示。

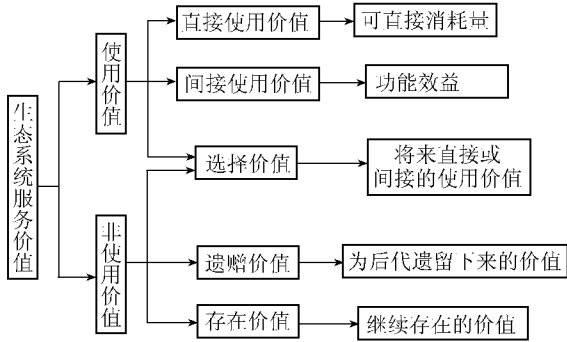


图1 生态系统服务价值构成

2 生态系统服务价值评价方法

2.1 主要评价方法

尽管目前对生态系统服务价值的研究还存在很多分歧,但人们对生态系统服务评估的重要性和现实必要性已达成共识,因此寻找适合的评价方法显得尤为重要。生态系统服务价值评价的主要方法有^[4,5]:

a. 实际市场价值评估法。实际市场法是对有实际市场价值的生态系统产品和服务以它们的市场价格作为生态系统服务的经济价值,主要包括市场价值法和费用支出法。

b. 替代市场评估法。替代市场评估法是对不能在市场上直接获得其价值货币表现的产品和服务,为了对其价值进行测度,在市场上寻找一种与其使用价值相同的物品,通过估算其替代品的价值而代替某些生态服务的经济价值。主要包括机会成本法、费用分析法、影子工程法、人力资本法、旅行费用法和享乐价值法。

c. 模拟市场评估法。用于不能以商品形式出现于市场的生态服务。如果不能观察到人们相关的市场行为,则唯一有效的方法是直接询问人们对该项生态系统服务的提供有怎样的支付意愿,从而获得此项生态系统服务的经济价值。主要包括条件价

值法和集体价值法。

2.2 模糊综合评价方法

鉴于丹江口库区的实际情况,库周涉及县市较多,不便于一一核算其生态系统服务价值,笔者采用模糊综合评判方法进行生态系统服务价值评估。

2.2.1 数学模型^[6,7]

模糊综合评价是对受多种因素影响的事物作出全面评价的一种十分有效的多因素评价决策方法。

模型可以用一个函数表示:

$$V = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: V 为资源价值; x_1, x_2, \dots, x_n 为影响各生态系统资源价值的因素(如农田生态系统中影响其资源价值的因素有提供农产品和轻工业源来源、维持区域生态平衡能力、改良土壤能力等)。

设论域 U 为资源价值要素, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, B 为评判要素集, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$,有 m 种评判,则资源价值综合评估可以用下式来表示:

$$V = A \circ R = (v_{ij})_{1 \times m} \quad (2)$$

式中: A 为要素 x_1, x_2, \dots, x_n 评价的权重向量, $A = (a_{ik})_{1 \times n}$,其中, $k = 1, 2, \dots, n$, R 为由单要素 x_1, x_2, \dots, x_n 评判矩阵所组成的综合评价矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{n \times m} \quad (3)$$

其中, r_{ij} 代表 i 要素第 j 级评价值, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ 。 r_{ij} 的确定,即确定 i 要素中各因素的隶属函数,一般常选用升(降)半梯形分布建立一元线性隶属函数; r_{ij} 亦可以通过专家评估法确定。

$$v_{ij} = \bigvee_{k=1}^m (a_{ik} \wedge r_{kj}) \quad (4)$$

2.2.2 生态系统服务价值量的计算

上述模型综合评价结果 V 是一个无量纲向量,可通过式(5)转化为生态系统服务的价值量

$$W = VS^T \quad (5)$$

式中: S 为价格向量, $S = (P, P_1, P_2, \dots, P_{n-2}, 0)$; $P, P_1, P_2, \dots, P_{n-2}, 0$ 为等差数列; W 为生态系统服务价值量。

3 案例分析

通过对南水北调中线工程水源地即丹江口水库库区(周)的考察,现将研究区域的生态系统划分为农业生态系统、森林生态系统、淡水生态系统和草地生态系统。各生态系统占地面积统计如表1所示。

20世纪80年代以来,生态学家们不断探索定量化分析生态系统服务价值的方法,最具代表性的

表1 库区(周)土地利用类型中
主要拼块类型、数目和面积^[8]

拼块类型	数目/块	面积/km ²
林地	7157	4855
草地	5469	3400
水田	4385	835
旱田	912	1255
水体	105	1005

是 Costanza 等^[9]对全球生态系统服务及其价值的研究,将生态系统服务功能划分为气候调节、水分调节、控制水土流失、娱乐及文化价值等 17 种功能,对全球生态系统服务价值进行了估算,并提出了各种土地类型的生态服务价值系数。我国的一些学者,如欧阳志云等^[10]、陈仲新等^[11]也利用或改进此方法对我国生态系统的服务价值进行了评估。谢高地等^[12]结合我国的特点对 Costanza 等提出的生态系统服务价值系数(表 2)进行修正,得出我国一级生态系统的生态服务价值系数(表 3),进而得出其价值。

表 2 Costanza 等确定的陆地生态系统生态服务价值系数

土地利用类型	生态服务价值系数/(元·hm ⁻²)	土地利用类型	生态服务价值系数/(元·hm ⁻²)
林地	16658	水域	70363
草地	2025	荒漠	0
旱地和水田	764	城乡工矿用地	0
湿地	162514		

表 3 谢高地等确定的中国陆地生态系统生态服务价值系数

土地利用类型	生态服务价值系数/(元·hm ⁻²)	土地利用类型	生态服务价值系数/(元·hm ⁻²)
森林	19613.0	水域	41264.0
草地	6498.0	荒漠	371.4
农田	3433.2	城乡工矿用地	0.0
湿地	56290.0		

下面以农业生态系统为例,作详细求解。

a. 因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, 其中 u_1 为农产品和轻工业原料的产出功能; u_2 为社会保障功能; u_3 为维持区域生态平衡功能; u_4 为提供自然环境的美学、社会文化科学、教育、精神和文化的价值。

b. 评判集 $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$, 其中 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 分别代表好、较好、一般、较差、差。

c. 建立单因素评判矩阵。根据研究区域实际情况,并听取专家意见,构造判断矩阵,本次评估采用 1 分制,由专家评估赋值。得单因素评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0.0 \end{bmatrix}$$

d. 权重向量 A 的确定。根据因素集 $U = \{u_1,$

$u_2, u_3, u_4\}$ 中的 4 个因素,采用层次分析法计算得其权重向量为 $A = (0.3452 \quad 0.3452 \quad 0.2101 \quad 0.0994)$

e. 综合评判。根据式(2)和式(4)得综合评判结果为 $V = (0.2000 \quad 0.3000 \quad 0.3452 \quad 0.2000 \quad 0.000)$

经归一化处理得 $V = (0.1914 \quad 0.2870 \quad 0.3303 \quad 0.1914 \quad 0.000)$

f. 生态系统服务价值量的计算。根据表 3,农田生态服务价值系数为 3433.2 元/hm²,即 $P = 3433.2$ 元/hm²,据此确定价格向量

$$S = (3433.2 \quad 2574.9 \quad 1716.6 \quad 858.3 \quad 0.0)$$

根据式(5)

$$W = VS^T = 2127.191 \text{ (元/hm}^2\text{)}$$

据查,水源地周边地区农田面积为 2090 km²,则农田的生态系统服务价值为 4.44583 亿元。

同理,求得其他生态系统生态服务价值分别为森林 45.1100 亿元、草地 10.5445 亿元、淡水 106.3603 亿元。

4 结 论

通过对丹江口水库库区生态服务价值的评估,可得以下结论。

a. 研究区域农田、森林、淡水及草地生态系统服务总价值为 166.4731 亿元,由此可见,该地区生态资源丰富,淡水生态系统占比例最大,达 63.9%;森林生态系统次之,占 27.1%;草地生态系统占 6.3%;农田生态系统最小,占 3.7%。

b. 模糊综合评判模型的优点在于能对受多种因素影响的事物作出全面评价,给出各因素权重值,通过一个价格向量来计算各生态系统服务价值。缺点在于采用专家赋值法对各生态服务功能打分,主观性较强,同时价格向量难以选取,因此计算结果因人而异。

c. 采用模糊综合评判的方法对丹江口库区生态系统服务价值进行评估,价格向量选用谢高地等确定的生态服务价值系数(只是代表平均水平),从生态系统的经济价值入手,为生态保护、生态修复决策提供有利依据,计算得到研究区域生态服务价值量,为生态补偿标准的制定提供了理论的上限值。

参考文献:

[1] 毛占锋,王亚平. 跨流域调水水源地生态补偿定量标准研究[J]. 湖南工程学院学报, 2008, 18(2): 15-18.
[2] 郭日生,周元. 生态补偿原理与应用[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2009.
[3] 王晶. 生态补偿问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

(下转第 48 页)

- [16] ZURITA F ,ANDA J D ,BELMONT M A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands [J]. *Ecol Eng* 2009 35 :861-869.
- [17] 李旭东 ,周琪 ,张荣社. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究 [J]. *地质前沿* 2005 (12) :73-76.
- [18] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Sci Total Environ* 2007 380 :48-65.
- [19] CHUNG A K C ,WU Y ,TAM N F Y ,et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater [J]. *Ecol Eng* 2008 , 32 :81-89.
- [20] JING Shuh-ren ,LIN Yin-feng ,LEE Deryuan ,et al. Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetland [J]. *Bioresource Technol* 2001 76 :131-135.
- [21] RUIZ-RUEDA O ,HALLIN S ,BAÑERAS L. Structure and function of denitrifying and nitrifying bacterial communities in relation to the plant species in a constructed wetland [J]. *FEMS Microbiol Ecol* 2009 67 :308-319.
- [22] BRISSON J ,CHSZAREN F. Maximizing pollutant removal in constructed wetlands : should we pay more attention to macrophyte species selection ? [J]. *Sci of the Total Environ* , 2009 407 :3923-3930.
- [23] DRIZO A ,COMEAU Y ,FORGET C ,et al. Phosphorus saturation potential : a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems [J]. *Environ Sci Technol* 2002 36 (21) :4642-4648.
- [24] VOHLA C ,KÖIV M ,BAVOR H J ,et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands : a review [J]. *Ecol Eng* 2011 37 :70-89.
- [25] 谭洪新 ,刘艳红 ,周琪. 新建组合填料潜流湿地脱氮除磷研究 [J]. *上海水产大学学报* 2007 16 (1) :73-78.
- [26] 徐丽花 ,周琪. 不同填料人工湿地处理系统的净化能力研究 [J]. *上海环境科学* 2002 (10) :603-605.
- [27] MUÑOZ P ,DRIZO A ,HESSION W C. Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate [J]. *Wat Res* 2006 40 :3209-3218.
- [28] 张建 ,邵文生 ,何苗 ,等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究 [J]. *环境科学* ,2006 ,27 (8) :1560-1564.
- [29] BROOKS A S ,ROZENWALD M N ,GEOHRING L D ,et al. Phosphorus removal by wollastonite : a constructed wetland substrate [J]. *Ecol Eng* 2000 15 :121-132.
- [30] 孙亚兵 ,冯景伟 ,田园春. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究 [J]. *环境科学学报* ,2006 ,26 (3) :404-408.
- [31] 李晓东 ,郎咸明 ,师晓春. 不同人工湿地组合净化生活污水效果研究 [J]. *环境保护与循环经济* ,2009 ,29 (7) :24-25.
- [32] MOLLE P ,STÉHANIE P B ,LIENARD A. Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetlands : a full-scale experiment study [J]. *Ecol Eng* 2008 34 :23-29.
- [33] SEO D C ,DELAUNE R D ,PARK W Y ,et al. Evaluation of a hybrid constructed wetland for treating domestic sewage from individual housing units surrounding agricultural villages in South Korea [J]. *J Environ Monit* 2009 11 :134-144.
- [34] 严立 ,刘志明 ,陈建刚 ,等. 潜流式人工湿地净化富营养化景观水体 [J]. *中国给水排水* 2005 21 (2) :11-13.
- [35] ÖÖVEL M ,TOOMING A ,MAURING T ,et al. Schoolhouse wastewater purification in a LWA-filled hybrid constructed wetland in Estonia [J]. *Ecol Eng* 2007 29 :17-26.
- [36] CLÀUDIA T ,JOAQUIM C ,MANEL P. Constructed wetland clogging : a proposal for the integration and reuse of existing knowledge [J]. *Ecol Eng* 2009 35 :1710-1718.

(收稿日期 2010-04-25 编辑 徐 娟)

(上接第 36 页)

- [4] 王彦梅. 浅谈水资源价值的内涵、构成及影响因素 [J]. *宿州学院院报* 2008 (4) :158-160.
- [5] 江中文. 南水北调中线工程汉江流域水源保护区生态补偿标准与机制研究 [D]. 西安 : 西安建筑科技大学 2008.
- [6] 谢季坚 ,刘承平. 模糊数学方法及其应用 [M]. 武汉 : 华中科技大学出版社 2006.
- [7] 姜文来. 水资源价值论 [M]. 北京 : 科学出版社 ,1998.
- [8] 雷少平 ,柳七一 ,阮娅 ,等. 南水北调中线一期工程环境影响复核报告书 [R]. 武汉 : 长江水资源保护科学研究所 2006.
- [9] COSTANZA R ,D 'ARGE R ,de GROOT R ,et al. The value of the world 's ecosystem services and natural capita [J]. *Nature* , 1997 387 (4) :253-260.
- [10] 欧阳志云 ,王效科 ,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及生态经济价值的初步研究 [J]. *生态学报* ,1999 ,19 (5) :607-613.
- [11] 陈仲新 ,张新时. 中国生态系统效益的价值 [J]. *科学通报* 2000 45 (1) :17-22.
- [12] 谢高地 ,鲁春霞 ,冷允法 ,等. 青藏高原生态资产的价值评估 [J]. *自然资源学报* 2003 18 (2) :189-195.

(收稿日期 2010-05-15 编辑 徐 娟)