

流域生态需水的理论及计算研究进展

张丽^{1,2}, 李丽娟^{1*}, 梁丽乔^{1,2}, 李九一^{1,2}, 姜德娟^{1,2}, 胥铭兴³, 宋文献³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 吉林白城市水文水资源勘测局, 白城 137000)

摘要: 生态需水是生态水文学的重要研究内容之一。该文分析了生态需水国内外研究进展, 在辨识生态需水及其相关概念的基础上, 该文认为广义的生态需水是在一定生态目标下, 维持相应时空范围内生态系统水分平衡所需要的总水量, 而狭义的生态需水是一定的生态目标下, 为维持生态系统正常生态与环境功能所需要补充的径流性水资源量。生态需水研究涉及陆地和水域生态系统, 该文重点探讨了河流、湿地湖泊等水域生态系统以及陆地植被(包含农田)生态需水理论研究现状, 综述了个生态系统生态需水主要计算方法。生态需水研究应加强基础理论研究、生态需水量化方法以及耦合方法研究, 尤其是不同生态系统目标下生态需水量的分析还需进一步探讨。

关键词: 生态需水, 概念, 理论与方法, 展望

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-7-0307-06

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[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.

Zhang Li, Li Lijuan, Liang Liqiao, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 307-312.(in Chinese with English abstract)

0 引言

水资源是干旱、半干旱地区和半湿润地区经济发展的主要限制因素, 同时也是生态与环境保护的关键, 现阶段人类对水资源的开发利用已呈现出不同程度的掠夺性发展趋势, 生产、生活与生态用水之间的矛盾日益加剧, 造成生态用水紧张和局部生态系统失衡, 为实现水资源的合理开发利用, 保护和改善生态与环境, 必须在区域水资源开发利用中, 研究水资源演化规律与生态系统稳定性之间的相互反馈关系, 使水资源的开发利用不能破坏生态系统的稳定和平衡, 达到既能保证最大限度地满足经济发展的需水要求, 又能保证生态系统的良性发展。生态需水研究是合理配置水资源、实现水资源可持续利用的基础, 尤其在既能满足水资源合理开发利用和保护要求又能够发挥最佳效益的新的水资源管理模式下, 生态与环境问题越来越受到重视, 为科学解决水与生态、环境的矛盾问题, 研究者们进行了一系列生态需水理论与方法研究, 以期对流域水资源合理配置及生态系统保护或恢复奠定理论基础。

1 生态需水研究现状及发展历程

生态需水主要集中在河流生态需水, 其研究始于 20 世纪 40 年代, 美国鱼类和野生动物保护协会对

河道内流量的研究; 20 世纪 60~70 年代, 研究者运用系统理论对一些著名河流重新进行评价和规划, 并提出采用河道内流量法确定自然和景观河流的基本流量; 同时探讨河道最小流量及其确定方法, 并取得了初步性研究成果; 20 世纪 80 年代初期, 美国全面调整对流域的开发和管理目标, 形成了生态需水分配研究的雏形, 并在河道内流量计算方面形成了较完善的方法^[1-5]。20 世纪 80~90 年代, 针对河流断流、水污染严重等问题, 国内专家提出应在水资源配置中考虑生态与环境需水; 在水资源规划时, 要保证为改善水质所需的环境用水, 其研究主要集中在宏观战略方面, 对如何实施、管理仍处于探索阶段。这一时期, 针对中国北方流域出现的水资源短缺现象, 研究者在探讨生态需水概念的同时, 对河流、植被、湿地、湖泊等生态系统的生态需水量展开了大量的研究, 并相继提出一些理论。如刘昌明根据流域水资源开发利用与生态需水的关系, 提出了生态水利的“四大平衡”原理(水热平衡、水盐平衡、水沙平衡、水量平衡), 探讨了“三生”用水(生活、生产与生态)之间的共享性^[6]; 干旱半干旱地区生态需水以及生态与环境建设和保护需要的生态用水的深入研究。国内生态需水多从河流地貌学、水文和水资源的角度, 主要集中在干旱区水资源综合开发和利用的研究, 还有研究从水文学、水环境学等角度, 结合河流功能, 分生态水、资源水和灾害水等 3 个方面进行生态需水的研究, 以上研究未能充分反映生态需水的核心机理, 没有科学地解决水分-生态的过程变化以及耦合作用机理、生态目标的确定以及水资源的生态效益等方面。近几年来以生态需水为主题的论著异军突起, 表明生态需水研究在这段时间内引起了研究者的高度重视, 但其存在的问题也较多, 需要深刻审视中国生态需水研究的理论和方法^[7,8]。

收稿日期: 2007-07-09 修订日期: 2008-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(40571029)

作者简介: 张丽, 女, 博士生, 主要研究方向为水资源高效利用。北京市朝阳区大屯路甲 11 号 中科院地理科学与资源研究所, 100101。

Email: lzhang.05b@igsrr.ac.cn

*通讯作者: 李丽娟(1961-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水文水资源。北京市朝阳区大屯路甲 11 号 中科院地理科学与资源研究所, 100101。Email: lij@igsrr.ac.cn

早期对河流枯水流量的研究,主要是为了满足航运功能的需求;随后关于最小可接受流量的研究,主要是为了满足排水纳污的环境用水需要;近几年开始研究生态系统可接受的流量变化,主要为了恢复河流生态系统的整体性功能。生态需水(主要是河流系统)的研究内容主要包括:河道流量与鱼类栖息环境关系的研究;河道流量、水生生物与溶解氧之间的关系研究;水生生物指示物与流量之间的关系研究;水库调度考虑生态水量的优化分配研究;环境生态用水与经济用水关系研究;河流最小流量及其确定方法的研究等^[9-12]以及应用先进技术和手段研究流域枯水流量方面的研究更为突出。

总体来说,20世纪90年代以前对生态需水量的研究侧重于河道生态系统,主要集中在根据河道物理形态、所关心的鱼类、无脊椎动物等对流量的需求,来确定最小及最佳的流量;20世纪90年代后的研究,不仅研究维持河道的流量,包括最小的和最适宜的流量,而且充分认识到了洪泛平原流量在保护河流生态系统中的重要性,考虑了河流生态系统的完整性及河流生态系统可接受的流量变化,并随着生态需水的深入研究,逐步从河流生态系统类型扩展到了其他生态系统类型。

2 生态需水的概念及其内涵

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,如生态用水、生态耗水、生态缺水、生态储水、环境需水及生态环境需水等,上述概念与生态需水并不等同,属于不同层次的概念。生态用水是指流域生态系统实际使用的水资源,反映生态系统历史或现状的用水水平^[13],生态需水是生态用水的依据。生态耗水是指生态系统维持生物生存消耗掉的水量(如蒸散量),生态需水大于生态耗水。生态缺水是指特定状态下的生态系统对于预期的生态目标,系统缺乏的、需要补充的水量,即供水与需水的差值。生态储水是指生态系统所处的特定时空范围内储存的或可获取的天然存在的水,是生态需水总量中的部分非消耗用水因参与了生态系统的物质和能量循环而滞留在生态系统内部^[14]。环境需水是改善人类生存环境质量所需要的水量^[15]。生态环境需水量是生态需水和环境需水的总和。广义生态环境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;狭义生态环境需水是指维持生态系统正常功能所需补充的径流性水资源总量。生态环境需水量的研究涉及了水域(河流、湖泊、沼泽湿地等)、陆地(干旱区植被)、城市等生态系统^[16]。

诸多研究者针对湿润地区的河流、湖泊、湿地等生态系统以及干旱区植被生态系统的需水展开了大量的研究,对于这种不同的研究侧重点,生态需水的概念和内涵有所差异,但可从以下两个角度来理解,一是生态学角度,从剖析生态系统的结构、物质循环和能量传输着手,生态需水即为在一定生态目标下,为维持特定生态系统的生态功能所需要的一定水质标准下的水量。二是

水利学角度,生态需水是进行生态建设或环境保护所需水量,从水资源配置中需水定额角度进行分析,划分为河道内和河道外生态需水^[17]。

笔者认为,生态需水概念可分为两个层次,一个是针对降水的广义概念;另一个是针对地表和地下水资源的狭义概念。广义的生态需水可理解为在一定生态目标下,维持相应时空范围内生态系统水分平衡(包括水热平衡、水沙平衡、水盐平衡、水量平衡)所需要的总水量,它适用于对陆地生态系统(森林、草原等)和水生生态系统(河流、沼泽湿地、湖泊等)生态需水的描述,无论是在水资源供需矛盾突出、生态与环境脆弱的干旱半干旱区,还是在水资源丰沛、水污染严重的湿润地区,这一广义的概念具有普遍意义,它是针对降水资源口径而言的。而狭义的生态需水是指一定的生态目标下,为维持生态系统正常生态与环境功能所需要补充的径流性水资源量,它是针对径流性水资源口径而言的。目前生态需水量的研究基本是在广义水资源的概念下,但在水资源规划中,只能对狭义水资源进行调配,然而生态需水是为水资源的合理配置服务的,因此,针对径流性水资源的狭义生态需水研究有更大的实际意义。

3 生态需水理论与量化方法研究

针对当今水资源短缺的现象,在明确探讨生态需水概念的同时,生态需水的一些理论及其计算方法相继提出。关于生态需水的研究已涉及到水域和陆地生态系统,以下着重探讨了河流、植被包括农田、湿地湖泊生态需水及其量化方法。

3.1 河流生态需水

河流生态需水量是指满足维持河流系统特定的生态与环境功能(如输沙、防污、防止海水入侵、景观娱乐等)而消耗的水量,主要包括防止河道断流、湖库萎缩所需要的河道基流量;维持河流输沙平衡的最小流动水量;改善江河水环境的最小稀释净化水量;防止海水入侵所需的河口最小流量等。关于河流输沙需水的研究,均是在泥沙含量较多的河流如黄河、渭河等展开的,一般是根据河流输沙运动特性研究汛期输沙需水量并提出相应的计算方法^[18-20]。从水质模型角度出发^[21],以河流稀释和自净作为主要环境功能进行河道生态需水量的计算^[22],揭示流域生态修复问题^[23]。从河口水环境污染出发,采用水文学、生物学及水力学方法、人工BP最新技术分析河口生态需水量^[24,25]。

已有的常用的河流生态需水量计算方法见表1。

水文学法和水力学法应用较为普遍,但缺乏与生物学的结合,影响了方法的可信性。因此,国内研究者提出将水力分析与生境评价相结合,提出了基于生境适宜性评价和模拟的方法如IFIM法、整体耦合法(BBM法)和完整性方法评估整个河流系统,包括源区、河道、河岸带、洪泛区、地下水、湿地和河口地区,其中整体耦合法对于维持河流廊道系统功能的完整性有重要价值,是今后研究的重点^[39]。除了以上方法外,国内关于河流生态需水量化方法的主要代表是最小月平均流量法和月

(年)保证率假设法。最小月平均流量法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需水量。月(年)保证率假设法是根据国内实际,对 7Q10 法

进行改进,一般采用近 10 年最小月平均流量或 90% 保证率最小月平均流量作为河流最小流量设计值^[40]。

表 1 河流生态需水量主要计算方法

Table 1 Main calculated methods of ecological water requirement of river system

计算方法	方法描述	典型方法	优点	缺点
水文学方法	以历史流量为基础,根据简单水文指标对设定河流流量,直接获取历史流量中天然径流量的百分数作为河流生态需水量的推荐值	Tennant 法 ^[11] 、Texas 法 ^[26] 、7Q10 ^[27] 、RVA 法 ^[28] 、NGPRP 法和基本流量法 ^[29] 等	现场不需要测定数据,具有简单快速的特点	未考虑流量的丰、枯水年变化和季节变化以及河段形状的变化
水力学方法	根据河道水力参数(实测或曼宁公式计算)如宽度、深度、流速和湿周等确定河流所需流量	湿周法 ^[30] 、R2Cross 法 ^[31] 、CASIMIR 法 ^[32] 等	测量简单,不需要详细的物种—生境关系,数据容易获得	体现不出季节变化因素,不适用确定季节性河流流量
栖息地偏爱法	根据指示物种所需的水力条件确定河流流量,为水生生物提供适宜的物理生境,定量化并基于生物原则的物理实验模型的方法	IFIM 法 ^[33] 、PHABSIM 法 ^[34] 、水力评价法 ^[35] 、Basque 法 ^[36] 等	在水力学法的基础上考虑了水量、流速、水质和水生物种等影响因素	所需的生物资料难以获取
综合法	从系统整体出发,根据专家意见综合研究流量、泥沙运输、河床形状与河岸带群落的关系,使推荐的河道流量同时满足生物保护、栖息地维持、泥沙沉积、污染控制和景观维护等功能	BBM ^[37] 、整体评价法 ^[38]	综合考虑了专家小组意见和生态整体功能,强调河流是一个生态系统整体	必须有实测天然日流量系列、专家小组意见以及公众参与等,不易被应用。

3.2 植被(含农田防护林)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。植被生态需水研究主要集中在我国干旱半干旱区,其生态需水量包括保护与恢复天然植被需水量、水土保持用水量、排盐用水等。许多学者对我国干旱半干旱区植被生态需水进行了大量研究,如干旱区绿洲景观生态需水量^[41]以及干旱区地带性植被和非地带性植被^[42]生态需水估算。地下水是干旱区绿洲水分的主要来源,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^[43]。另外,还有研究分别从景观生态学原理和水资源平衡角度分析干旱区植被生态需水^[44]。

一些学者认为在干旱半干旱区,农田在维护生态与环境质量方面也起到了极其重要的作用,建议将农田需水量划入生态与环境需水。笔者认为,农业区特别是水田需水量很大,需要大量的灌溉水,这一部分需水量应作为农业生产需水考虑计入农业需水中,与生活、生产、生态是相互独立的需水部门。但维持农田人工生态系统良性发展(如防止农田水土流失及退化的农田防护林)所需的水量需要单独考虑计算,可以作为植被生态需水的一部分或者单独划分为农业区生态需水量。

诸多学者采用不同方法估算干旱区植被生态需水量。如生态系统模拟和耗水量法^[45],直接算法^[46],间接算法,植被蒸散发法(Hargreaves 公式、Penman 公式等)^[47],定额法以及现在应用较多的是基于 RS 和 GIS 技术的计算方法^[48,49]。其中,定额法进行植被生态需水量的计算最为简单,也是目前常用的方法,但其适用于基础工作较好的地区;直接和间接计算方法主要适用于干旱区植被生存主要依赖于地下水的区域;植被蒸散发法主要以改进的 Penman 公式为主,由于该公式避免了直接测定植被表面温度,只与气象因素有关,且计算精度较高,该方法得到广泛的应用。同时,随着新技术的不断

提高,GIS 技术及遥感技术结合的植被生态需水计算方法得到广泛应用。上述生态需水通常是广义口径的数量,而对于狭义的径流性水资源来说,还需扣除其中降水补给的部分。

3.3 湿地、湖泊生态需水

湿地是缓冲陆地和水生系统交互作用的交错区。湿地生态需水量是湿地所需要消耗水量的多年平均值。许多学者研究湿地水位与植物的生长和生存关系以及水文过程对群落结构与空间格局的影响,通过对湿地系统的生态水文研究,来保护水生生物的栖息地。还有研究利用遥感技术对湿地生态需水量进行计算也是近期湿地生态需水研究的热点问题^[50]。崔保山等通过分析湿地生物和水量的相关性,计算不同管理目标的湿地生态需水量^[53]。笔者认为湿地生态需水中的消耗水量一部分可依靠天然降水补充,短缺部分需要利用径流资源进行补充以保证湿地生态系统的健康状态。

关于湿地生态需水量的计算应用较多的是水量平衡方法。崔保山等提出湿地生态系统生态需水量包括湿地植被需水量、湿地土壤需水量和湿地野生生物栖息地需水量,并给出了相应计算方法^[51],这种方法在湿地生态需水量计算中得到广泛应用。但该方法将湿地不需更新的蓄存水量计入湿地生态需水量是不合理的,李丽娟等针对此问题提出湿地生态需水量是在一定生态目标下保证湿地生态系统不受破坏多年平均需要补充的径流量,不需要每年补充更新而维持湿地一定功能的水量为生态储水,应单独讨论两者的定义及计算方法,区分湿地储水量和生态需水量能使计算结果更加合理^[52]。

湖泊生态与环境不断恶化,需要保证一定的水量用于维持湖泊的合理水位及水体的自净能力。刘静玲等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^[53]。徐志侠等根据湖泊水文循环原理,提出吞吐型湖泊生态需水的组成及计算方法^[54]。刘燕华

根据区域气候,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^[44]。笔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。

湖泊生态需水量研究方法主要有水量平衡法、换水周期法、最小水位法及功能法。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。对于中国尤其是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。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,徐志侠提出采用天然水位资料统计法、湖泊形态分析法和生物空间最小需求法三种方法计算湖泊最低生态水位,以此计算湖泊生态需水量^[54],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。功能法根据生态学基本理论,遵循兼容性、优先性、最大值和等级制等原则,全面地计算湖泊各生态需水组分的需水量。

4 存在问题及进一步研究进展

4.1 基础理论的研究

目前,生态需水基础理论研究严重不足,概念及其内涵存在着许多分歧,评价指标体系、方法尚不健全。在今后的研究中应着重于:生态需水概念界定及其内涵与外延;生态需水的分类;不同类型生态需水形成机理;影响生态需水内在与外在因素;生态需水评价指标体系;不同类型生态系统与水分变化的相互关系等,为准确计算生态需水量提供可靠的依据。

4.2 生态需水量化方法研究

从国内对生态需水的研究上来看,现有生态需水量化方法均存在不同程度的缺陷,如理想的河流生态需水量计算方法应该能够量化所有的参数,反映参数之间的相互影响,但目前这样的方法并不存在;河道外植被生态需水的计算不尽完善,尚需进一步的研究探索。另外,对于新技术、新方法如遥感技术、GIS技术的应用较少,需要进一步加强新技术在计算生态需水量相关数据方面的应用。探讨研究不同类型地区不同生态系统生态需水的量化方法。

4.3 生态系统建设目标的合理确定

生态需水量的研究不仅是为了说明生态用水现状问题,更主要是明确为进一步改善区域生态与环境需要消耗的水量,因此,确定合理的生态与环境保护目标尤为重要,例如某一流域现有的隐域性植被是否需要保护,保多少;已经干枯或正在萎缩的湿地湖泊要不要恢复,恢复到什么程度;已经降低的地下水位是否需要回补,回补多少等等。要明确这些问题,最主要是进行流域生态与环境建设目标的合理性分析。

4.4 生态需水量耦合研究

生态需水量研究主要是为水资源合理配置服务,保障自然生态功能在人与自然和谐的前提下,最大程度降低生态需水量,增加可利用水量的途径和措施。目前,生态需水量多侧重于单项研究,而且各项之间的计算存在着交叉重复。在区域需水总量计算中,各项简单相加并不能解决交叉重复水量问题。因此,应把流域生态系统作为一个有机整体,研究水在各生态系统的循环状况、循环机理,建立生态需水量耦合模型,定量分析流域生态需水量。

[参 考 文 献]

- [1] Armentrout G W, Wilson J F. Assessment of low flows in streams in northeastern Wyoming[J]. USGS Water Resources Investigation Report, 1987, 85-4246, 4(5): 533-538.
- [2] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers[J]. Journal of Hydrology, 2001, 241(1-2): 140-151.
- [3] Henry C P, Amoros C. Restoration ecology of riverine wetlands: I. a scientific base. environmental management[J]. 1995, 19(6): 891-902.
- [4] Henry C P, Amoros C, Giuliani Y. Restoration ecology of riverine wetlands: II. an example in former channel of the Rhone River[J]. Environmental Management, 1995, 19(6): 891-902.
- [5] Geoffrey E P. Water allocation to protect river ecosystems[J]. Regulated rivers research & management, 1996, (12): 353-365.
- [6] 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): 18-20.
- [7] 钱正英, 张光斗主编. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [8] 中国工程院重大咨询项目. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究, 2004.
- [9] White R G. A methodology for recommending stream resource maintenance flows for large rivers[A]. In: J F Orsborn, C H Allmann. Proceedings of a Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs, American Fisheries Society[C]. Maryland: Bethesda, 1976: 376-399.
- [10] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. In: US Fish and Wildlife Service, Instream Flow Information Paper No.21, Washington[M]. 1986.
- [11] Gore J A. Setting priorities for minimum flow assessments in Southern Africa[J]. South African Journal of science, 1989, 85: 614-615.
- [12] Gore J A. Models for predicting benthic macro invertebrate habitat suitability under regulated flows[M]. In: Gore J A, Petts G E. Alternatives in Regulated River Management. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1989: 253-265.
- [13] 柳长顺, 陈 献, 刘昌明, 等. 流域生态用水与需水研究

- [J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 17-21.
- [14] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 626-633.
- [15] 左其亭. 论生态环境用水与生态环境需水的区别与计算问题[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 611-615.
- [16] 汤洁, 麻素挺, 林年丰, 等. 吉林西部植被生态环境需水量供需平衡研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 5-8.
- [17] 张丽. 黑河流域下游生态需水理论与方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [18] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500.
- [19] 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[J]. 中国科学E辑 技术科学, 2004, 34(1): 155-164.
- [20] 宋进喜, 刘昌明, 徐宗学, 等. 渭河下游河流输沙需水量计算[J]. 地理科学, 2005, 60(5): 717-724.
- [21] 黄锦辉, 郝伏勤, 高传德, 等. 黄河干流生态环境需水量初探[J]. 人民黄河, 2004, 26(4): 26-27.
- [22] 丰华丽, 王超, 李勇. 流域生态需水量的研究[J]. 环境科学动态, 2001, (1): 27-30.
- [23] 杨艳霞. 海河流域生态修复需水量的思考[J]. 水利规划与设计, 2005, (2): 40-43.
- [24] 孙涛, 杨志峰. 河口生态环境需水量计算方法研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 573-579.
- [25] 拾兵, 李希宁, 朱玉伟. 黄河口滨海区生态需水量神经网络模型的建立[J]. 人民黄河, 2005, 27(10): 70-71, 74-75.
- [26] Mathews R C, Bao Yixing. The Texas method of preliminary instream flow assessment[J]. Rivers, 1991, 2(4): 295-310.
- [27] Caissie D, El-Jabi N, Bourgeois G. Instream flow evaluation by hydrologically-based and habitat preference (hydrobiological) techniques[J]. Rev Sci Eau, 1998, 11(3): 347-363.
- [28] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [29] Palau A, Alcazar J. The basic flow: an alternative approach to calculate minimum environmental instream flows[A]. In: Leclerc M, et al. Ecohydraulics 2000, 2nd international symposium on habitat hydraulics[C]. Quebec City, 1996.
- [30] Christopher J, Gippel, Michael J Stewardson. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated rivers: research & management, 1998, 14: 53-67.
- [31] Mosely M P. The effect of changing discharge on channel morphology and instream uses and in a braided river, Ohau River, New Zealand [J]. Water Resources Researches, 1982, (18): 800-812.
- [32] Giesecke J, Jorde K. Ansätze zur Optimierung von Mindestabflubregelungen in Ausleitungsstrecken[J]. Wasserwirtschaft, 1997, 87: 232-237.
- [33] Stutzner B, Muller R. Standard hemispheres as indicators of flow characteristics in groben[J]. Freshwater Biology, 1989, 21(3): 445-459.
- [34] Stalnaker C B, Lamb B L, Henriksen J, et al. The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM[M]. National Ecology Research Center, International Publication, Fort Collins, Colorado, USA, 1994.
- [35] Thoms M C, Sheldon F. An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: The role of geomorphology[J]. Geomorphology, 2002, (47): 153-168.
- [36] Docampo L, Bikuna B G. The basque method for determining instream flows in Northern Spain[J]. Rivers, 1995, 6(4): 292-311.
- [37] Arthington A H, King J M, Keefee J H, et al. Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of river in ecosystem[A]. In: Pigram J J, Hooper B P(eds). Water Allocation for the Environment. Armindale: The Centre for Policy Research[C]. University of New England, 1992: 69-76.
- [38] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 1998, 1(2): 109-124.
- [39] 丰华丽, 郑红星, 曹阳. 生态需水计算的理论基础和方法探析[J]. 南京晓庄学院学报, 2005, 21(5): 50-55.
- [40] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 科学出版社, 2003.
- [41] 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): 234-250.
- [42] 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[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1-8.
- [43] 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[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542-549.
- [44] 刘燕华. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [45] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——黑河流域为例[J]. 中国沙漠, 2002, 24(2): 129-133.
- [46] 何永涛, 闵庆文, 李文华. 植被生态需水研究进展及展望[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 8-13.
- [47] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 114-117.
- [48] 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[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2467-2476.
- [49] 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.
- [50] 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[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 149-152.
- [51] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态需水量研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 31-36.
- [52] 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.
- [53] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法比较研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609.
- [54] 徐志侠, 王浩, 唐克旺, 等. 吞吐型湖泊最小生态需水研究[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 140-144.

Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement

Zhang Li^{1,2}, Li Lijuan^{1*}, Liang Liqiao^{1,2}, Li Jiuyi^{1,2}, Jiang Dejuan^{1,2}, Xu Mingxing³, Song Wenxian³

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Baicheng Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Baicheng 137000, China*)

Abstract: Ecological water requirement is an important research content of ecological hydrology. Progress on the research of ecological water requirement was analyzed. According to the concept and relative concept of ecological water requirement, generalized and narrow concepts of ecological water requirement were defined. Generalized concept of ecological water requirement is the total water amount that ecosystem require to keep the balance of water resource under the certain ecological targets; while narrow concept of ecological water requirement is the runoff that ecosystem consume to maintain the ecological and environmental function of ecosystem. Ecological water requirement of land and water ecosystem have been researched. Theory and calculated method of ecological water requirement of river system, vegetation system including farmland, wetland and lake system were stated and summarized. The further researches of ecological water requirement should be focused on the basic theory research, quantitative method and coupling method of ecological water requirement. Ecological water requirement for the different targets of ecosystem protection should be mainly discussed for the further study.

Key words: ecological water requirement; concept; theory and method; advance