

经济合理的生态用水量及其计算模型(I)——理论

陈兴茹, 刘树坤

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要 在分析国内外生态需水量研究现状的基础上, 指出当前的生态用水研究存在偏重于理论、未与具体研究区域的时空特点相结合的缺陷, 导致生态用水理论较难应用到实际当中。基于目前生态用水研究的现状, 提出了“经济合理的生态用水量”的概念, 建立了计算模型, 其基本思路为将总用水量分为工业、农业、生活、第三产业、生态环境用水五大部分, 按照其优先次序, 计算总用水效益最大的各个用水户的相应用水数量; 提出了模型中各个参数的量化方法。“经济合理的生态用水量”的提出及其模型的建立, 表明人们对生态用水的认识开始由理论研究向实践应用转变。

关键词 经济合理的生态用水量; 生态用水估算方法; 服务功能; 计算模型

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2006)05-0001-06

Rational volume of ecological water consumption and its calculation model I :Theory//CHEN Xing-ru, LIU Shu-kun
(Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract : Based on the current situation of the study on ecological water requirement at home and abroad, it is pointed out that some defects in current study on ecological water consumption, such as paying much attention to theoretical study and without combination with the spatial-temporal characteristics of the studied areas, make it difficult for the ecological water consumption theory to be put into practice. In consideration of the above fact, a new concept of economically rational volume of ecological water consumption is put forward, and its calculation model is established. In this model, the total volume of water consumption is divided into five parts, i. e. industrial water consumption, agricultural water consumption, domestic water consumption, the tertiary industrial water consumption, and eco-environmental water consumption, and the volumes of water consumption of different parts are calculated at maximal benefit of total water consumption according to their priorities. Moreover, the method for determining the model parameters is also given. The development of the new concept and the calculation model demonstrates that the feasibility and practicality of the theory will be emphasized in the further study.

Key words : rational volume of ecological water consumption; ecological water consumption; method for estimation; service function; calculation model

当前对生态需水的研究大多从生态用水户角度出发, 根据不同的生态环境保护等级确定生态用水户的最小生态需水量、适宜生态需水量、最优生态需水量等等。然而, 事实是当前水资源的短缺状况使生态需水在大多数情况下都不能得到很好的满足, 经济用水挤占生态用水, 两者之间的矛盾仍然很突出。因此, 寻求适合当地实际情况的生态用水量成为解决问题的关键。

在水资源极其紧张的条件下, 生态系统的保护和修复要有一个过程, 只有逐步、合理地协调生态用水和经济用水之间的关系, 才能真正地实现生态环境保护与经济可持续发展的双赢。因此, 在社会经济发展的不同阶段寻求经济用水和生态用水之间的平衡点, 即寻求适合研究区域特定时空背景的“经济

合理的生态需水量”成为当前的重要课题。

1 “经济合理的生态用水量”的理论基础

1.1 “生态用水”的概念

关于“生态用水”的定义有很多, 本文选择以下两种说法。一种说法是: 生态用水是指在特定的时空范围内, 其生态系统维持一定的稳定状态所实际利用的水量(包括地表水、地下水和土壤水)。生态用水亦称生态环境用水^[1]。另一种说法是: 广义的生态环境用水是指“维持全球生物地理与生态系统水分平衡所需要的水量, 包括水热平衡、生物平衡、水沙平衡、水盐平衡等所需要的水都是生态环境用水”, 狭义的生态环境用水是指为了维护生态环境不再恶化并逐渐改善所需要消耗的水资源量^[2]。

尽管生态用水和环境用水在概念上有所区分,但由于生态用水和环境用水在实际应用上的不可分性,笔者不再对生态用水和环境用水进行区分,认为生态用水与生态环境用水等同。笔者认为:生态用水是在特定的时空范围内,保证生态系统和生态环境维持一定的稳定状态所需要的水量。

生态用水量与生态需水量是不同的:生态用水量是指在特定的时空范围内,使生态系统维持一定的稳定状态时所实际利用的水量。生态用水量概念的提出本身就是针对一定的生态保护目标的结果,因此,它是变量,大小取决于人类的主观意识,即随着人们对生态恢复和保护目标制定的高低不同而不同,是实际值,即人们已经应用到生态系统恢复、保护或重建所实际发生的水量。生态需水量是指在一定的生态保护、恢复或建设目标下,在特定的时空范围内,其生态系统维持良好的稳定状态所需要的水量。生态需水与相应的生态保护、恢复或建设的目标直接相关,生态保护、恢复或建设目标不同,生态需水就会不同^[1],它是一个变量,是客观生态系统达到某一保护、恢复和建设的目标所需要的水量,是人们在确定生态保护、恢复或重建目标后,实际分配生态用水时的参考值。

1.2 生态用水研究与应用发展概况

1.2.1 国外生态用水研究与应用概况

美国早期的环境用水定义可描述为:服务于鱼类和野生动物、娱乐及其他美学价值类的水资源需求。关于河道最小生态流量核算,美国也做了大量的工作,提出了许多计算方法。20世纪40年代,美国鱼类和野生动物保护协会开始对河道内流量进行研究,并于1971年出台河道内流量法确定自然和景观河流的基本流量。直到20世纪90年代以来,生态系统需水量研究才正式成为全球关注的焦点。法国1992年颁布的水法规定,“要保证河流的最低生物流量,在渔业法和乡村法中,要求水利工程施工建设和运用管理应当保证河道内最小流量的底限。澳大利亚把“低地河流系统环境需要的水量”作为1996~1997年研究与发展计划项目。英国环境部2001年《面向未来的水资源》报告中,对未来25年英国的环境用水和社会用水需要进行了分析,提出了30个行动方案措施^[3]。1996年,Gleick明确给出基本生态需水的概念框架,即提供一定质量和数量的水给天然生态环境,以求在最大程度上改变天然生态系统的过程,并保护物种多样性和生态完整性^[4]。

Falkenmark^[5]将“绿水”(green water)的概念从其他水资源中分离出来,提醒人们注意生态系统对水资源的需求。Rashin等^[6]提出了可持续的水利用要

求,即要保证足够的水量来保护河流、湖泊和湿地生态系统,人们所使用的作为娱乐、航运和水利的河流、湖泊要保持最小流量,但作者并没有给出明确的概念和计算方法。Whipple等^[7]提出了类似的观点,认为水资源的规划和管理应更多地考虑环境需求。Baird等^[8]针对各类型生态系统的基本结构和功能,较详细地分析了植物与水文过程的相互关系,强调了水作为环境因子对自然保护和恢复所起的重要作用。

1.2.2 国内生态用水研究与应用概况

我国环境水利工作者从20世纪70年代末期开始讨论环境容量、河流最小流量的问题,长江水资源保护科学研究所最早进行了“环境用水初步探讨”的研究工作。1990年《中国水利百科全书》也提出环境用水是指“改善水质、协调生态和美化环境等的用水^[9]”。汤奇成^[10]以新疆地区为背景,论述了生态环境用水的主要用途,对一些重要的湖泊进行补水和人工植被用水;贾宝全等^[11-12]以新疆为例探讨了生态用水的概念和分类,并据此对新疆生态用水进行了初步计算,我国从保护生态环境的目标出发对黄河、淮河、海河的河道内生态环境需水量进行了估算,并对全国生态环境用水制定了800亿~1000亿 m^3 的目标等等,有关生态环境用水的研究尽管起步较晚,但进展较快。

水利行业作为水管理的主要部门,近年来也逐渐认识到水生态环境保护的重要性,并逐渐落实到具体工作当中。具体表现:2001年水资源管理工作的15件大事中有7件与生态环境保护有关,黄河流域通过实施水资源统一调配,在花园口站来水量比多年平均偏少62%的情况下,再次实现全年不断流;黑河流域成功进行了第二次分水,第三次从博斯腾湖向塔里木河下游调水,尾间台特马湖已经形成了 10km^2 的水面,地下水埋深从过去的平均13m上升到平均7.8m,生态环境得到了改善;山东济南市通过加强地下水管理,限采地下水及回补地下水,实现泉水复涌^[13],取得了良好的社会效益等等。

1.2.3 当前研究中存在的问题

当前生态需水的研究偏重于基础理论研究,未结合研究地区的具体实际情况,综合考虑地区水资源条件、人口条件、经济条件、自然条件等。因此目前关于生态需水问题的研究很多不能在实际当中得到很好的应用。

1.2.4 未来研究发展方向

未来生态环境用水的研究应立足于研究地区的具体实际,研究适合区域特点(包括经济、水资源、生态环境、产业结构、用水优先次序等),综合考虑水资

源的各种价值(包括经济价值和环境价值)以水资源使用效益最优为总体目标的生态环境需水量的计算方法。

1.3 水生态系统服务功能及其价值量化的方法

水生态系统服务功能是指水生态系统及其生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用。它不仅是人类社会经济的基础资源,还维持了人类赖以生存与发展的生态环境条件^[14]。对生态系统服务功能进行研究并加以量化,有助于经济用水和生态用水之间的平衡,有助于水资源使用的经济效益、生态效益和社会效益的最优化。

1.3.1 水生态系统服务功能的分类

根据水提供服务功能的不同,可分为水经济服务功能和水生态系统服务功能两大类。水经济服务功能是指维持人的生产与生活活动的功能,包括生活用水、农业用水、工业用水、发电、航运、渔业等;水生态系统服务功能是指水维持自然生态过程与区域生态环境的功能,包括泥沙的输移、营养物质的运输、环境净化、维持森林、草地、湿地、湖泊、河流等自然生态系统的结构与过程,以及其他人工生态系统的功能。

1.3.2 水生态系统服务功能价值的量化方法

水生态系统服务功能价值的量化方法主要有市场价值法、机会成本法、影子价格法、影子工程法、费用分析法、人力资本法、资产价值法、旅行费用法和条件价值法等。各方法具体计算过程可参考文献^[13]。

2 “经济合理的生态用水量”概念的建立

2.1 经济用水与生态用水的效益关系分析

生态系统和经济系统是相互依存的,只有达到两者的协调,所创造的社会财富才是最大的。当生态用水趋于零时,由于支撑社会经济发展的生态系统将趋于崩溃,所以不仅生态价值趋向于零,而且社会经济价值也趋向于最小。此时,水的社会、经济和生态价值之和趋向于最小。当生态用水趋向于水资源总水量,即回到最原始时代,社会经济用水趋向于零。虽然生态系统健康发展,但是由于社会经济用水无水可用,社会经济价值趋向于零,而生态价值是建立在社会经济价值基础之上的,没有社会经济价值,人类将无法生存,生态价值也就无从谈起。因此,此时水的总价值趋向最小。在生态用水为某一中间值时,生态系统和社会经济均因为获得适量的水而协调发展,生态价值和社会经济价值均较大。此时,水的总效益最大^[15],生态用水量和经济用水量比例最佳。经济合理的生态用水量与总体经济效益之间的关系见图 1^[15],图中 V 代表总效益(生态效益与经济效益之和), Q 代表生态用水量, Q_m 为

最佳的生态用水量, V_m 为最大效益。

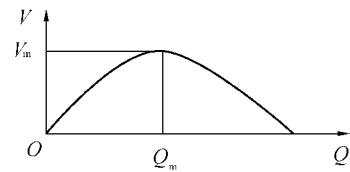


图 1 生态用水与总效益关系示意图

2.2 “经济合理的生态用水量”的定义

经济合理的生态用水量的提出是基于在当前的水资源供需条件下,一时无法满足生态修复目标确定的生态用水量时,退而求其次,在保证生态环境不进一步恶化的前提下,追求用水效益的相对综合优化。

所谓“经济合理的生态用水量”,是指在一定的时空范围内,在总用水量有限,生态用水和经济、生活用水存在矛盾的情况下,综合考虑区域内社会经济发展水平、社会经济发展对水资源的用水需求、水资源的总体状况、水生态系统的现状、水生态系统拟要恢复的目标、生态环境缺水对未来社会经济的影响等基础条件,兼顾区域经济可持续发展、人民生活与水生态系统恢复、保护或重建等经济效益、社会效益、生态效益等总效益综合最优时所需要的生态用水量。经济合理的生态用水量的内涵可从以下几个方面理解:①大于或等于最小生态需水量,不造成生态系统的继续恶化;②小于理想的生态需水量(最优生态需水量);③在当前条件下,经济、社会、生态的综合效益最大。

在水资源比较紧张的地区,一时不能满足理想的目标需水量时,可以在不造成生态环境持续恶化的条件下适当控制生态用水量,追求比较大的综合效益,促进社会经济发展。在经济发展的过程中,通过发展节水技术、调整产业结构等,进一步优化用水结构,增加生态用水,逐步达到生态修复目标需水量。因此,经济合理的生态用水量是暂时的用水量,是不断增加的动态水量。

3 “经济合理的生态用水量”的确定方法

为了简化起见,本研究认为水资源总量可分为社会经济用水和生态用水两部分,且不考虑两者之间的相互转换。

3.1 生态用水和经济用水比例的确定

理想情况下,水资源利用效益最大的生态用水和经济用水比例的确定方法如下:假设某一区域内的水资源总量为 $X_{总}$,若生态用水量为 $X_{生态}$,其可产生的生态效益为 $B_{生态} = F(X_{生态})$,则经济用水量为 $X_{总} - X_{生态}$,相应可产生的经济效益为 $B_{经济} = G(X_{总} - X_{生态})$,则经济效益与生态效益之和为

$B_{\text{总}} = F(X_{\text{生态}}) + \alpha(X_{\text{总}} - X_{\text{生态}})$ 。如果不考虑地域因素、经济因素、水资源因素等,单纯考虑整体效益最大化的原则,则根据生态经济的边际效益原理,使经济效益和生态效益总和最大的生态用水量式为式(1)成立时的水量。

$$\frac{\partial B_{\text{生态}}}{\partial X_{\text{生态}}} = \frac{\partial B_{\text{经济}}}{\alpha(X_{\text{总}} - X_{\text{生态}})} \quad (1)$$

3.2 模型的建立

模型拟采用‘多目标分层优化’法^[16],该方法的基本思路为:按照每个目标函数在总目标函数当中的优先次序不同,确定各个目标函数实现的先后顺序,然后对模型在可行域内逐层进行求解,直到求解完最后一层,所得的解即为模型的非劣解。

上述理想情况下的生态用水和经济用水比例的确定方法是本模型建立的基本指导思想,所不同的是模型考虑了具体研究区域的社会经济条件、水资源条件、生态环境基础状况、产业结构调整,因此,模型的计算结果与‘经济合理的生态用水量’的基本内涵相对应。

本研究中,把城市用水分为生活用水、工业用水、第三产业用水、生态用水和农业用水五部分。其中,生活用水指小生活用水,不包括第三产业用水,专指保证人民正常生活需要的基本生活用水;工业用水包括建筑业用水;农业用水包括农田灌溉用水和林牧渔用水;城市生态用水主要包括城市河道生态用水、城市绿地用水和城市河湖生态用水。

目标函数:

$$\begin{aligned} &\min\{P_1(-B(W_{\text{生活}})), P_2(-B(W_{\text{工业}})), \\ &P_3(-B(W_{\text{第三产业}})), P_4(-B(W_{\text{生态环境}})), \\ &P_5(-B(W_{\text{农业}})), P_6(-B(W_{\text{生活}} + W_{\text{工业}} + \\ &W_{\text{第三产业}} + W_{\text{生态环境}} + W_{\text{农业}}))\} \end{aligned}$$

式中: $B(W_{\text{生活}})$, $B(W_{\text{工业}})$, $B(W_{\text{第三产业}})$, $B(W_{\text{生态环境}})$, $B(W_{\text{农业}})$ 分别为生活用水效益、工业用水效益、第三产业用水效益、生态用水效益、农业用水效益; $P_i(x)$ 为以 x 为变量的函数,如 $P_1(-B(W_{\text{生活}}))$ 为以生活用水效益为变量的函数。为简化起见,以下分别以 P_i 代表 $P_i(x)$,如 P_1 代表 $P_1(-B(W_{\text{生活}}))$ 。

各个目标函数之间的优先层次如下:

a. 模型的第一个优先层次:水资源使用的社会效益、经济效益、环境效益三者总和最大,即 $\min\{-P_6, -(P_2 + P_3 + P_5), -P_4\}$;

b. 模型的第二个优先层次:基本生活用水必须得到满足,即 $\min\{-P_1\}$;

c. 模型的第三个优先层次:经济用水效益和生

态用水效益最大,即 $\min\{-(P_2 + P_3 + P_5), P_4\}$ 。
约束条件如下:

a. 生活用水约束:

$$W_{\text{生活}} \geq A_{\text{人均用水定额}} N_{\text{人口数}} \quad (2)$$

b. 生态用水约束:

$$W_{\text{生态环境}} \geq W_{\text{城市最小生态环境需水}} \quad (3)$$

$$W_{\text{生态环境}} = W_{\text{生态}} + W_{\text{环境}} + W_{\text{景观}} \quad (4)$$

c. 农业、工业、第三产业用水量约束。结合经济发展规划和水资源规划,在保证生活、生产和经济正常运行用水的基础上,确定农业、工业、第三产业用水量的范围:

$$Z_{\text{农业下}} \leq W_{\text{农业}} \leq Z_{\text{农业上}} \quad (5)$$

$$Z_{\text{工业下}} \leq W_{\text{工业}} \leq Z_{\text{工业上}} \quad (6)$$

$$Z_{\text{第三产业下}} \leq W_{\text{第三产业}} \leq Z_{\text{第三产业上}} \quad (7)$$

d. 效益正增长约束。水资源使用由经济用水转向生态用水后,效益的改变量为正值。设 ΔW 为经济用水变为生态用水的水资源量,则需满足以下条件:

$$B_{\text{生态}}(\Delta W) - B_{\text{经济}}(\Delta W) \geq 0 \quad (8)$$

e. 供需平衡约束:

$$\begin{aligned} W_{\text{总用水量}} &= W_{\text{农业}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{第三产业}} + \\ &W_{\text{生活}} + W_{\text{生态环境}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{总可利用水量}} &= W_{\text{地表}} + W_{\text{地下}} + W_{\text{污水回用}} + \\ &W_{\text{新开源水量}} + W_{\text{外调水}} + W_{\text{雨洪水利用}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$W_{\text{总需水量}} \leq W_{\text{总可利用水量}} \quad (11)$$

式中: $A_{\text{人均用水定额}}$ 为研究区域的人均用水定额; $N_{\text{人口数}}$ 为研究区域的生活用水的人口数; $W_{\text{环境}}$, $W_{\text{生态}}$, $W_{\text{景观}}$ 分别为天然和人工环境用水量、天然和人工生态用水量以及景观用水量; $Z_{\text{农业下}}$, $Z_{\text{农业上}}$, $Z_{\text{工业下}}$, $Z_{\text{工业上}}$, $Z_{\text{第三产业下}}$, $Z_{\text{第三产业上}}$ 分别为农业用水量下限、上限,工业用水量下限、上限,第三产业用水量下限、上限; $B_{\text{生态}}(\Delta W)$ 为经济用水和生态用水之间相互转换 ΔW 时所产生的生态效益的变化量; $B_{\text{经济}}(\Delta W)$ 为经济用水和生态用水之间相互转换 ΔW 时所产生的经济效益的变化量; $W_{\text{总可利用水量}}$, $W_{\text{地表}}$, $W_{\text{地下}}$, $W_{\text{污水回用}}$, $W_{\text{新开源水量}}$, $W_{\text{外调水}}$, $W_{\text{雨洪水利用}}$ 分别为研究区域内可利用水量、地表水水量、地下水水量、污水回用量、新开水源供水水量、外调水供水水量、雨洪水利用水量。式中所有变量均大于或等于零。

具体计算时,要根据不同地区、城市的个性特征(经济发展水平、水资源紧张程度、生态环境基础条件、节水空间等)对模型中的具体参数进行合理定

量,从而求得合理的计算结果。

3.3 模型中各个参数的确定

3.3.1 生活用水效益的计算方法

以研究区域基本生活用水量为划分生活用水与经济用水的界限,若生活用水量在基本生活用水量以内,则按照生活用水计算用水效益;若超出基本生活用水量,多出的部分按照经济用水计算用水效益。

$$B(W_{\text{生活}}) = A_{\text{人均用水定额}} N_{\text{人口数}} V_{\text{生活用水}} + (W_{\text{生活}} - A_{\text{人均用水定额}} N_{\text{人口数}}) V_{\text{经济用水}} \quad (12)$$

式中: $V_{\text{生活用水}}$ 为单方生活用水效益; $W_{\text{生活}}$ 为生活用水总量; $V_{\text{经济用水}}$ 为单方经济用水效益。

3.3.2 工业用水效益的计算方法

$$B(W_{\text{工业}}) = \sum_{i=1}^n W_i A_i \quad (13)$$

式中: W_i 为某用水户的用水量; A_i 为各个用水户单方水效益; i 为工业用水的各个用水户; n 为工业用水户个数。工业用水对水污染的经济损失以水污染价值法计算。工业用水效益与其对水资源污染的经济损失之差作为工业用水的净效益。

3.3.3 第三产业用水效益的计算方法

$$B(W_{\text{第三产业}}) = \sum_{j=1}^m W_j A_j \quad (14)$$

式中: W_j 为某用水户的用水量; A_j 为各个用水户单方水效益; j 为第三产业用水的各个用水户; m 为第三产业用水户个数。

第三产业用水的后效损失以水污染价值法进行计算。第三产业用水效益与其对水污染的经济损失之差作为第三产业用水的净效益。

3.3.4 生态用水效益的计算方法

3.3.4.1 地表水生态用水效益计算方法

$$B(W_{\text{生态环境}}) = \sum_{p=1}^l \sum_{k=1}^t b_{pk} \quad (15)$$

式中: b_{pk} 为某个生态用水户、某项生态系统服务功能可产生的生态效益; l 为某个生态用水户所具有的生态服务功能数量; t 为研究区域内生态用水户个数。水体各项服务功能的具体计算方法详见文献[13]。本文由于篇幅所限,不再赘述。

3.3.4.2 地表水对经济的推动作用

a. 房地产效益:

$$B_{\text{房地产}} = AS \quad (16)$$

式中: A 为单位面积土地提升的平均价值; S 为水体可影响的土地面积。

b. 城市居住环境改善的价值。一般环境系统对经济系统的服务功能效益计算采用“支付意愿法”计算,其原理详见文献[17]。

c. 城市形象提升、投资环境的改善等对城市经

济的推动作用:

$$B = F(\alpha_2) - F(\alpha_1) \quad (17)$$

式中: B 为城市形象提升、投资环境改善可产生的效益; α_2 为生态用水增加后,城市形象、投资环境等对城市经济的归因系数; α_1 为生态用水增加前的城市形象、投资环境等对城市经济的归因系数; $F(x)$ 为与城市形象、投资环境等有关的城市经济效益函数。

3.3.4.3 城市绿地用水的生态环境价值计算

绿地具有释氧固碳、蒸腾吸热、杀菌、减污、滞尘和涵养水源、改善大气环境质量等生态环境价值。可根据相关研究的数据,如植被年均吸收二氧化碳、释放氧气、蒸腾吸热、滞尘量等参数计算绿地的生态用水价值^[18]。涵养水源的价值计算一般认为茂密的植被1年中截留的水为年降水量的25%~30%,可计算出年截留水量,再用替代工程法计算相同库容的蓄水设施的投资,即为涵养水源的价值。改善大气质量的价值可采用如下参数计算:灭菌价值、增加负氧离子价值、蓄水保墒价值、增湿调温价值等^[17]。

3.3.4.4 地下水生态环境价值计算

地下水资源的生态环境功能主要表现为对地表植被存活和生长的支持作用(根系汲水)、支持地表生态环境系统相对稳定的作用(防止地面沉降、防止地表土壤的沙化和盐碱化)、对赋存于地下的生态环境系统的支持作用(地下生物的营养供给、防止海水入侵、防止土壤次生盐渍化、调节潜水矿化度)。地下水生态环境的价值主要包括地表植被的根系汲水(潜水蒸发量所需水量)的价值、防止土壤次生盐渍化的植物损失的价值、导致生态环境变化而间接表现出来的社会经济损失的价值^[18]。

3.3.4.5 地表水、地下水单方水生态环境价值计算

对上述地表水的生态系统服务功能及可产生的相关效益计算的总和作为地表水的生态环境效益,地表水生态环境效益总和与地表水生态环境用水量之商即为地表水单方水的生态环境价值;地下水的计算方法同地表水。

3.3.5 农业用水效益的计算方法

$$B(W_{\text{农业}}) = \sum_{s=1}^r W_s A_s \quad (18)$$

式中: W_s 为某个农业用水户的用水量; A_s 为某个农业用水户单方水效益; r 为农业用水户个数。

另外,农业生态系统是人工生态系统,农业用水除了发挥经济效益外,还可发挥生态效益,因此,还应对农田的生态系统服务功能进行价值核算。表^[19]列出了农业生态系统功能及其价值评估方法。

农业用水的后效损失:以农业用水对水资源造

表 1 农业生态系统服务功能及其价值评估方法

生态服务价值类型	具体服务功能形式	生态服务价值评估方法
产品服务价值	粮食、蔬菜、瓜果、糖类、动物肉类产品、蛋奶产品、渔产品、食用菌、饲料产品、花卉产品、纤维产品、木材产品、药材、工业原料产品等	市场价值法、生产力评价法等
环境服务价值	物质循环功能、能量转化功能、调节气候功能、保持水土功能、生物多样性维持功能、环境净化功能、防灾功能等	市场价值法、影子价格法、机会成本法、工资差异法、房地产评估法等
旅游服务价值	旅游观光、娱乐、休闲、体验农业生活、修养身心等	旅行费用法、享乐价格法、费用支出法、问卷调查法等
文化美学价值	农业文化、农业认知、农业教育、农业精神文化、农业生态美学等	条件价值法、问卷调查法等

成的污染损失计算其后效成本。农业用水效益与后效成本之差即为农业用水净效益。

3.3.6 水资源使用总效益的计算方法

$$B(W_{\text{总用水量}}) = B(W_{\text{生活}}) + B(W_{\text{工业}}) + B(W_{\text{第三产业}}) + B(W_{\text{生态环境}}) + B(W_{\text{农业}}) \tag{19}$$

4 结 语

“经济合理的生态用水量”的提出是对水资源价值全面认识的结果,是适应我国当前以经济发展为主题,水资源紧缺、经济用水和生态用水矛盾突出等时代背景的必然产物。只有充分认识水资源的生态环境价值,认识到水生态环境的重要地位及其可产生的巨大效益和作用,才能对水资源进行有效、合理的配置,均衡经济用水和生态用水比例,实现经济和生态环境的可持续发展。“经济合理的生态用水量”的提出是对生态环境用水理论认识的深入,开始从理论研究向注重实际工作的可操作性和可行性转变,为我国今后合理分配生态用水和经济用水,实现生态环境效益和经济效益的双赢提供了参考。

参考文献：

[1] 杨爱民,唐克旺,王浩,等.生态用水的基本理论与计算方法[J].水利学报,2004(12):39-45.
[2] LIU Chang-ming. China's water supply and demand in 21st century[J]. China Water Resources,1999(10):18-20.
[3] 苗鸿,魏彦昌,姜立军,等.生态用水及其核算方法[J].生态学报,2003,23(6):1156-1164.
[4] GLEICK P H. Water in crisis:paths to sustainable water use[J]. Ecological Application,1996,8(3):571-579.
[5] FALKENMARK. Coping with water scarcity under rapid popu-

lation growth[R]. Pretoria SADC Minsters,1995:23-24.
[6] RASHIN P D,HANSEN E,MARGOLIS R M. Water and sustainability:global patterns and long-range problems[J]. Natural Research Forum,1996,20(1):1-15.
[7] WHIPPLE W,DUBOIS J D,GRIGG N,et al. A proposed approach to coordination of water resource development and environmental regulations[J]. Journal of the American Water Resources Association,1999,35(4):713-716.
[8] BAIRD A J,WILBY R L. Eco-hydrology:plant and water in terrestrial and aquatic environments[M]. London and New York:Routledge Press,1999:78-156.
[9] CUI Zong-pei. China water resources cyclopedia:2nd volume[M]. Beijing:Water Power and Water Electric Press,1990:183.
[10] 汤奇成.绿洲的发展与水资源的合理利用[J].干旱区资源和环境,1995,9(3):107-112.
[11] 贾宝全,许英勤.干旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例[J].干旱区地理,1998,21(2):8-12.
[12] 贾宝全,慈龙骏.新疆生态用水量的初步估算[J].生态学报,2000,20(2):243-250.
[13] 王浩,陈敏建,唐克旺.水生态环境价值和保护对策[M].北京:清华大学出版社,2004.
[14] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等.水生态服务功能分析及其间接价值评价[J].生态学报,2004,24(10):2091-2099.
[15] 徐志侠,董增川,唐克旺,等.生态用水决策过程、研究层次及生态需水重要概念研究[J].水利水电技术,2005,36(3):9-12.
[16] 胡毓达.实用多目标最优化工[M].上海:上海科学技术出版社,1990.
[17] 王寿兵,王平建,胡泽园,等.用意愿评估法评价生态系统景观服务价值——以上海苏州河为例[J].复旦学报:自然科学版,2003,44(3):463-467.
[18] 倪红珍.基于绿色核算的水资源价值与价格研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2004.
[19] 章家恩,饶卫民.农业生态系统的服务功能与可持续流域对策探讨[J].生态学杂志,2004,23(4):99-102.

(收稿日期:2006-01-05 编辑:骆超)

