

# 生态用水的估算方法研究和探讨

张 杰, 高学峰, 王润元

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,  
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘 要:** 针对“生态用水 概念及使用混乱的现象, 本研究对生态系统的需水、用水的概念进行描述和界定, 并对背景和研究状况进行了综述, 提出了不同生态系统的用水估算方法。在此基础上, 提出了目前生态用水的相关研究中存在的问题, 以及在生态用水的机理上研究方面的可能突破。最后讨论了在全球气候变暖、水资源短缺的背景下, 生态用水的时间变化及与之相应的水资源供需平衡问题将会成为关注的热点问题。

**关键词:** 生态用水; 估算方法; 问题探讨; 展望

**中图分类号:** P333.1 **文献标识码:** A

## 引 言

水资源分布的时空差异和人类活动的影响, 使得区域或全球性的水资源供需矛盾突出。由于认知的问题, 传统的水资源管理模式是以满足经济需水为目标, 严重忽视了水资源消耗大户生态系统的需水, 从而付出了使生态环境质量遭受破坏的巨大代价<sup>[1]</sup>。近年来, 随着生态系统功能的损失和紊乱日趋严重, 人们才认识到地球生命支持系统的承载能力问题和生态系统的健康问题, 提出了生态需水的概念<sup>[2]</sup>。生态需水是保证生态系统的生物、物理、化学平衡, 使其最大程度发挥效益功能, 提供最优的生态服务, 并始终处于良性循环状态下的维持生态系统和谐稳定的最小用水量, 简言之, 就是生态系统需要多少水就提供多少水。其前提是水资源得以满足的情况下生态系统的需水问题<sup>[3]</sup>。而实际上, 生态系统的脆弱现状已经表明水资源的供给往往不能满足生态需求。为了评估水资源的供需平衡、生态系统的脆弱性程度和水资源宏观调控, 已有学者提出了生态用水的概念<sup>[4]</sup>。

生态用水不同于生态需水和生态环境需水, 由于研究对象不同, 对这些概念的界定多达 20 多种, 导致了其分类和计算方法差别很大。目前主要的研

究对象有 4 种, 即对植被、河流、城市、湿地等生态用水的研究<sup>[5-8]</sup>, 生态用水的机理包括水分循环与水量平衡、水热平衡、水沙平衡、水盐平衡等<sup>[9]</sup>。实际上, 由于研究对象不同或其它原因, 仍有一些研究将生态用水定义为生态需水和生态环境需水<sup>[10-12]</sup>, 使其很难在水资源优化配置和生态环境建设的实践中发挥应用。

本研究将就生态用水的研究现状、研究方法及相关定义的界定进行概括, 并探讨其应用现状与未来可能的应用领域。然后, 针对生态用水的概念界定、计算方法以及实践中存在的问题, 提出了从多学科多角度考虑、了解生态用水的机理, 进而使生态用水的概念界定、估算方法形成一个统一的整体。同时, 提出了 3 点未来急需解决或可能被关注的问题。

## 1 国内外研究概况

在美国, 20 世纪中期, 随着水库建设规模的扩大和水资源开发程度的加强, 资源管理部门开始关注渔场的问题。20 世纪 60 年代前后开展了许多关于鱼类生长繁殖、产量与河流流量关系的研究, 从而提出了河流最小流量的概念<sup>[13]</sup>。这时提出的河流

收稿日期: 2008 - 03 - 10; 改回日期: 2008 - 05 - 08

基金项目: 2008 年中国气象局气候变化专项、甘肃省自然科学基金 (3ZS051 - A25 - 011) 资助

作者简介: 张杰 (1974 - ), 女, 甘肃民勤人, 助理研究员, 在读博士, 主要从事陆面过程、边界层的研究及陆气相互作用的遥感反演研究。E-mail: gs\_zhangjie@163.com

最小流量相当于目前所说的生态用水量。自 20 世纪 70 年代中期以来,特别是近十几年来,美国在水资源配置中更加重视生态环境用水,已经把保护和改善环境作为水资源管理的一个重要任务,通过保证生态用水来涵养生态系统,使其更好地服务于鱼类和野生动物、娱乐及其它。英国从 20 世纪 60 年代起即开始实施取水许可证制度。英国政府通过国家环境署推行流域取水管理战略(CAMS),按流域分析水的供需平衡、环境平衡、水资源的优化配置、跨流域调水的必要性和可行性、工程布局及其成本。通过环境署发放取水许可证和排污许可证,实行水权分配、取水量管理、污水排放和河流水质控制;通过水服务办公室颁布费率标准,确定水价;通过饮用水监督委员会制定生活水质标准、实施水质监督<sup>[14]</sup>。二战后至 1969 年这一时期,法国由一个农业国迅速向工业国转变,快速的工业发展和城市化进程,造成了水需求量的迅速增长和水污染的加剧。针对这种状况,法国于 1964 年颁布了以用户为基础(即以区域为主)的水资源管理法律,对水资源管理体制进行改革。目标是既满足用户的用水需求,又满足环境保护的需求。1992 年新的《水法》进一步加强了这一管理体制,明确将河流最小生态需水放在了仅次于饮用水的优先地位<sup>[15]</sup>。其他发达国家和一些发展中国家也都认识到了生态用水的重要性,采用积极措施来保证生态系统的用水量<sup>[16]</sup>。

在我国的用水制度中,工业用水、农业用水、生活用水,以及改革开放以来产生的特种用水、其他用水都形成了长期的、传统的供用水体制,唯独环境生态用水没有列入长期的用水制度中。不过,从 1970 年代末,环境水利工作者已开始讨论环境容量、河流最小流量问题。1990 年出版的《中国水利百科全书》提出环境用水是指“改善水质、协调生态和美化环境等用水”<sup>[17]</sup>。

汤奇成在 1995 年提出“生态环境用水”的概念,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用于人工植被<sup>[18]</sup>。1996 年, Gleick 明确给出基本生态需水(Basic ecological water requirement)的概念框架,即提供一定质量和一定数量的水给天然生态,以求最小化地改变天然生态系统的过程,也就是在人类开发利用水资源过程中,尽可能减少对自然环境的破坏,即干扰自然生态系统、保护物种多样性和生态整合性<sup>[2]</sup>。国内在“九五”攻关项目“西北地区水资源合理配置和生态环境保护

研究”中首次确定了生态需水这一研究方向,并明确了生态需水以保护生态准则为依据。随后国内有关生态用水的研究迅速开展起来<sup>[19-20]</sup>。

随着对生态用水重要性认识和观念的转变,生态用水的定性描述和概念界定就显得尤为重要,这将为定量估算原理和方法有一定帮助。鉴于现有关于生态用水认识存在一些混乱,下面对定性描述和定量估算进行逐一描述。

## 2 生态用水的定义

目前,关于生态用水的定义多达 20 余种,杨爱民等<sup>[4]</sup>认为其原因主要有:(1)研究对象不同;(2)对水资源内涵的理解不一;(3)对需水和用水内涵的认识不同;(4)对生态、环境和生态环境内涵的理解有差异。概念的确定需要遵循一定的原则,包括概念的通用性、广义性、科学性。在探讨生态用水的概念问题时,需要对与生态用水有关的概念如“生态系统”、“水资源”、“用水量”等的概念进行界定。生态系统是指在一定空间内由生物成分和非生物成分组成的一个生态学功能单位,包括大气、水、生物、土壤和岩石及其相互作用。生态系统的稳定和发展建立在生态平衡的基础上。水资源包括地表水、地下水、大气水和土壤水等。生态系统的水分包括 3 部分:作为无机环境组成部分的河、湖等地表水体以及其它无机环境中的水分;绿色植物的用水;动物用水等。用水量是指为维持某种平衡状态实际消耗的水量。

有人认为生态用水就是生态环境用水,杨志峰等将生态和环境加以区分<sup>[21]</sup>,认为生态是指生态系统中的有生命的生物,而环境则是指非生命的无机组分。一般情况下,生态用水是在特定的时空范围内,其生态系统维持一定的稳定状态时所实际消耗的水量,包括地表水、地下水、大气水和土壤水等。其中包括了无生命组分的用水,所以从目前的概念上来说,“生态环境用水”和“生态用水”的意义是一致的。举例来说,河道生态用水是指河道输水过程中因输沙、泄洪、自净、景观、航运、生态等所消耗的水量;湿地生态用水是指维持湿地状态、生物多样性、人类活动以及生态环境所需要的水量;城市生态用水是指河流湖泊、林地草坪等城市生态系统所消耗的用水以及为城市休憩、娱乐等景观、碳氮代谢、生物多样性等服务所消耗的水量;植被区生态用水是指<sup>[1]</sup>植被生态系统为维持自身生长、发挥生态功

能所消耗的水量。包括植被生长发育、迎合大气蒸腾和物质运移的生理消耗性用水,维持植物生理活动的土壤水分蒸发生态消耗用水,为植物生长提供的环境用水,不参与物理形态变化的植物非消耗性用水等。

生态用水不同于生态需水,用水是实际消耗的水量,需水则是指某一时段所需要的水量。生态用水注重实际利用的水量。二者的主要区别在于:生态用水是在现实的供水状态下所消耗的水量;而需水则是作物满足自身生长发育的需求所需的水量,是一种理想状态下的用水量,这在干旱区很难实现,即使在湿润地区,也很难估算出来,因为生态系统所维持的平衡态都是在不同环境下形成的。

### 3 生态用水的估算方法

刘昌明<sup>[9]</sup>提出了自然生态与人类环境用水需遵循的4大平衡原则,即水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡及区域水量与供需平衡。不论研究对象如何变化,对生态用水的估算应遵循生态用水的平衡原则。目前研究的主要生态用水类型有植被、河流、城市、湿地等。

#### 3.1 植被生态用水量核算

植被生态用水包括天然植被生态用水和人工植被生态用水。人工植被生态用水的核算方法很多,如蒸腾法、干物质法、土壤蒸渗仪法、水热系数法等。按照植被生态用水概念的界定,植被生态系统用水可分为3部分:生理消耗性用水,生态消耗用水,植物非消耗性用水。根据绿色植物的光合作用机理,植物生长发育的生理用水等微观用水效应可转化为宏观的系统特征加以计算。光合作用机理可用下面方程来表示:



目前 $\text{CO}_2$ 的光合作用、同化速率以及植物净第一生产力NPP的研究方法比较成熟,如CASA模型中包括了碳固定、NPP、NEE(net ecosystem exchange)等与 $\text{CO}_2$ 有关的模块,而 $\text{CO}_2$ 的同化速率与植物的微观用水量关系是一定的,因此,这些方法为生理耗水量的估算奠定了基础。

植被的另一部分生理消耗用水即为植被蒸腾量,与植被的生态耗水量共同组成蒸散发量。研究

认为植被生长发育过程中光合作用消耗的水分,相对植被蒸散发消耗量可以忽略不计,通常认为植被的生态用水就是蒸散发量。在水资源的平衡中,根据能量平衡原理估算得:

$$E = R_n - H - G \quad (2)$$

其中, $E$ 为潜热通量, $R_n$ 为净辐射, $H$ 为感热通量, $G$ 为土壤热通量。

蒸散量包括植物蒸腾和土壤蒸发2部分,通过潜热通量可以求算每旬蒸散量 $E$ (单位为mm):

$$E = E/L \quad (3)$$

植被生态用水还包括植物非消耗性用水,即土壤含水量,其中一部分土壤含水量并不参与蒸发过程,只是为植被生长提供环境条件和保持生态平衡。通常在估算植被生态用水时,仅考虑蒸散发量<sup>[22]</sup>。

天然植被靠降水中不形成径流的水来维持生长,其生态用水量可以直接由降雨量减去径流量计算得到<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 河流生态用水量核算

确定河道内流量的方法可以分为2大类:一类是标准设定法,该法是确定一个保护河流流量权所需的最小流量标准。标准设定法又可分为非现场类型方法,如Tennant法或Montana法,以及7Q10法和栖息地保持类型法,如R2cross和湿周法。另一类方法是“增加法”,如IFM/PHABSM法。

对于不同时段、不同河段的河流系统生态用水量主要包括:(1)维持河流系统的稀释自净能力所消耗的水量 $w_d$ , (2)维持河流下游地区生态适宜的地下水水位所消耗水量 $w_g$ , (3)维持河流系统水沙平衡所消耗的冲沙水量 $w_s$ , (4)维持河流系统水生生物栖息地所消耗的水量 $w_h$ , (5)维持水源涵养林所消耗水量 $w_f$ , (6)维持水域蒸发所消耗的水量 $w_e$ 。因此总用水量为:

$$W_r = w_d + w_g + w_s + w_h + w_f + w_e \quad (4)$$

对于河道系统来说,其输水量总是>河道系统的生态用水量,也>河道的生态需水量,否则,所输水量将被河道生态系统所消耗。笔者认为,类似于这种供水大于生态需水的系统,生态系统的用水量

就是生态系统的需水量,因此,其估算方法也是一致的,生态用水量各分量的估算方法可根据生态需水估算得到。

### 3.3 城市生态用水量核算

城市生态用水是河流湖泊、林地草坪等城市生态系统所消耗的用水,为城市休憩、娱乐等景观、碳氮代谢、生物多样性等服务消耗的用水量。包括城市绿地用水  $w_g$ 、湖泊水面蒸发  $w_e$ 、湖泊水下渗  $w_1$ 、环境卫生用水  $w_h$  等。绿地用水一般采用定额法计算:

$$\begin{aligned} W_r &= w_g + w_e + w_1 + w_h \\ &= (A_1 \times q) + ((E - P)A_2 / 1000) \\ &\quad + (A_2 \times h) + (A_3 \times q) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $q$  为绿化用水定额 ( $m^3 / (a \cdot m^2)$ ),  $A_1$  为绿化覆盖面积 ( $m^2$ )。  $E$ 、 $P$  为城市的蒸发和降水量 (mm),  $A_2$  为城市的水面面积 ( $m^2$ ),  $h$  为年渗漏水深 (mm),  $A_3$  为建城区面积 ( $m^2$ ),  $q$  为环境卫生用水定额 ( $m^3 / m^2$ )。

### 3.4 湿地生态用水量核算

目前关于湿地生态用水量的核算,大多参照河流生态用水进行核算。湿地的用水主要包括蒸散发耗水量(包括蒸发和蒸腾)和地下水交换<sup>[24]</sup>。

## 4 关注的研究问题

### 4.1 概念界定

生态用水涉及到生态学、水文学、水资源学和地学等学科,并成为 20 世纪 90 年代和 21 世纪初的研究热点,目前的研究状态主要对概念界定和计算方法探讨较多,由于对交叉学科的研究不足,对概念的界定不统一以及对用水机理的研究不透彻,使得各类估算方法存在各自的局限性。有很多研究将生态用水和生态需水相互混淆。

### 4.2 计算方法

生态用水是生态系统在特定环境下的实际耗水量,随着环境的变化而变化。有些生态用水的计算方法缺乏机理探讨,估算方法不能体现环境对生态用水的影响。以植被生态用水为例,植被生态系统用水包括植被生长发育的生理消耗性用水、维持植物生理活动的土壤水分蒸发生态消耗用水、不参与物理形态变化的植物非消耗性用水。在实际应用中,很多研究认为植被生长发育进行光合作用消耗的水量较少可以忽略不计,但随着全球  $CO_2$  的增加,

气温升高,植物的生物量表现出增加的态势,这将意味着光合作用消耗的  $H_2O$  也在增加;另外,全球变暖,气温升高将促进蒸散发量的增加,如果植被生态系统的生态用水估算中不考虑外界环境的影响,将很难反映生态用水的真实状况。

### 4.3 生态用水尺度

由于生态用水的计算方法中采用了一些统计方法的系数,在一定程度上限制了该方法在更大尺度上的推广应用。目前大部分研究对生态研究局限于某一时段或某一河道等较小尺度,而对于整个流域、更大的生态系统如干旱区等大尺度的研究较少。由于研究尺度增加将使得环境条件变得相对复杂,需要做大量观测研究,采用遥感资料调查有助于提高对大尺度的认识。杨志峰等<sup>[22]</sup>基于 MODIS 数据估算海河流域植被生态用水,其方法探讨为大尺度生态用水估算和评估奠定了基础。

## 5 讨论与展望

在淡水资源相对亏缺的状态下,要实施水资源系统的可持续发展,需要协调好生态用水与经济用水的优化配置模式。因此,气候变化对生态用水和经济用水的脆弱性、适应性评估显得尤为重要。

生态用水是一门多学科交叉学科,目前的研究仍处于初始阶段,也产生了很多概念的界定和计算方法。由于对生态用水的形成机理了解欠缺,不同方法都有其各自的局限性。因此,生态用水的机理问题研究成为迫在眉睫的重要任务。

随着遥感技术的发展和定量遥感方法的改进,大尺度生态用水的时空分布可以采用遥感估算得到。另外,研究发现,西北干旱区人工绿洲区植被生态用水有显著的增加,增加趋势率为 2.5%;随着全球气候变化对生态系统的影响,也将会对生态用水、不同区域尺度上流域承载力产生影响,进而引起水资源调控管理方式的转变。因此,生态用水的时间变化、与之相应的水资源供需平衡问题将会成为关注的热点。

### 参考文献:

- [1] 胡廷兰,杨志峰. 林地生态用水亏缺的经济损失估算研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 345 - 351.
- [2] Gleick P H. Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use[J]. Ecological Applications, 1996, 8(3): 571 - 579.
- [3] 栗晓玲,康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 740 - 744.

- [4] 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.
- [5] 王西琴,杨志峰,刘昌明.河道最小环境需水量确定方法及其应用[J].环境科学学报,2001,21(5):548-552.
- [6] 周跃武,冯建英译.美国20世纪干旱指数评述[J].干旱气象,2006,24(1):79-89.
- [7] 王胜,王亚明,王润元,等.近10a来祁连山地区气候及水资源研究现状[J].干旱气象,2007,25(3):82-87.
- [8] 崔保山,杨志峰.湿地生态环境需水量研究[J].环境科学学报,2002,22(2):219-224.
- [9] 刘昌明.中国21世纪水供需分析:生态水利研究[J].中国水利,1999,(10):18-21.
- [10] Poff N L, Ward J V. The physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatio-temporal heterogeneity[J]. Environmental Management, 1990, 14: 629-646.
- [11] James C S. The role of hydraulic in understanding river process National Rivers Initiative, South African Society of Aquatic Scientists, Pietemari burg, South Africa, 1998.
- [12] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514.
- [13] 林超等译.美国的环境用水[R/OL].2000-05. <http://www.cws.net.cn>
- [14] 矫勇,陈明忠,石波,等.英国法国水资源管理制度的考察[R/OL]. <http://www.shuigong.com>
- [15] 水利部黄河水利委员会编译.法国卢瓦尔河2布列塔尼流域水资源整治及管理指导纲要.2000.
- [16] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002(9):14-26.
- [17] 崔宗培.中国水利百科全书(第二卷)[M].北京:中国水利出版社,1990.183.
- [18] 汤奇成.绿洲的发展与水资源的合理利用[J].干旱区资源与环境,1995,9(3):107-111.
- [19] 钱正英等.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[M].北京:中国水利出版社,2001.
- [20] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Aology[J]. A quatic Ecosystem Health and Management, 1998, 1: 109-124.
- [21] 杨志峰,崔宝山.生态环境需水量理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2003.
- [22] 杨志峰,姜杰,张永强.基于MODIS数据估算海河流域植被生态用水方法探讨[J].环境科学学报,2005,25(4):449-456.
- [23] 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.
- [24] 李九一,李丽娟,姜德娟,等.沼泽湿地生态储水量及生态需水量计算方法探讨[J].地理学报,2006,61(3):289-296.

## Estimation Method of Ecological Water Use and Relative Questions

ZHANG Jie, GAO Xuefeng, WANG Runyuan

(Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA; Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** The issues about ecological water use are summarized from its concept, background, estimation method and research advances. On the basis of the summary, some questions in research at present and the possible breakthrough in mechanism investigation of ecological water use are put forward. At last, it is pointed out that under the background of climate warming and shortage of water resource, the spatial and temporal variation of ecological water use corresponding to supply and demand balance of water resource will become hot scientific issue.

**Key words:** ecological water; estimation method; issue discussion; prospect