J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(4):465-480
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

生态需水理论与方法研究进展*

崔　瑛[1],张　强[1,2]**,陈晓宏[1],江　涛[1,2]
(1:中山大学水资源与环境系,广州 510275)
(2:南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098)

摘　要:生态需水研究是近年来国内外广泛关注的热点,涉及生态学、水文学、环境科学等多个学科. 本文系统回顾了国内外生态需水的研究进展,较为全面的介绍了生态需水的概念、特征和分类,并在将区域生态需水的定量计算分为河道内和河道外两部分的基础上,总结并介绍了河道内(包括河流、河口、湖泊)和河道外(包括植被、动物、湿地、城市和回补超采地下水)生态需水的各种计算方法. 特别是对国内外河流生态需水计算方法的基本思想、优缺点及其适用范围做了重点介绍,并分析了国内外计算方法存在差异的原因. 通过对过去生态需水研究的总结与分析认为,我国研究目标多集中在水资源供需矛盾突出以及生态环境相对脆弱和问题严重的干旱、半干旱和季节性干旱的湿润区,且以河流生态系统的需水作为主要研究对象. 但由于起步晚,在这方面的研究还不是很成熟,生态需水的概念、内涵和外延均未有统一的定义;同时,在借鉴国外生态需水各种计算方法来进行我国的生态需水研究时,应考虑是否符合我国国情以及气候水文特征,不能机械照搬. 再者,笔者认为:① 在考虑各种方法联系机制的前提下,对其进行合理耦合,取长补短,并进一步加强3S等新技术的应用;② 加强对水资源虽相对丰沛,但由于水污染严重而存在水质性缺水的湿润地区,如华南珠江流域的生态需水研究等,将成为今后的发展方向.
关键词:生态需水;理论与方法;研究进展

Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement

CUI Ying[1], ZHANG Qiang[1,2], CHEN Xiaohong[1] & JIANG Tao[1,2]
(1: *Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou* 510275, *P. R. China*)
(2: *Hydraulic Research Institute of Hydrology and Water Resources and State Key Laboratory of Hydraulic Engineering, Nanjing* 210098, *P. R. China*)

Abstract: Ecological water requirement (EWR) is one of the global foci-research subjects in environmental related field, which has an inter-relationship with ecology, hydrology, environmental science, etc. This paper reviews the research advances in EWR at home and abroad, introducing the concepts, classifications and characteristics of EWR and summarizing calculating methods for EWR: inside river course (including rivers, estuaries and lakes) and outside river course (including vegetation, animals, wetlands, cities and covering over-exploitation of ground water). Especially the basic ideas, advantages, disadvantages and conditions in terms of practical application EWR calculation of river ecosystem are pointed out. Meanwhile, the reasons of differences between domestic and foreign research methods are discussed. Foregoing analyses evoke some questions about the current study of EWR in China: 1) a consistent and sound understanding of the concept, connotation and extension of EWR has not been obtained so far; 2) great attentions should be paid to the applicability of the foreign calculation methods in China; and 3) further progress about the development and application of EWR will be promising due to: combining domestic with foreign calculation methods and reasonable improvement, strengthening the application of new technologies such as 3S, enhancing the research of EWR in humid areas, where water quality-induced water shortage such as South China Pearl River Basin.

---

* 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放项目(2009491511)、中山大学理工科青年教师重点培育计划项目(2009-37000-1132381)与"百人计划"人才引进项目(37000-3171315)、中国科学院南京地理与湖泊研究所前沿领域创新研究项目(CXNIGLAS200814;08SL141001-28005)和国家自然科学基金重点项目(50839005)联合资助. 2010-01-29 收稿;2010-04-19 收修改稿. 崔瑛,女,1987 年生,硕士.
** 通讯作者;E-mail:zhangq68@mail.sysu.edu.cn.

Keywords:Ecological water requirement;fundamentals and application;literature review

水作为一种特殊的资源,不仅是维持地球生态平衡的重要控制因素,更是人类赖以生存发展的必不可少的物质基础.然而,由于人类不合理的利用,当前面临的水资源问题已日趋严重.在我国,这些问题主要表现有:西部干旱区生态环境破坏严重、北方地区沙尘暴肆虐、华北平原地下水枯竭,地面沉降、黄河频繁断流、海河水污染等[1];长江、珠江等南方大江河的这些现象虽还不十分明显,但一系列生态和环境问题已在局部地区显现.如长江口的赤潮,枯季海水入侵河道影响取水,湖泊富营养化[2];珠江流域部分地区水环境严重恶化,广州、东莞等城市已出现水质性缺水[3].因此,以水资源短缺与生态恶化为主要特征的水问题,其复杂性和解决难度成为我国独特的国情.特别是1980s以来,我国以发展经济为重点开发利用水资源,加之缺乏正确的生态价值观的指导,在水资源竞争使用过程中形成了城市用水和工业用水挤占农业用水,农业用水又挤占生态用水的格局,导致生态用水严重不足[4].由此可见,为协调社会发展与生态环境之间的关系,维护生态平衡;实现水资源的合理开发、配置,促进水资源的可持续利用,对生态需水理论和实践的研究已势在必行.

1 生态需水的内涵

1.1 国内外的相关概念

现阶段生态需水的概念还未得到统一,其研究主体不明确,在实际应用中存在不同的理解.诸多学者根据研究对象的具体情况对其进行界定,出现不同的定义.

1993年,Covich[5]强调了在水资源管理中要保证恢复和维持生态系统健康发展所需的水量.1996年,Gleick[6]明确给出了基本生态需水的概念,即提供一定质量和一定数量的水给自然生境,以求最少改变自然生态系统的过程,并保证物种多样性和生态完整性.在其后续研究中将此概念进一步升华并同水资源短缺、危机与配置相联系.Falkeiunark[7]将绿水的概念从其他水资源中分离出来,提醒人们要注意生态系统对水资源的需求而不仅仅只满足人类的需求.在国内,研究的生态需水更广泛,涉及了水域(河流、湖泊、沼泽湿地等)、陆地(干旱区植被)、城市等诸多生态系统,不同研究者的研究侧重点不同,生态需水的定义也不同.真正具有普适性的生态环境需水定义,是2001年钱正英等在《中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告》中提出的,即:从广义上讲,生态需水是指维持全球生态系统水分平衡包括水热平衡、水盐平衡、水沙平衡等所需用的水.狭义的生态环境需水是指为维护生态环境不再恶化,并逐渐改善所需要消耗的水资源总量[8].这一定义得到了众多学者的肯定与支持[9],很多研究也以此定义为基础[10].例如:河口区生态系统可根据水盐平衡来确定生态环境需水[11-12];河流生态环境需水的输沙部分[13-14],特别是多沙河流的生态环境需水,可采用水沙平衡来确定.

1.2 生态需水的概念辨析

生态需水是一个复杂的概念,至今国内外对其仍没有形成一个明确统一的定义,出现了诸如环境需水、生态用水、生态耗水等不完全相同、但又紧密联系的概念.它们在使用过程中常常混用或是相互替代,带来许多不便.这里综合国内有关生态需水分类的研究,以此对生态需水各相关概念的异同加以说明.

(1)按照生态环境需水量的基本特征和表现,可将其分为生态需水量和环境需水量[15].生态需水量的研究对象多侧重于生物群落,是为了解决生态问题,主要考虑依赖于水而生存的动物、植物、微生物所消耗的水量[16].环境需水量的研究对象则侧重于自然环境,是专门为解决环境问题,如治理污染、保护水环境景观等所需要的水量[16].总之,虽然生态需水与环境需水两者之间存在着交叉与重合的部分,但从概念上讲是两个不同的概念,应该加以区别.比如说我国北方地区主要是由于干旱缺水导致生态环境极为脆弱,因此其需水更强调水量;而我国南方地区多为水质性缺水,因而对水质的要求更高,其需水更加强调的是环境需水.

(2)按照生态需要和实际用水,可将其分为生态需水和生态用水[17].生态需水是从生态系统自身需求的角度来说的,是生态系统自身固有的属性,其水量配置是合理的可持续的.生态用水概念是我国学者汤奇成等[18]于1989年在分析新疆塔里木盆地水资源与绿洲建设问题时首次提出来的.其强调某种生态水平下

或某种生态系统平衡条件下的实际使用水量[16]. 该水量未必是合理和可持续的，是可以人为控制的过程，即生态用水量可能由于水资源的短缺小于其对应的生态需水量，也可能由于水资源丰沛或不合理利用大于生态需水量，但生态需水是生态用水的依据.

（3）按照生态系统利用水资源的方式，可将其分为生态储水和生态耗水[16]. 生态系统对获得的水资源，一部分用于消耗，另一部分则存储起来；前者称为耗水，后者称为储水. 从理论上讲，需水包括储水与耗水两部分；而从水量平衡与水资源配置时间的角度来看，只要满足耗水则可满足生态系统的需求.

（4）按照人类对水源的控制能力，可将其分为可控生态需水和不可控生态需水[17]. 前者是指非地带性植被所在系统天然生态保护与人工建设消耗的径流量；后者指地带性植被所在系统天然生态保护与人工建设消耗的降水量.

（5）按照生态系统形成的原动力，可将其分为天然生态需水和人工生态需水[4,17].

（6）按照生态系统的组成，可将其分为绿色植物需水、动物需水和维持无机环境的生物地理平衡所需的水分[19].

（7）按照生态系统所处的空间位置，可将其分为河道内生态需水和河道外生态需水. 这是目前比较通行的一种分类方法. 河道内生态需水可包括河流、湖泊与河口生态需水等，河道外生态需水包括河道外湿地、陆地植被、地下水和城市生态需水等[4]. 也有学者从其它角度出发，认为河道内生态需水包括维持水生生物生存和生物多样性，以及防止河道泥沙淤积、水质污染、海水入侵、河道断流、湖泊萎缩等所需的最小河道流量. 河道外生态需水主要指维持河道外植被群落稳定所需要的水量[17,20].

（8）按照地理景观的角度，可将其分为水域或陆地生态需水[15]. 其中，水域包括河流、湖泊和湿地生态需水；陆地主要指植被和城市生态需水.

1.3 生态需水的特性分析

1.3.1 时空变化性　对不同的时间尺度，在年内和不同年际之间，不同的生态系统分区如干旱区、湿地、湖泊、林地和绿洲等生态系统，生态需水量是不同的. 例如对河流生态流量而言，不同时期、不同断面的生态流量是有差异的. 所以，不仅要保证在一定时间内总的生态需水量，还要保证其在区域空间和立体空间上的合理分布[15].

1.3.2 水质水量一致性　生态需水作为水资源的一部分，应具有水资源的性质，有“量”无“质”，或有“质”无“量”均不能称之为水资源[21]. 当前，随着水污染的加剧，水质已经成为生态系统的限制性因子. 因此，生态需水不仅要满足生态系统水量方面的需求，而且要满足水质方面的需求.

1.3.3 动态性　从某种意义上讲，生态需水是维持某种生态系统平衡所需要的水量，即要满足生态系统内诸生态要素（如动物、植物、微生物）对水分的需求. 这些生命要素的生命特征就是不断运动，包括季节变化、年际变化、演替与演化[22]. 所以，由此计算的生态需水量也是动态变化的.

1.3.4 目标性[15]　由于水生生态系统的功能多样，相应的生态目标也会有不同. 而生态需水量是为满足一定的生态保护目标制定的，所以不同地区的生态目标不同，生态需水量也就不同，我们在确定生态需水量之前，首先要确定水生生态系统的管理目标.

1.3.5 不确定性和阈值性[4]　生态需水量受自然和人类活动双重影响，是一个逐渐积累变化的过程，有其自身的趋势和一定的波动性，因而，有一定的变动范围，具有统计的平均意义. 但是，又必须是在一定的阈值内波动，即存在一个最小（或最大）的临界值. 在阈值范围内，则生态系统能够维持现状；一旦某阈值被超越，系统的一些基本功能就会明显减弱，系统的健康就会受到损害并趋于恶化甚至衰亡.

2 国内外生态需水量研究的发展过程

2.1 国外研究

生态环境需水量研究最早起始于美国，主要集中在河流方面[23-25]. 早在1940s，随着水库的建设和水资源开发利用程度的提高，美国的资源管理部门开始注意和关心渔场的减少问题. 美国渔业与野生动物保护协会对河道内流量进行了较多研究，主要是关于鱼类生长繁殖和产量与河流流量关系，并首先提出了“Instream Flow Requirement”的概念——避免河流生态系统退化的河流最小生态流量[26]. 1950s－1960s，出现了

关于河流生态流量的定量研究和基于过程的研究.一些早期的工作建立了流量和流速、鲜鱼、大型无脊椎动物、大型水生植物的联系.在此期间,河流生态学家将注意力集中在能量流,碳通量和大型无脊椎动物生活史方面[27].随后,国外学者对印度和孟加拉的布拉马普特拉河流域(1960 年)、巴基斯坦的印度河流域(1968 年)和埃及尼罗河工程(1972 年)进行了重新评价和规划[15,28].1970s 以来,澳大利亚、南非、法国和加拿大等国家针对河流生态系统,比较系统地开展了关于鱼类生长繁殖、产量与河流流量关系的研究,提出了一些计算和评价方法[29].1980s 初,美国全面调整了对流域的开发和管理目标,形成了生态环境需水分配的雏形.特别在河道内基本流量计算方面已形成了较为完善的计算方法,如 IFIM 法、Tennant 法等.但是,并没有明确的提出生态环境需水量计算方法[6,30].

1990s 以后,通过水资源和生态环境的相关性研究,生态环境需水量研究才正式成为全球关注的焦点问题之一[31].研究对象也由过去仅关心的物种(如鱼类和无脊椎动物等)及河道物理形态的研究,扩展到维持河道流量的研究,包括最小流量和最适宜流量,而且还考虑了河流生态系统的整体性,其研究方向也不再局限于河流生态系统,已扩展到了河流外生态系统,但对其他生态系统的需水研究成果较少,仅仅是概念上的描述[32-33].近十年来,国际之间加强了合作,如 FRIEND(Flow Regimes and Network Data)组织所倡导的行动计划将研究成果概括在 FRIEND 报告[34]中,如北欧地区枯水流量和干旱研究、南非区域水资源和干旱评估方法研究、西非、中非地区雨量减少对枯水流量长期影响研究、枯水流量时间系列与断流分析以及地域性生态水文学理论和水资源统一管理的论述等[23].

综合上述研究,国外生态环境需水研究主要集中在河流生态环境需水方面.其研究内容可概括为:河道流量与鱼类生息环境关系的研究;河道流量、水生生物与溶解氧三者之间的关系研究;水生生物指示物与流量之间的关系研究;水库库存调度考虑生态环境、生态环境需水量的优化分配研究;生态环境需水与经济用水关系的研究等.

2.2 国内研究

国内对生态环境需水的研究也是从河流生态系统开始的.生态环境需水的研究尚处于起步阶段,对生态环境需水的概念、内涵与外延等没有统一的定义,对其计算方法的研究也不够深入、不够完善,基本停留在定性分析和宏观定量分析阶段.其研究大致可分为以下几个时期:

(1) 1970s 末,开始研究探讨河流最小流量问题,主要集中在河流最小流量确定方法的研究方向.水利部长江水资源保护科学研究所的《环境用水初步探讨》是其典型代表.

(2) 1980s,针对水污染日益严重的问题,国务院环境保护委员会在《关于防治水污染技术政策的规定》中指出:在水资源规划时,要保证为改善水质所需的环境用水.主要集中在宏观战略方面的研究,对如何实施、如何管理仍处于探索阶段.

(3) 1990s 以来,由于西北内陆地区生态环境恶化,生态问题突出,首先开始了对西北干旱、半干旱区生态用水研究.国家"九五"科技攻关项目"西北地区水资源合理利用与生态环境保护"对干旱区生态需水进行了系统研究,提出了针对干旱区特点的生态需水研究计算方法,并于 2003 年出版了该项目的系列专著[35].从此揭开了我国生态用水研究的序幕.之后,黄淮海平原区河道断流、河道淤积、地下水大面积超采、河流入海口淤积、海水入侵、河流污染等问题引起了人们的关注,开始了黄淮海平原地区河流湖泊生态需水的研究[36].近年来,在南水北调水资源配置、水利与国民经济协调发展等项目,以及新的全国水资源规划中,都将生态需水作为供需平衡必须考虑的内容.生态需水已越来越受到人们广泛的关注与重视,并逐渐成为水资源学科的研究热点.

尽管我国在生态环境需水量研究方面起步较晚,但研究进展较快.到目前为止生态用水研究目标多集中在水资源供需矛盾突出以及生态环境相对脆弱和问题严重的干旱、半干旱和季节性干旱的半湿润区.研究对象主要集中在陆地和河流两个方面[23].主要的研究成果有:

(1) 对水资源缺乏的西北干旱、半干旱区[10,18,35,37-41]和黄河[13-14,42-45]、海滦河流域[12,46-47]生态需水量及河道环境需水量的探讨与宏观定量研究.

(2) 生态需水量计算原理研究方面,刘昌明[48]从水资源开发利用与生态、环境相互协调发展角度出发,提出了计算生态需水量应遵循四大平衡原则:水热(能)平衡、水盐平衡、水沙平衡以及区域水量平衡与供需

平衡. 丰富了水资源合理开发利用的理论内涵.

（3）对恢复湿地、城市河湖用水及地下水回补等环境需水量的研究[49].

（4）基于遥感和地理信息系统技术，结合水资源计算理论和植被生态理论的区域生态需水量的研究[50]. 总的特点是从生态系统的整体性出发，针对河流、湿地、陆地、城市等不同的生态环境类型，不同生态系统的功能，采用了不同的计算方法，而华南诸河流生态需水研究方面较为薄弱，尚处于起步阶段.

3 生态需水的计算方法

生态需水的计算方法很多，全球生态需水计算方法超过 200 种[51]. 综合对比后，本文认同徐志侠[53]等的分类方法，将河流、湖泊、湿地、植被、城市和地下水这六类分别划入河道内和河道外生态需水一级分类之中，并在河道外生态需水一项中增加了动物生态需水. 需要说明的是，本文中所指的河口生态需水实质上就是一些文献[1,52]中划入河流生态需水内的“入海需水量”一项，本文将其独立归入河道内生态需水.

3.1 河道内生态需水计算方法

3.1.1 国外河流生态需水计算方法

3.1.1.1 水文学方法　在一些文献中也称作“历史流量法”[52-53]、“统计学观点”[54]. 它利用历史流量资料来推导河流生态流量. 主要方法有以下几种：

① Tennant 法[55]：又称作蒙大拿法. 该法通过建立起来的流量和栖息地质量之间的经验公式，仅使用历史流量即可确定生态需水量. 取年天然径流的百分比作为河流生态需水的推荐值. 如 10% 的年平均流量是退化或贫瘠的栖息地条件；20% 的年平均流量提供了保护水生生物栖息地的适当标准；在小河流中，30% 的年平均流量接近最佳生物栖息地标准.

表 1 Tennant 法对栖息地质量的描述[43]

Tab. 1 Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources

流量值及相应栖息地的定性描述	推荐的基流占平均流量百分比(%)	
	一般用水期(10－3 月)	鱼类产卵育幼期(4－9 月)
最大	200	200
最佳范围	60－100	60－100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差或最差	10	10
极差	0－10	0－10

河道生态环境需水量计算公式为：

$$W_t = \sum_{i=1}^{12} M_i N_i$$

其中，W_t 为河道生态环境需水量，M_i 为一年内第 i 个月多年平均流量，N_i 对应第 i 月份的推荐基流百分比. 该方法的优点是：不需要现场观测，在有水文站的河流，年平均流量的估算可以从历史资料获得；在没有水文站的河流，可通过可以接受的水文技术来获得平均流量. 但是该方法没有考虑到河道流量的动态变化，未明确水环境、生态特征等影响因素，没有从流域特性及成因规律分析流量的特点. 该法在优先度不高的河段，研究河流流量时作为推荐值使用. 一般具有宏观的定性指导意义，作为其他方法的一种检验.

② Texas 法[56]：该法是在 Tennant 法的基础上进一步考虑了水文季节变化因素，通过对各月的流量频率曲线进行计算后，取 50% 保证率下的月流量的特定百分率作为最小流量. 其特定百分率的设定以研究区典型植物以及鱼类的水量需求为依据. 该法具有地域性，对流量变化主要受融雪影响的河流较适用.

③ NGPRP(Northern Great Plains Resource Program)法[57]：是将水文年按枯水年、平水年和丰水年分组，

取平水年组90%保证率流量作为最小流量.其优点是考虑了枯水年、平水年和丰水年的差别,综合了气候状况以及可接受频率因素,缺点是缺乏生物学依据.

④ 基本流量法(Basic Flow Method)[58]:是选取平均年的1,2,3,…,100d的最小流量系列,计算1和2、2和3、3和4,…,99和100点之间的流量变化情况,将相对流量变化最大处点的流量设定为河流所需基本流量.该法是根据河流流量变化状况确定所需流量,能反映出年平均流量相同的季节性河流和非季节性河流在生态环境需水量上的差别,计算简单,但缺乏生物学资料证明.

3.1.1.2 水力学方法 该方法应用水力学现场数据,分析河流流量与鱼类栖息地指示因子之间的关系,从而确定生态需水量.最常用的水力学法是考虑湿周随流量变化的方法.

① 湿周法[59]:湿周即过水断面上,河槽被水流浸湿部分的周长.该方法假设保护好临界区域的水生栖息地的湿周,也将对非临界区域的栖息地提供足够的保护.这是因为通常湿周是随着河流流量的增大而增加的,然而,当湿周超过其临界值时,河流流量再大量增加,湿周的增加量变化也很小.因此,只要保护好临界湿周,也就能基本满足非临界状态下的河流水生生物栖息地的最低要求.通常假设浅滩是最临界的栖息地类型,湿周的断面一般选在浅滩.该计算方法的基本思想是:首先通过确立河流流量与湿周的函数关系,绘制出湿周-流量曲线.有三种方法:可从多个河道断面的几何尺寸-流量关系实测数据经验推求;或从单一河道断面的一组几何尺寸-流量数据中计算得出;或利用曼宁公式.然后找曲线上的变化点,即最大曲率或斜率为1处的那个点对应的流量就是最小生态流量.适用范围:由于该方法得到的河流流量值会受到河道形状的影响,因此,该法大部分应用于宽浅河道.

② R2CROSS法[59]:该法由美国科罗拉多州水利局的专家开发并应用.R2CROSS法具有和湿周法相同的假设,即假设浅滩是最临界的栖息地类型,保护浅滩栖息地也将保护其他的水生栖息地,如水塘和水道.该法将平均深度、平均流速以及湿周占横断面周长的百分数作为反映生物栖息地质量的水力学指标.若能在浅滩类型的栖息地保持这三种参数在足够的水平上,将足以维持冷水鱼类与水生无脊椎动物在水塘与水道的水生生境.其中,所有河流的平均流速推荐采用30.48cm/s的常数;平均深度、湿周长百分数标准分别是河流顶宽和河流总长与湿周之比的函数.所以,该法确定最小生态需水量具有两个标准:一是湿周率,二是保持一定比例的河流宽度、平均水深以及平均流速.该法以曼宁公式为基础,计算所需水量.使用在一个河流断面上现场收集到的数据对未观测到的水力学参数进行模拟.起初,该法的河流流量推荐值是按年控制的,后来生物学家又研究根据鱼的生物学需要和河流的季节性变化分季节制定相应的标准.

表2 采用R2CROSS单断面法确定最小流量的标准[43]

Tab.2 The criterion of the ascertainment of the minimum flow by R2CROSS Singled-section Method

河流顶宽(ft)1)	平均水深(ft)1)	湿周率(%)	平均流速(m/s)
1-20	0.2	50	1.0
21-40	0.2-0.4	50	1.0
41-60	0.4-0.6	50-60	1.0
61-100	0.6-1.0	≥70	1.0

1)1ft=0.3048m.

由于水深、河宽、流速等必须通过对河流的断面进行实地调查才能确定有关的参数,所以该法应用难度大.一般适用于浅滩式的河流栖息地类型.

③ CASIMIR(Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements in Diverted Stream)法[60]:该方法采用FST[61]建立水力学模型、流量变化与被选定的生物类型之间的关系,估算主要水生生物的数量、规模,从而反推期望的流量.

3.1.1.3 栖息地法 栖息地是植物和动物(包括人类)能够正常的生活、生长、觅食、繁殖以及进行生命循环周期中的重要组成部分.该法是对水力学方法的进一步发展,根据指示物种所需的水利条件确定河流流量,目的是为水生生物提供一个适宜的物理生境.因为生境法可定量化,并且是基于生物原则,所以目前被认为是最可信的评价方法,主要代表方法有:

① 有效宽度(UW)法[53]：有效宽度是指满足某个物种需要的水深、流速等参数的水面宽度，不满足要求的部分就算无效宽度. 该方法的基本思想是：通过建立河道流量和某个物种有效水面宽度的关系，以有效宽度占总宽度的某个百分数相应的流量作为最小可接收的流量.

② 加权有效宽度(WUW)法[53]：该方法的基本思想是将一个断面分为几个部分，每一部分乘以该部分的平均流速、平均深度和相应的权重参数，从而得出加权后的有效水面宽度. 权重参数的取值范围从 0 到 1.

③ 河道内流量增加法 IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)[59]：该方法是由美国鱼类和野生动物部门提出的，用于河流规划、保护和管理等的决策支持系统. 系统由一系列水量、水质、生态等专业模型和各类方法库组成，综合考虑水量、流速、最小水深、河床底质、水温、溶解氧、总碱度、浊度、透光度、水生物种等影响因子，把大量的水文水化学现场数据与选定的水生生物在不同生长阶段的生物学信息相结合，采用物理栖息地模拟模型 PHABSIM(Physical Habitat Simulation Model)[59]模型，模拟流速变化和栖息地类型的关系，并做出综合评价. 其计算结果常用来评价水资源开发建设项目对下游水生生物栖息地的影响. 由于该法需要详尽的资料支撑和多学科配合研究，并且定量化的生物资料缺乏，使得这种方法的应用受到了一定的限制.

④ RCHARC(Riverine Community Habitat Assessment and Restoration Concept)法[62]：该法根据栖息地指示生物(种群)与河流水力参数(流量、流速、水深)的相关性，采用多变量回归分析法，确定河流的生态可接受流量. 指示生物通常是鱼、无脊椎动物以及大型植物等.

⑤ Basque 法[63]：该法假定河流为连续系统的一种生物学方法，认为河流上、中游的物种多样性随着流量的增加而增加. 它首先根据曼宁公式建立湿周与流量的变化关系，然后利用河流无脊椎动物多样性与湿周的变化关系确定最小和最优流量.

3.1.1.4 综合法　该法是从研究区生态环境整体出发，集中相关学科的专家小组意见，通过综合研究河道内流量、泥沙运输、河床形状与河岸带群落之间的关系确定流量的推荐值，并要求这个推荐值能够同时满足生物保护、栖息地维持、泥沙冲淤、污染控制和景观维持等整体生态功能. 综合法主要包括以下 2 种方法.

① 南非的 BBM(Building Block Methodology)法[59]：该法首先考察河流系统整体生态环境对水量和水质的要求. 然后预先设定一个可满足需水要求的状态，以预定状态为目标，综合考虑砌块确定原则和专家小组意见，将流量组成人为地分成 4 个砌块，即枯水年基流量、平水年基流量、枯水年高流量和平水年高流量. 河流基本特性由这 4 个砌块决定，最后通过综合分析确定满足需水要求的河道流量.

② 澳大利亚的整体评价(Holistic Approach)法[64]：该法的基本思想也是通过综合评价整个河流系统来确定流量的推荐值. 但要求以保持河流流量的完整性、天然季节性和地域变化性为基本原则，并着重分析不同等级的洪水影响情况，强调洪水和低流量对河流生态系统保护的重要性. 所以，该法的关键是要有实测天然日流量系列、相关学科的专家小组、现场调查以及公众参与等.

3.1.2 国内河流生态需水计算方法

根据河流的生态环境功能，将河流生态环境需水划分为 6 部分.

3.1.2.1 河流基本生态需水量　河流基本生态需水是指维持河流的基本生态环境功能不受破坏，要求年内各时段的河川径流都能维持在一定水平而不出现诸如枯竭甚至断流等所需要的水量. 这部分需水计算，代表方法有：

① 最小月平均流量法[23]：即以河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本生态环境需水量. 其计算公式为：

$$W_b = \frac{T}{n}\sum_{i}^{n}\min(Q_{ij}) \times 10^{-8} \tag{1}$$

式中，W_b为河流基本生态需水量($\times 10^8 m^3$)；Q_{ij}为第 i 年第 j 个月的月平均流量(m^3/s)；T 为换算系数，其值为 31.536×10^6；n 为统计年数. 李丽娟等在计算河流基本生态环境需水量时采用了这种方法[46].

② 枯年天然径流估算法[53]：以最枯年天然径流估算生态需水.

3.1.2.2 防治河流水质污染的生态需水量　河流水质被污染，将使河流的生态环境功能遭受直接的破坏，因此河道内必须维持一定的水量，来维持水体的自净功能. 所以这部分生态需水量的研究倍受国内外学者的

关注. 目前主要采用以下几种方法进行计算:

① 十年最枯月平均流量法[65]:7Q10 法采用 90% 保证率最枯连续 7d 的平均水量作为河流最小流量设计值. 该法在 20 世纪 70 年代传入我国,主要用于计算污染物允许排放量,在许多大型水利工程建设的环境影响评价中得到应用. 由于该标准要求比较高,鉴于我国的经济发展水平比较落后、南北方水资源情况差别较大,我国在(GB3839 - 83)《制订地方水污染物排放标准的技术原则和方法》中规定:一般河流采用近 10a 最枯月平均流量或 90% 保证率最枯月平均流量.

② 水质目标法[66]:该方法是依据水环境容量的基本原理,以水质目标为约束的方法,主要计算污染物水体水质稀释自净的需水量,作为满足环境质量目标约束的河道最小流量值. 其基本原理是在考虑河段上游来流量污染物浓度、河段内污染物产生量、河段内污染物治理浓度、河段内污废水资源化程度、河段内城市污废水产生总量和污染物削减综合状况的条件下,得出满足河段水质控制目标的相应水量. 以水质目标来约束计算河段的最小流量. 其基本模式如下:

$$Cs[\,Q_i + \sum q(1-K_2)\,] = (1-K)[\,Q_iC_i + W(1-K_1)(1-K_2)\,] \tag{2}$$

式中,Cs 为计算河段水质目标值(mg/L);Q_i 为 i 断面上游来水量(m^2/s);C_i 为 i 断面污染物浓度(mg/L);W 为河段内污染物总量(g/s);$\sum q$ 为河段内污废水总量(m^3/s);K 为污染物削减综合系数;K_1 为河段内污染物治理系数;K_2 为河段内污废水资源化系数;K_1,K_2 是两个与社会经济发展、环境保护投资及水污染治理投资、污染源治理效益和废污水资源化条件等有关的治理系数.

3.1.2.3 维持水生生物栖息地生态平衡需水量 指以水生生物栖息地为平台、以水生生物栖息地生态平衡为基本目标计算的生态环境需水量. 水域生态系统中将水生生物分为生产者,消费者和分解者三者. 当水域生态系统受到外界强烈的干扰时,会引起生态平衡失调. 例如水体污染严重时,将导致生态系统一级结构的破坏,即一个或几个生物组分缺损,生产者层次的主要种类从系统中消失,各级消费者因栖息地破坏而被迫迁移或消失,生态系统发生急剧变化,从而造成系统的破坏. 所以,必须维持一部分有质量保证的水量,以满足水生生物的用水需求. 目前国内尚未见到这方面的物理实验模型计算方法,一般采用估算法计算. 比如,计算与河道相连的湿地野生生物栖息地生态需水量时,张长春等[44]采用如下公式估算:

$$W_q = A_t \times B_t \times H_t \tag{3}$$

式中:W_q 为生物栖息地需水量;A_t 为湿地面积;B_t 为水面面积百分比;H_t 为水深. A_t、B_t 和 H_t 数据均由“3S”技术及实地考察获得.

3.1.2.4 河流水面蒸发和河道渗漏用水量

① 水面蒸发用水量:是指当水面蒸发高于降水时,通过水面蒸发量与降水量差值所计算的消耗于蒸发的净水量. 当降水量大于蒸发量时,就认为蒸发生态用水量为零[45,67]. 蒸发用水一般根据河流水面面积、降水量和水面蒸发量,由水量平衡原理计算,其计算公式为:

$$W_E = A(E-P) \times 10^{11} \qquad E > P \tag{4}$$

$$W_E = 0 \qquad E < P \tag{5}$$

式中,W_E 为水面蒸发用水量($\times 10^8 m^3$);A 为各月平均水面面积(m^2);E 为各月平均蒸发量(mm),由 E_{601} 水面蒸发器测定结果计算而得;P 为各月平均降水量(mm).

② 渗漏用水量:当河道水位高于两岸地下水位时,河水将通过渗漏补给地下水. 渗漏需水一般采用传统的达西定律计算. 即 $Q_{渗} = K'Fh/L$. 式中 $Q_{渗}$ 为单位时间渗流量,F 为过水断面,h 为总水头损失,L 为渗流路径长度,$I = h/L$ 为水力坡度,K' 为渗流系数. 倪深海等[68]以河道蒸发损失量、河道渗漏损失量、河道基础流量三项之和作为河道生态需水量,并以此计算了大汉河各主要河段生态环境需水值.

3.1.2.5 河流输沙需水量 输沙是河流系统的另一个重要功能. 为了输沙排沙,维持冲刷与侵蚀的动态平衡,需要一定的生态水量与之匹配,这部分水量就称为输沙需水量.

刘凌等[69]根据输沙动力学理论,将河道在不冲不淤的临界状态下河流最小流量作为防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量.

针对我国北方河流泥沙含量高的特点，有些专家学者采用了估算法. 如李丽娟等提出根据多年最大月平均含沙量的平均值估算河流输沙需水量的方法[46]，该法简单，但未能考虑输沙需水量的季节变化要求. 计算公式如下：

$$W_S = S_t / C_{\max} \tag{6}$$

$$C_{\max} = 1/n \sum_{i}^{n} \max(C_{ij}) \tag{7}$$

式中：W_S为输沙用水量(m^3)；S_t为多年平均输沙量(kg)；$C_{\max}$为多年最大月平均含沙量的平均值(kg/m^3)；C_{ij}为第 i 年 j 月的月平均含沙量(kg/m^3)；n 为统计年数.

罗华铭等[42]计算黄河下游主要河段输沙需水量时，采用了以下公式估算：

$$W'_S = W_{上} / (M_{上} - D) \tag{8}$$

式中：W'_S为输沙需水量(m^3/t)；$W_{上}$为某时段(汛期或非汛期)河段上游来水量($\times 10^8 m^3$)；$M_{上}$为河段上游来沙量($\times 10^8 t$)；D 为河段内冲淤量($\times 10^8 t$). 其研究成果表明：多沙河流中的泥沙输送需要消耗大量水资源，输沙用水需求远高于其它功能用水需求，输沙需求占生态环境需水的绝大部分. 特别是对于黄河这样的多沙河流，输沙需水是河流生态环境需水量的一个重要组成部分，并应视情况优先予以保证.

关于生态环境需水量的计算中，河流系统的排盐需水量并没有单独考虑，主要是因为对于大多数河流而言，在基本生态环境需水量和输沙水量得到保证的前提下，河流系统同时也将完成排盐的功能. 因此，在计算基本生态环境需水量和输沙水量后就无需另外计算排盐水量.

3.1.2.6 维持河流系统景观及水上娱乐需水量　有部分学者提出维持河流系统景观及水上娱乐需水也属河道内生态环境需水，也应该给予计算. 关于河流景观生态需水，喻泽斌等认为是指维持河流与其水文周边景观生态系统的结构和功能的完整性不受破坏所需的水量，并且采用权重-属性决策分析法计算了漓江的景观生态环境需水量，证明了该方法的简单可行性[70]. 王西琴等提出的假设法来确定河流维持原有自然景观使其不干涸平均所需补充的水量[23]；崔树彬采用的人均水面面积指标乘以景观区人口数计算法[26]. 对水上娱乐(如滑冰和划船等)需水计算，目前尚未见到这方面的计算方法和统一标准.

3.1.3 国内外河流生态需水计算方法的比较

3.1.3.1 各种计算方法比较及优缺点分析

① 水文学法根据水文资料中的历史流量资料计算生态需水，属于统计学方法. 其优点是不需要现场测定数据，简单快速. 但不足之处在于未考虑生物需求和生物间的相互作用. 其中有的方法具有较大的任意性，存在地区适用性问题，一般用于河流系统优先度不高的河段流量计算，或者作为其他方法的一种检验. 最小月平均流量法、枯年天然径流估算法和 7Q10 改进法实质上都属于水文法(历史流量法)的范围，具有与其相同的优点和不足[4,52].

② 水力学法研究生物对湿周、流速、水深等水力参数的需求，从而确定生态需水. 优点是：ⅰ. 包含了更多更为具体的河流信息. ⅱ. 只需进行简单的现场测量，不需要详细的物种-生境关系数据，数据容易获得. 缺点是：ⅰ. 忽视了水流流速的变化，未能考虑河流中具体的物种不同生命阶段的需求. ⅱ. 该类方法假定河道在时间尺度上是稳定的，并且所选择的横断面能够确切地表征整个河道的特征，而实际情况并非如此. ⅲ. 体现不出季节变化因素，不适用确定季节性河流流量[4,52]. 该方法主要适用于[54]：a. 小型河流或者流量很小且相对稳定的河流. b. 泥沙含量小，水环境污染不明显的河流. c. 推荐的流量是主要为了满足某些无脊椎动物以及特殊物种保护的需要.

③ 栖息地法是一种属于物理实验模型的方法，生物学基础牢固. 优点：ⅰ. 在水力学的基础上考虑了水量、流速、水质和水生物种等影响因素. ⅱ. 比前两种方法更具灵活性. 其可能考虑全年中许多生物物种及其不同生命阶段所利用栖息地的变化，从而选择能提供这种栖息地的流量. 缺点：要达到优点中所述的，就意味着需要对水生态系统有足够的了解和清晰的管理目标，以便解决不同物种或不同生命阶段在栖息地需求上的矛盾，这就需要投入相当多的时间、资金和专门技术，同时所需的定量生物资料常常难以获得. 适用范围：特别适合于“比较权衡”，可以将栖息地的变化与资源的社会经济效益相比较. 栖息地流量的关系可以用

来评估不同的流量管理目标,并成为选择适当流量的信息基础[4]. 该法对于解决较小型河道生态环境需水较为实用,但对于大河而言,需要有更多的实践和参数变换. 国内目前尚无具体研究实例,通常根据水量平衡原理采用估算法进行计算[52].

④ 综合法综合考虑了专家小组意见和生态整体功能,克服了栖息地法只针对一、二种指示生物的缺点,强调河流是一个生态系统整体,是目前最为合理的一种方法[52]. 但是该法需要的人力、物力是最大的,费用最高,数据最多,使其应用受到一定的限制[71]. 同时,可能有时所需生态资料中的部分资料无法得到满足,只有依靠专家有限的经验确定生态需水,使其计算结果的可靠性受到质疑.

另外,对于蒸发和渗漏需水计算,国内外都采用国际上通用的水文法,即传统的达西定律和水量平衡原理. 无需比较,也不存在优缺点可言. 而景观及水上娱乐需水计算方法,目前仅用于国内,国外尚未提及[8].

3.1.3.2 国内外河流生态需水计算方法存在差异的原因分析

① 研究条件的限制:国外许多关于河流生态需水的研究方法涉及到大量的生物资料,需要现场数据的支撑. 而我国开展这方面的研究时间比较晚,研究成果还比较少,同时缺乏大量的现场观测数据,所以国外的计算方法不一定适合我国国情. 例如国外的综合法,虽然该方法被认为是目前最为合理的一种方法,但是它的运用需要大量的生态资料或数据,耗费大量人力、物力、财力,而目前为止,我国这部分资料可能还无法得到满足,使该法在我国的应用受到很大的限制.

② 研究的侧重点各异:如前所述,生态需水具有时空变化性. 不同的时间、空间尺度上,生态需水量和研究的重点都是不同的. 所以,我国学者在参考国外研究方法的同时,会根据所研究河流系统的实际生态环境和水文条件等特点,对方法进行适当改进,以使其满足作者所要研究河流的实际情况. 例如,鉴于黄河含沙量高这一突出特点,估算黄河的生态需水量时就必须优先保证其输沙需水得到满足. 所以,李丽娟[46]、罗华铭[42]等学者提出了相应的输沙需水量的计算方法. 而对于一些水质性缺水的河流,其生态需水量研究可能更侧重于环境需水,即估算防治河流水质污染所需的那部分水量. 不同时间、不同区域生态需水研究的侧重点不一样,采用的方法自然会有所不同.

③ 研究者学科背景的不同:生态需水量研究是水文科学、生态科学、环境科学和系统科学的融合,而各个领域的研究者关注的重点肯定是不同的,往往导致认识水平和思维方式上的差异,所以也可能导致其采用不同的方法去计算生态需水量.

还有一点值得注意:笔者认为虽然国内外计算河流生态需水的方法上存在很大的不同,但在一定程度上又是可以相互借鉴的. 比如国内保护水生生物栖息地的方法就可以应用国外水力学方法中的湿周法和R2CROSS法等去检验河流流量与鱼类栖息地指示因子间的关系. 应用的关键还是具体问题要具体分析,符合各国的实际情况.

3.1.4 河口生态需水计算方法 国内外对河流入海口的生态需水研究较少. 河口种群数量及生物多样性特征非常典型,因此在进行河流生态环境需水研究时,将河口生态环境需水单独列出. 河口区不仅需要足够水量来维持河口的水盐、水沙等平衡,防止海水入侵和河口淤积,保持海岸线动态平衡,而且也要保持鱼类及其它生物的正常生存. 由于入海需水受径流量、入海地形、含盐量及生物量和生物多样性等众多因素影响,其估算指标和估算方法确定相当复杂[72]. 有人建议用含盐量为指标,有人建议用温度为指标,还有人建议用饵料质量为指标,但至今尚未见到比较公认的方法或标准[53]. 南非制订了河口生态需水的标准,确定了河口生态需水计算的步骤,但是尚不清楚其计算生态需水的具体方法[73]. 国内对河口生态需水进行了初步研究. 国家水产总局黄河水产研究所在20世纪80年代中期,研究了黄河河口渔业生态环境需水量[74]. 研究结果认为:满足黄河河口海域鱼虾生长条件的要求,需要黄河在每年的4-6月份下泄入海水量$60\times10^8\ m^3$. 如果黄河为枯水年,可在4月份下泄$20\times10^8\ m^3$.

3.1.5 湖泊生态需水计算方法 湖泊生态环境需水量是指保证特定发展阶段的湖泊生态系统结构发挥其正常功能而必需的一定数量和质量的水,具有明显的时空性、复杂性和综合性[75]. 也有学者认为湖泊生态需水量是指为维持湖泊功能不受破坏而每年因消耗所需要补充的水量[71]. 2000年,刘燕华[39]对西北地区湖泊生态需水量进行了宏观定量研究. 根据区域的气候,按照湖泊水面蒸发量的百分比划分了高、中、低三个等级,估算湖泊生态需水量. 同年,贾宝全[38]认为湖泊在干旱区对绿洲景观的生存与发展、环境质量的维护和改善

有重要支撑作用，湖泊生态用水的估算采用蒸散量减去降雨量. 2002 年，刘静玲等[75]根据湖泊的基本特征分析生态需水的内涵，辨识了湖泊生态需水量的不同计算方法和相应指标体系，并通过实例进行了分析和估算. 常用来计算湖泊生态需水量的方法有水量平衡法、换水周期法、最小水位法及功能法.

（1）水量平衡法[15]：

$$\Delta W_l = (P + R_i) - (E + R_f) + \Delta W_g \tag{9}$$

式中，ΔW_l为湖泊洼地蓄水量的变化量（m^3）；P 为降水量（m^3）；R_i为地表径流的入湖水量（m^3）；R_f为地表径流的出湖水量（m^3）；E 为蒸发量（m^3）；ΔW_g 为地下水变化量（m^3）. 水量平衡法遵循水量平衡基本原理，是较为简单与常用的研究方法. 适用于水量充沛的吞吐湖和受人为干扰较小的湖泊.

（2）换水周期法[15]：

$$W_{l\min} = W_{枯}/T \tag{10}$$

$$T = W_{蓄}/Q_{出} \tag{11}$$

式中，T 为换水周期（s）；$W_{蓄}$为多年平均蓄水量（m^3）；$Q_{出}$为多年平均出湖流量（m^3/s）；$W_{枯}$为枯水期的出湖水量（m^3）；$W_{l\min}$为湖泊最小生态环境需水量（m^3）. 换水周期法也是计算湖泊生态需水量的一种简单实用的方法. 但是在干旱半干旱区湖泊来水及贮水量都较小的情况下，湖泊换水会造成湖泊水量得不到补充而引起湖泊生态与环境的恶化，换水周期法受限而难以应用[71].

（3）最小水位法[15]：

$$W_{l\min} = H_{\min} \times S \tag{12}$$

式中，$W_{l\min}$为湖泊最小生态环境需水量（m^3）；$H_{\min}$为维持湖泊生态系统各组成分和满足湖泊主要生态环境功能的最小水位最大值（m）；S 为水面面积（m）. 最小水位法需要确定湖泊出入水量和湖泊最小水位，但由于中国缺乏对湖泊敏感物种及其与水位关系方面的研究，使得计算湖泊最低生态水位存在较大困难，针对这一问题，徐志侠等人[4,76]提出 3 种确定湖泊最低生态水位的方法. 即天然水位资料法——认为湖泊天然生态系统已经适应了天然多年最低水位，所以可以利用湖泊多年天然水位资料确定湖泊最低生态水位；湖泊形态分析法——认为要使湖泊生态系统不出现严重退化，必须使湖泊水文和地形子系统不严重退化；生物最小空间需求法——从生物对生存空间的最小需求角度，以鱼类为指示生物，从而确定湖泊最低生态水位. 该方法为中国生态资料缺乏区湖泊生态需水量的计算提供一定的依据.

（4）功能法[15]：功能法根据生态学基本理论和湖泊生态系统的特点，遵循兼容性、优先性、最大值和等级制等原则，从维持和保证湖泊生态系统正常的生态环境功能的角度，全面地计算湖泊各生态需水组分的需水量.

3.2 河道外生态需水计算方法

3.2.1 植被生态需水　植被生态需水是满足植被正常健康生长并能够抑制土地生态系统恶化如土地沙化、荒漠化及水土流失所需要的水资源量[71]. 植被生态需水不仅包括维持陆地林木植被、草场植被，还应包括维持农田人工生态系统良性发展所需的最小水资源量[40]. 目前，国内关于植被生态需水的研究主要集中在干旱半干旱区. 如：2000 年贾宝全，慈龙骏[38]计算了干旱区绿洲景观生态需水量. 2000 年，刘燕华[39]另辟新径，从景观学原理和水资源平衡角度分析干旱区植被生态需水. 2002 年，王芳等[77]对干旱区地带性植被和非地带性植被生态需水进行了估算. 2003 年，陈亚宁等[41]通过对干旱区植物出现频率的分析，研究得到不同地下水埋深的植被类型，从维持合理生态水位估算生态需水量. 2005 年，杨志峰等[47]基于中分辨率成像光谱仪（MODIS）数据和地面气象数据，建立了区域植被生态用水模型，以此分析了海河流域的生态用水. 总之，诸多学者采用不同方法估算干旱区植被生态需水量，概括起来主要有：

（1）直接计算法[78]：

$$V_j = A_j \times Z_j \tag{13}$$

式中：V_j为植被类型 j 的生态环境需水量（m^3）；A_j为植被类型 j 的面积（hm^2）；Z_j为植被类型 j 的生态环境用

水定额(m^3/hm^2).用该方法进行植被生态环境需水量的计算最为简单,是目前常用的方法,适用于基础工作较好的地区与植被类型,如防风固沙林、人工绿洲等生态需水的计算.

(2) 间接计算法[78]:根据潜水蒸发量的计算来间接计算生态需水.即某一植被类型在某一潜水位的面积乘以该潜水位下潜水蒸发量与植被系数,得到总的生态需水量.

$$Wst_i = A_i \times W_{gi} \times R \tag{14}$$

式中,Wst_i为植被类型 i 的生态环境需水量(m^3);A_i为植被类型 i 的面积(m^2);W_{gi}为植被类型 i 在地下水位某一埋深时的潜水蒸发量(mm);R 为植被系数.该法主要适用于干旱区植被生存主要依赖于地下水的区域.

(3) 植被蒸散发法[15].该方法以改进的 Penman 公式为主,是能量平衡方程和空气动力学方法相结合的半经验蒸发计算方法.其优点是避免了直接测定植被表面温度的困难,只与气象因素有关.但是,精度仅能达到月或年的长时期要求.改进后的彭曼公式在彭曼公式基础上对些参数做了局部修正,提高了计算精度.该方法的具体应用可详见文献[79].

(4) 基于遥感的计算方法[17].目前,新的思路试图通过遥感手段、地理信息系统软件和实测资料相结合,计算生态需水量.该法首先利用遥感和地理信息系统将研究区域进行空间生态分区,通过分析生态分区与水资源分区的空间对应关系,确定生态耗水的计算范围和标准(定额),然后,以流域为单元,进行降水和水资源平衡分析,在此基础上计算生态需水量.

3.2.2 *动物生态需水*[22] 此处指陆地动物群落的生态需水量,主要是野生动物饮水量,而蒸发量则不考虑.可参照以下方法确定动物需水量:

$$W_f = \sum_{i=1}^{n} M_i \times D_i \tag{15}$$

式中:W_f为陆地动物生态需水量;n 为动物种类数;M_i为第 i 种动物的数量;D_i为第 i 种动物的需水定额,可根据试验资料或调查经验确定.

3.2.3 *湿地生态需水* 湿地是缓冲陆地和水生系统交互作用的群落交错区[80].改变湿地水文条件将会很大程度上影响湿地生物多样性[81],并导致湿地生态系统的改变.广义的湿地生态环境需水是指为保证湿地自身存在和发展,维持其内部生态过程和发挥其环境功能所必须蓄存和消耗的水量[82].狭义而言是指湿地每年用于生态消耗和环境消耗而需要补充的水量.

湿地一般包括河流湿地、湖泊湿地、海岸湿地、河口海湾湿地、沼泽和草甸湿地等 5 类[26],其中河流湿地、湖泊湿地,可以依据所要保护的敏感指示物种对水环境指标的需求确定,但应注意水位的涨落限制;海岸湿地作为一个大的生态类型,仅具有保护的意义,不具有需水量计算的意义;封闭或半封闭的低洼、沼泽等类型的湿地,在对其水文循环进行一定时段的观察和调查、量测之后,可以依据水平衡的基本原理进行计算.

而目前,在湿地生态需水量计算中得到广泛应用的是崔保山和杨志峰等提出的方法,其分析了典型湿地生态环境需水量的内涵和临界值,探讨了湿地生态系统环境需水量的计算方法和相关指标[36],并分别用湿地蒸散量统计模型,不同类型沼泽土壤含水量计算公式和地表水上低洼地蓄水量(满足野生动物栖息、繁殖的水量)计算了湿地植被需水量、湿地土壤需水量和湿地野生生物栖息地需水量[83].还有研究利用遥感技术[44]对湿地生态需水量进行计算也成为近期湿地生态需水研究的热点问题.

3.2.4 *城市生态需水* 城市生态环境需水量是指为了维持城市生态环境质量不再下降或改善城市环境而人为补充的水量.主要应包括风景观赏河道用水、公园湖泊用水、城市绿化与园林建设用水、污水稀释用水以及控制地面沉降所需要的水等[38].瞿伦强[84]认为城市环境用水是指维持城市水生生态环境良性循环的用水,它包括水质、水量、水面三个基本要素,理想的城市水生态环境应具有良好的水质、足够的水量和宽阔的水面.

按照需水主体,城市生态环境需水可分为绿地、城市河流、湖泊湿地等生态环境需水.其中城市园林绿地用水量可用面积定额法,即绿地面积乘以其灌溉定额来确定.而城市河湖生态环境需水包括河湖蒸发、渗漏及景观用水等,其计算与前面的河流、湖泊的计算方法类似,不再赘述.

3.2.5 回补超采地下水生态需水　用于保护与恢复地下水位所需水量称为回补超采地下水生态需水量. 1993 年世界银行发布的水资源政策文件明确了地下水可再生性维持的标准，即水资源开发利用总量决不能超过地下水补给量，但缺乏有关生态环境需水量的确定标准，计算比较困难. 但我国也有学者对其进行了估算，如文献[85].

4 存在的问题及发展前景

根据上述对生态需水量的定义、类型及计算方法的讨论可知，有关生态需水量的研究还存在如下问题和发展方向.

4.1 基础理论不成熟

目前，生态需水问题已成为水资源研究的热点. 但由于国内起步较晚，生态需水基础理论研究还不够成熟. 总的来看有：概念及其内涵存在着许多分歧，还没有一个公认的解释；生态需水的目标描述不明确；定性研究多于定量研究；生态需水评价指标体系尚待建立；影响生态需水的内在与外在因素、不同类型生态需水形成机理、空间范围和时间尺度上的分配规律研究较少.

4.2 计算方法不完善

当前，对河道内生态需水计算方法的研究较多，而对河道外，如植被、湿地等其它生态系统尚无完整思路和研究方法. 同时，对河道内外生态需水的耦合研究也较少. 即使有研究，也大多数都是分别计算两者简单相加即得到整个区域的生态需水，基本没有考虑两者的联系机制. 针对此问题，国内夏军教授认为有必要将水循环作为河道内外生态需水联系的纽带. 再者，现有的生态需水量化方法均存在不同程度的缺陷. 理想的生态需水计算方法应该能够量化所有的参数（食物、栖息地、温度、水质、水流状况和生物间的相互作用），反映参数之间的相互影响，但目前这种方法并不存在. 因此，可以考虑将各种方法进行合理的耦合，取长补短. 如有学者提出水文-水力耦合的新方法[86]. 另外，3S 技术等新技术、新方法在生态需水量化中的应用还较少. 急需进一步加强它们在测量与计算生态需水量相关数据方面的应用.

4.3 国内生态需水量研究区域性问题突出

目前，中国对生态环境需水研究主要集中在干旱半干旱地区，如黄河流域、海河流域，黄淮海地区等. 而对亚热带地区如淮河流域、太湖流域、钱塘江流域、珠江流域等地区的生态需水研究还太少. 由于环境问题具有滞后性，生态需水的研究不应只针对目前生态脆弱的地区，其他地区也要适当的进行生态需水的估算，做到预防为主，防治结合. 相信这将成为今后研究者的关注方向.

4.4 加强学科间的交叉与融合

生态需水涉及生态系统和水文系统两大复杂系统，它所关心的是水文过程对生态系统配置、结构和动态的影响以及生物过程对水循环要素的影响[87]. 所以要加强相关学科和多学科之间的交流与合作，共同丰富和发展生态需水的理论与实践.

总之，目前为止，虽然国内一些学者已做过生态需水研究综述方面的工作，但大多侧重河道内[52,66,88]或河流[53-54,89]生态需水的计算方法. 也有学者介绍流域各个生态系统，如河流、湖泊、湿地、植被、城市等生态需水的理论及计算方法的[1,15,71]. 但因分类方式各异，也各有侧重. 特别详细综述国内外生态需水研究进展和整个区域生态需水量的各种计算方法，这样的文章不多. 所以，本文在总结前人研究成果的基础上，试图能尽量全面地论述生态需水理论与方法研究进展，以此抛砖引玉，为后续研究工作的开展提供理论参考.

5 参考文献

[1] 姜德娟，王会肖，李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述. 地理科学进展，2003，**22**(4)：369-379.

[2] 李　英，孙以三. 长江流域湿润地区生态需水探讨. 中国水利，2005，**6**：18-21.

[3] 刘万根. 珠江流域水资源问题及统一管理浅析. 人民珠江，2002，(增刊)：18-22.

[4] 徐志侠，王　浩，董增川等. 河道与湖泊生态需水理论与实践. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[5] Covich A. Water in crisis：A guide to the world's fresh water resources. In：Peter HG *et al* eds. Water and Ecosystem. New York：Oxford University Press，1993：40-55.

[6] Gleick PH. Water in crisis：Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*，1988，**8**(3)：571-579.

[7] Falkeiunark M. Coping with water scarcity under rapid population growth. Pretoria: Conference of SADC Minsters, 1995:3-24.
[8] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告. 北京:中国水利水电出版社,2001:145-501.
[9] 贾宝全,张志强,张红旗等. 生态环境用水研究现状、问题分析与基本构架探索. 生态学报,2002,22(10):1734-1740.
[10] 刘桂民,王根绪. 我国干旱区生态需水若干问题评述. 冰川冻土,2004,26(5):650-656.
[11] 顾圣华. 长江口环境用水量计算方法探讨. 水文,2004,(6):35-37.
[12] 郑建平,王 芳,华祖林等. 海河河口生态需水量研究. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):518-521.
[13] 倪晋仁,金 玲,赵业安等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究. 水利学报,2002,(10):1-7.
[14] 石 伟,王光谦. 黄河下游最小输沙用水总量的初步估算. 泥沙研究,2003,(2):60-64.
[15] 汤 洁,佘孝云,林年丰等. 生态环境需水的理论和方法研究进展. 地理科学,2005,25(3):367-373.
[16] 马乐宽,李天宏. 关于生态环境需水概念与定义的探讨. 中国人口、资源与环境,2008,18(5):169.
[17] 张 丽. 水资源承载能力与生态需水量理论及应用. 郑州:黄河水利出版社,2005,5:34-37.
[18] 汤奇成. 塔里木盆地水资源和绿洲建设. 自然资源,1989,(6).
[19] 陈丽华,王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定. 水土保持研究,2001,8(4):161-164.
[20] 鲍卫锋,黄介生,于福亮. 区域生态需水量计算方法研究. 水土保持学报,2005,19(5):140.
[21] 李广贺,刘兆昌,张 旭. 水资源利用工程与管理. 北京:清华大学出版社,1998.
[22] 张 鑫,蔡焕杰. 区域生态环境需水量与水资源合理配置. 陕西:西北农林科技大学出版社,2007:42.
[23] 王西琴,刘昌明,杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻. 水科学进展,2002,13(4):507-512.
[24] 杨志峰,崔保山,刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证. 中国科学(D辑),地球科学,2004,34(11):1072-1082.
[25] 徐志侠. 河流生态需水计算方法评述. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(1):6-9.
[26] 崔树彬. 关于生态环境需水量若干问题的探讨. 中国水利,2001,(8):71-75.
[27] Resh VH. Periodical citations in auqatic entomology and freshwater benthic biology. *Freshwater Biology*, 1985, (15): 757-766.
[28] 梁 薇,梁冬梅,苏 伟. 生态环境需水研究评述及应用. 甘肃水利水电技术,2009,45(11):4.
[29] Geoffrey E Petts. Water allocation to protect river ecosystems. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1996, 12: 353-365.
[30] Male JW. Tradeoffs in water quality management. *Journal of Water Res Plan Manag*, 1984, 110(4): 434-444.
[31] Sherrard JJ, Erskine WD. Complex response of a sand bed stream to up-stream impoundment. *Regulated Rivers Research Management*, 1991, 6: 53-70.
[32] Martin Pusch, Andreas Hoffmann. Conservation concept for a river ecosystem (River Spree, Germany) impacted by flow abstraction in a large post-mining area. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 51(2-4): 165-176.
[33] Willian Whipple. A proposed approach to coordination of water resources development and environmental regulations. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(4): 73-89.
[34] FRIEND: Flow Regimes From International Experimental And Network Data. Third Report: 1994-1997, Cemagref, 1997: 432.
[35] 王 浩,陈敏建,秦大庸等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究. 郑州:黄河水利出版社,2003.
[36] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析. 资源科学,2003,25(1).
[37] 贾宝全,许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例. 干旱区地理,1998,21(2):8-13.
[38] 贾宝全,慈龙骏. 新疆生态用水的初步估算. 生态学报,2000,20(3):243-250.
[39] 刘燕华. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护研究. 北京:科学出版社,2000.
[40] 夏 军,郑东燕,刘青额. 西北地区生态环境需水估算的几个问题探讨. 水文,2002,22(5):12-17.
[41] 陈亚宁,李卫红,徐海量等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报,2003,58(4):542-549.
[42] 罗华铭,李天宏,倪晋仁等. 多沙河流的生态环境需水特点研究. 中国科学(E辑),2004,34(增刊Ⅰ):155-164.
[43] 郝伏勤,黄锦辉,李 群. 黄河干流生态环境需水研究. 郑州:黄河水利出版社,2005,12:10-11.
[44] 张长春,王光谦,魏加华. 基于遥感方法的黄河三角洲生态需水量研究. 水土保持学报,2005,(1):149-153.
[45] 朱晓原,张学成. 黄河水资源变化研究. 郑州:黄河水利出版社,1999:122-123.

[46] 李丽娟，郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报，2000，**55**(4)：495-500.
[47] 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. 环境科学学报，2005，**25**(4)：449-456.
[48] 刘昌明. 我国西部大开发中有关水资源的若干问题. 中国水利，2000，(8)：23-25.
[49] 王志民，任宪韶，郭宏宇. 面向 21 世纪的海河水利. 天津：天津科学技术出版社，2000：40-41.
[50] 王　芳，王　浩，陈敏建. 中国西北地区生态需水研究(2)——基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. 自然资源学报，2002，**17**(2)：129-137.
[51] Tharme RE. A global perspective on environmental flow assessment：emerging trends in the development and application of environmental flow methodolohgies for rivers. *River Res Appl*，2003，**19**(4)：397-441.
[52] 张代青，高军省. 河道内生态需水量计算方法的研究现状及其改进探讨. 水资源与水工程学报，2006，**17**(4)：68-73.
[53] 徐志侠，陈敏建，董增川. 河流生态需水计算方法评述. 河海大学学报(自然科学版)，2004，**32**(1)：6-7.
[54] 苏　飞，陈敏建，董增川. 河流生态需水观点及计算方法评述. 浙江水利科技，2009，(4)：1-3.
[55] Armentrout GW，Wilson JF. Assessment of low flows instreams in northeastern Wyoming. USGS Water Resources Investigation Report，1987，85-4246，4(5)：533-538.
[56] Matthews RC，Bao Y. The texas method of preliminary instream flow determination. *Rivers*，1991，**2**(4)：295-310.
[57] Dunbar MJA，Gustard MC，Acreman C *et al*. Overseas approaches to setting river flow objectives. R and D technical Report W6-161. Environmental Agency and NERC，1998.
[58] Palau A，Alcazar J. The basic flow：an alternative approach to calculate minimum environmental instreamflows. In：Leclerc M *et al* eds. Ecohydraulics 2000，2nd international symposium on habitat hydraulics. Quebe City，1996.
[59] 冯宝平，张展羽，陈守伦等. 生态环境需水量计算方法研究现状. 水利水电科技进展，2004，**24**(6)：59-62.
[60] Giesecke J，Jorde K. Ansatze zur optimierung von mindestabflubregelungen in Ausleitungsstrecken. *Wasserwirts-chaft*，1997，**87**：232-237.
[61] Statzner B，Muller R. Standard hemisphers as indicators of flow characteristics in groben. *Freshwater Biology*，1989，**21**(3)：445-459.
[62] Nestler JM，Schneider LT，Latka D *et al*. Impact analysis and restoration planning using the riverine community habitat assessment and restortion concept(RCHARC). In：Leclerc M *et al* eds. Ecohydraulics 2000，2nd international symposiumon habitat hydraulics. QuebecCity，1996.
[63] Docampo L，Bikuna BG. The basque method for determining instream flows in Northern Spain. *Rivers*，1995，**6**(4)：292-311.
[64] Arthington AH，King JM，Keefee JH *et al*. Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystem. In：Pigram JJ，Hooper BP eds. Water Allocation for the Environment. Armindale：The Centre for Policy Research. University of New England，1992：69-76.
[65] 倪晋仁. 论河流生态环境需水. 水利学报，2002，(9)：14-19.
[66] 崔　起，于　颖. 河道生态需水计算方法综述. 东北水利水电，2008，(1)：45-46.
[67] 严登华，何岩等. 东辽河流域河流系统生态需水研究. 水土保持研究，2001，**15**(1)：46-49.
[68] 倪深海，崔广柏. 河流生态环境需水计算. 人民黄河，2002，**24**(9).
[69] 刘　凌，董增川，崔广柏. 防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量. 湖泊科学，2003，**15**(4)：313-318.
[70] 喻泽斌，龙腾锐，王敦球. 河流景观生态环境需水量计算方法研究. 重庆建筑大学学报，2005，**27**(1)：71-75.
[71] 张　丽，李丽娟，梁丽乔等. 流域生态需水的理论及计算研究进展. 农业工程学报，2008，**24**(7)：307-313.
[72] 赵西宁，吴普特，王万忠等. 生态环境需水研究进展. 水科学进展，2005，**16**(4)：620.
[73] Susan TL. Water resources protection policy implementation，resource directed measures for protection of water resources，estuarine ecosystems. Pretoria：Department of Water Affairs and Forestry South Africa，1999：5-10.
[74] 水利部黄河水利委员会设计院. 黄河水资源利用，1986.
[75] 刘静玲，杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究. 自然资源学报，2002，**17**(5)：604-609.
[76] 徐志侠，陈敏建，董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. 生态学报，2004，**24**(10)：2324-2328.
[77] 王　芳，梁瑞驹，杨小柳等. 中国西北地区生态需水研究(1)——干旱半干旱地区生态需水理论分析. 自然资源学报，2002，**17**(1)：1-8.

[78] 何永涛,闵庆文,李文华. 植被生态需水研究进展及展望. 资源科学,2005,**27**(4):8-13.
[79] 王根绪,张 钰,刘桂民等. 干旱内陆流域河道外生态需水量评价——以黑河流域为例. 生态学报,2005,**25**(10):2467-2476.
[80] Reddy KR,Gale PM. Wetland processes and water quality:a symposium overview. *Journal of Environmental Quality*,1994,**23**(5):875-877.
[81] Wong THF,Robert ZA. Water management for wetlands. *Challenges for Sustainable Development*,1991,**2**:353-358.
[82] 孪兆擎,邓 伟,朱宝光. 洪湖国家级自然保护区湿地生态环境需水初探. 干旱区资源与环境,2004,**18**(1):59-63.
[83] 崔保山,杨志峰. 湿地生态需水量研究. 环境科学学报,2002,**22**(2):31-36.
[84] 瞿伦强. 论成都的环境用水和水生态环境建设. 四川环境,1997,**16**(1):51-55.
[85] 冯 平,肖丽英,林 超. 地下水生态需水量的估算方法及其恢复问题的研究. 干旱区资源与环境,2005,**19**(6):102-108.
[86] 吕文丽,张 旭. 水文-水力耦合法河流生态需水量计算方法研究. 电网与水力发电进展,2008,**24**(4):30-33.
[87] 崔树彬. 关于生态环境需水量若干问题的探讨. 中国水利,2001,(8):71-75.
[88] 吴春华,牛治宇. 河流生态需水量研究进展. 中国水土保持,2006,(12):22-25.
[89] 钟华平,刘 恒,耿雷华等. 河道内生态需水估算方法及其评述. 水科学进展,2006,**17**(3):430-435.

沈吉等发表的论文位居国际第四纪权威期刊 *Quaternary International* 十大高被引论文之首

据 Web of Science 最新统计,中国科学院南京地理与湖泊研究所沈吉、刘兴起、王苏民等撰写的论文“Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years(18000 年以来青海湖地区古气候演变)”于 2005 年发表于国际第四纪权威期刊 *Quaternary International*(DOI:10.1016/j.quaint.2004.11.014)后,迄今已经被国际同行引用 73 次,位列该期刊 10 大高被引论文(Top 10 Cited)之首. 2000 年,中国科学院南京地理与湖泊研究所采用奥地利产水上采样平台,在青海湖水深 22m 处钻取了 810cm 沉积岩芯。根据 AMS^{14}C 测年,岩芯记录了约 18kaB.P. 以来的环境演化历史,其中全球气候事件(如新仙女木事件、全新世大暖期)和区域气候事件(如 8.2kaB.P. 冷事件)在岩芯具有清晰的记录.

相关链接:http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/865/description#description.