

生态用水及其核算方法

苗 鸿¹, 魏彦昌^{1,2}, 姜立军¹, 欧阳志云¹, 史俊通², 王效科¹, 赵景柱¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:生态用水研究是近年来国内外关注的热点。在综合分析国内外生态用水研究进展情况的基础上, 针对河流、植被、湿地以及城市 4 种生态用水类型, 对其核算方法进行了分析, 比较了不同方法的优缺点及适用范围。提出目前生态用水研究还存在如下问题: (1) 生态用水核算中采用的不同方法都有其各自的局限性, 但又都是针对具体的研究区域、特定的生态系统的较实用方法。因此在生态用水的核算方法上关键是方法的选择和结合具体案例对核算方法在深度、精度上的进一步探讨; (2) 生态用水的机理研究不够深入。以往研究直接以植被生长用水量、鱼类等需保护动物用水量等作为替代生态用水量, 难以反映生态系统需水的真实状况; (3) 在研究尺度上往往都显得过于宽泛, 对研究区域的基本情况、生态条件及水资源现状很难有详细明确的认识, 因此数据的真实性及结果的可应用性也必然降低。文章最后认为, 今后生态用水研究应点面结合, 加强机理研究, 增强研究结果的实践意义。

关键词:生态用水; 核算方法; 问题分析

Ecological water use and the estimate method

MIAO Hong¹, WEI Yan-Chang^{1,2}, JIANG Li-Jun¹, OUYANG Zhi-Yun¹, SHI Jun-Tong², WANG Xiao-Ke¹, ZHAO Jing-Zhu¹

(1. Key Lab of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Agronomy, Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1156~1164.

Abstract: Great attentions have been paid on ecological water use in recent years, but a lots of questions are still unsolved, such as confusion in definition of ecological water use. At first we redefined ecological water use as water resources demand for maintaining the special structure, process and services of ecosystems. Estimating methods of ecological water use were reviewed for four ecosystems whose ecosystem functions are closely pertain to water available; such as river, vegetation, wetland and urban etc. After comprehensively analyzing the studies on ecological water use published so far, three problems has been realized as follows: (1) It is difficult to find a universal methods satisfying to all regions and conditions. Previous studies have showed that different methods employed to estimate ecological water use have some limitations, but they are practicable methods for special area and ecosystem. So improving

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70171044); 国家“十五”科技攻关课题 资助项目(2001BA610A-01)

收稿日期:2002-05-27; **修订日期:**2003-04-26

作者简介:苗 鸿(1965~), 女, 沈阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事水资源规划, 环境评价和生态规划等研究。E-mail: hmiao@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: Natural Science Foundation of China(No. 7017044) and the Tenth Five-years National Key Project(No. 2001BA610A-01)

Received date:2002-05-27; **Accepted date:**2003-04-26

Biography: 苗 鸿, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in water resources planning, environmental assessment and ecological planning.

estimation of ecological water use should develop more accurate and comprehensive methods for specific region and target. (2) Mechanism of ecological water use is not well understood, including many processes that controlling water balance and cycles of ecosystems. Previous researches generally replace ecological water use with vegetation grown water use and fishes and other animals' protection water, which is hard to represent the actual status of ecosystem water requirements. (3) The spatial scale considered is too large to be difficult to having a detailed and accurate understanding of the basic situation, ecological condition and water resource of the studied area. So the accuracy of data and the adaptability of result are inevitably degraded. In conclusion, future studies should integrate point monitoring with area investigation simultaneously, and focus mechanism study so as to increase practicability of ecosystem water use for protecting eco-environment.

Key words: ecological water use; estimating method; problem analyze

文章编号:1000-0933(2003)06-1156-09 中图分类号:TV213.4 文献标识码:A

生态环境是人类生存发展的基本自然条件,水对维持人类赖以生存的生态环境起着决定性的作用。长期以来,人类在水资源的开发利用中,只重视解决生产、生活用水的需求,对水资源保护利用与生态环境的相互依存关系缺乏认识,忽视生态用水^[1],从而导致了一系列的生态环境问题。由于水资源过度开发所造成的河湖湿地萎缩,河流断流,野生生物栖息地破坏,生物多样性丧失,河川淤积,水体自净能力降低,水环境恶化等已成为日趋严重的生态环境问题。在我国,由于水资源的过度利用所造成的生态环境后果已成为许多区域社会经济发展的主要障碍。如,海河流域历史上曾是水域、湿地广泛分布的地区,生态环境状况良好,目前其水资源开发利用率达 80% 以上,严重超出世界公认的 30% 开发利用率上限,已造成海河流域的许多河流断流、湖泊湿地干涸,地面沉降^[2]。新疆塔里木河,甘肃、内蒙古黑河下游,河水断流、湖泊干涸、湿地消失、林草植被大面积死亡;黄河下游河段长时间枯水、断流、黄河三角洲湿地退化、地下水位下降等无一不是由于生态水量减少引起的^[3]。

生态用水(又称环境用水^[4]或生态环境用水^[5])是国内外学者近 30 年才提出的全新概念,关于它的描述和内涵界定多种多样,核算方法也各不相同。本文试图从总结生态用水的研究与应用进展出发,综合论述生态用水的概念和核算方法,分析生态用水研究的特点与不足,分析存在的问题,探讨今后生态用水研究的设想。

1 生态用水的研究与应用发展概况

美国早在 1908 年就提出了流域管理的概念,认为流域水环境是一个整体。目前,环境用水核算已成为水资源管理的一项重要内容^[6]。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作了大量工作,如提出了 7Q10 法, Tennant 法,湿周法, R2CROSS 法等核算方法。英国从 20 世纪 60 年代开始改革水资源管理体制,设立水资源局。20 世纪 70 年代进一步实行集中管理,设立了国家水理事会,在各河流水务局管辖范围内实行对地表水和地下水、供水和排水、水质和水量的统一管理,协调水资源在各部门之间的分配^[7]。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规定了水利工程施工建设和运用管理应当保证的河道内最小环境流量的底限,最小环境流量或最低生物流量即相当于目前通常认为的生态用水量^[8]。

我国从 1970 年代末期,环境水利工作者就开始研讨环境容量、河流最小流量问题,长江水资源保护所最早进行了《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]。

1995 年,汤奇成以新疆地区为背景,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^[5]。1996 年, Gleick 明确给出基本生态需水(Basic ecological water requirement)的概念框架,即提供一定质量数据数量的水给天然生境,以求最小化地改变天然生态系统的过程,并保护物种多样性和生态整合性^[10]。随后国内外有关生态用水的研究迅速开展起来^[11~16]。澳大利亚把“低地河流系统环境

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。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,对内陆河流域片干旱半干旱地区的生态环境需水、地下水超采严重的地区的生态环境用水进行了估算,并对全国生态环境用水制定了 800~1000 亿 m^3 的目标^[16]。预计在未来的几十年中,全世界范围内生态用水量将明显增加,生态环境和工业、农业、生活一样,将成为主要的用水部门。

从生态用水研究与应用发展概况来看,国内外生态用水研究已取得了较大进展,生态用水的概念已相对明确,核算方法也趋于完善。各国学者依据不同的案例进行了大量研究,特别是我国不仅研究了河流的生态用水,对林地、绿洲、湿地等生态用水也进行了研究^[17~20]。虽然此阶段研究进展较快,对生态用水定量定性研究也有所突破,但对于生态用水的机理研究及保障措施研究方面还明显不足,有待更深入的工作。

2 生态用水的概念

“生态用水”作为一个明确的概念见诸于各类文献还只是近 30a 左右的事情,但在生态学、环境保护学等诸多学科领域关于生态用水的实际研究早已客观存在。如 Poff 等^[21]指出南非持续的人口增长导致水资源的紧张,人类生活及经济用水已占到水资源的 90% 以上,因此必须尽快制定措施,提供给河流更多的生态用水来保证其生态功能。James 也认为要提供足够的生态环境用水量,必须加强河流域水资源的利用管理及生物对水环境改变的反应认识^[22]。

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、水盐平衡等所需用的水都是生态环境用水”;“狭义的生态环境用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量”^[23]。贾宝全等认为绿洲是干旱区生态环境的主体,凡是对绿洲景观的生存与发展及环境质量维护与改善起支撑作用的系统(或组分)所消耗的水分,都称之为生态用水^[24]。河流系统功能通常包括生态功能、环境功能和资源功能等^[25,26],李丽娟等据此定义河流系统生态需水量为维持地表水体特定的生态环境功能,天然水体必须蓄存和消耗的最小水量^[27]。河流生态系统用水量的确定,不仅要满足河流生态系统对水量的需求,而且要确保水质能保证河流生态系统处于健康状态^[28]。因此,严登华等定义河流生态用水为:维持地表水体特定的生态功能,所需要的一定水质标准下的水量,具有时间和空间上的变化^[29]。

近年来随着湿地研究的升温,湿地对生态环境的重要性逐渐被人们认识^[30]。湿地与水环境是维系水体生态平衡的有机整体,相互依存,缺一不可^[3]。崔保山等确定湿地生态环境需水量是指:湿地为维持其生命活动和自身发展过程所需要的水量。湿地研究范围包括自然湿地和人工湿地,湿地生态用水可分为:湿地植物需水量、湿地土壤需水量、湿地动物需水量、野生生物栖息地需水量和生态地质过程需水量等^[20]。

目前生态用水的概念由于研究领域的局限大多都是针对生态用水某一方面而界定的,具有各自的局限性。从生态系统的角度出发,生态用水是指为维护生态系统的特定结构、生态过程和生态系统服务功能的用水量。生态用水的主体为生态系统,其内涵包括维持生态系统结构用水和维持生态过程与生态服务功能的用水。针对特定区域维持生态系统结构的用水指植被恢复、湿地重建和城市绿化用水等;维持生态过程与生态服务功能的用水指河流输沙排盐、回补地下水、污染物稀释和河流自净用水等。该概念表明不同生态系统的生态用水均有其特定的形成机理,适用于特定的核算方法,必须从具体的生态系统的结构、过程和功能出发对生态用水进行研究,据此得到的计算结果将更接近于实际,并且更易于应用。

3 生态用水的核算方法及应用

3.1 河流生态用水的核算

3.1.1 历史流量评估法 历史流量评估法(Historic flow methods)是基于河流历史纪录的流量特征,认为历史流量足以展现河流生态系统在自然状态(生态平衡)下的正常运行模式。河川生物因长期适应流量变化,所以评估是采用河川平均流量的百分比,或采用日流量历时曲线(Flow duration curve)的某个概率流量,即可代表河流生态系统最低保护标准的流量。如 Tennant 法^[31]就是研究鱼类在不同年平均流量百分比时的生活状态,进而归纳出河川年平均流量的 10% 为维持河流生态功能的低限,定为河流的基础流量

(见表 1)。Jowett^[32]也曾采用几年一遇之枯水流量、日流量延时曲线大于 96% 等为生态基流量。历史流量评估法的主要限制为流量记录必须完整且为未遭受人为干扰前的纪录, 并应具有统计特征估算才有意义, 所以这种算法在历史流量记录缺乏的河流难以应用。我国北方河流季节变化极大, 往往枯水季流量还小于多年平均流量的 10%, 特别是对于干旱和半干旱地区, 该法缺少实际应用价值。日本采用依据集水面积大小来估算生态基础流量^[33], 其估算标准为每 100km² 集水面积应维持 0.67cm/s 为生态基础流量。运用该法在水文资料缺乏的流域是一种简捷的算法, 但在水系复杂的流域估算值则难以反映整体河流生态系统的基本需求。

3.1.2 标准设定法 标准设定法认为生态系统的生态功能与某项相应的环境参数有对应关系, 据此采用生态功能相对应的环境条件来确定河流生态流量的基本数值, 如湿周法^[34] (Wetted perimeter method)。此方法利用湿周作为栖息地的质量指标来估算期望的河道内流量值, 假设保护好重点区域的栖息地的湿周也将对非重点区域的栖息地提供足够的保护。通过在重点区域(通常大部分是浅滩)现场搜集渠道的几何尺寸和流量数据, 以重点区域栖息地类型作为河流其余栖息地部分的代表。该法需要确定湿周与流量之间的关系, 这种关系可从多个渠道断面的几何尺寸与流量关系实测数据经验推求或从单一渠道的一组几何尺寸与流量数据中测算得出。湿周随流量加大而递增, 速率由快变缓时的分界点流量被认为是维持河流生态系统最经济、有效的流量。当流量降至常流量的 20% 时, 为维持生态功能底限, 一般定为生态基础流量。

R2CROSS 法^[6]是对湿周法的扩展, 它不以湿周作为环境条件的唯一标准, 而是确定了平均深度、平均流速及湿周长百分数作为栖息地指标。平均深度与湿周长百分数分别是河流顶宽和河床总长与湿周长之比的函数, 所有河流的平均流速均采用 1 英尺/s 的常数。这 3 种参数反映了与河流栖息地质量有关的水流状态指示因子。对于横跨浅滩的栖息地类型使这些参数保持在可靠的水平, 将足以维护冷水鱼类与水生无脊椎动物大部分生命阶段的水生生境, 最小流量的确定标准见表 2。

3.1.3 最小观察流量法 对于常年性河流而言, 维持河流的基本生态环境功能不受破坏, 就是要求年内各时段的河川径流量都能维持在一定的水平上, 不出现诸如断流等可能导致河流生态环境功能破坏的现象。基于这种考虑, 有研究人员采用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^[27]。为了维持河流生态系统的水面结构、生境和输沙排盐功能时, 必须对河道补充一定的水量。假定在没有人工取水的条件下, 可以推算出河流某一类型的生态用水。河道水面蒸发是水分散失的主要途径, 当蒸发等于降水数据如果没有足够的水量来补充河道, 水面开始下降, 河道将干涸, 河流生态系统的结

表 1 保护鱼类、野生动物、娱乐和有关环境资源的河流流量状况^[31]

Table 1 Tennant method for prescribing instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources

流量的叙述性描述 Description of flows	推荐的基流 (10~3 月份) (% 平均流量)	推荐的基流 (4~9 月份) (% 平均流量)
	Recommended base flow regimens (Oct. ~Mar.) (Percent of average annual flow)	Recommended base flow regimens (Api. ~Sep.) (Percent of average annual flow)
最大 Flushing or maximal	200	200
最佳范围 Optimum range	60~100	60~100
极好 Outstanding	40	60
非常好 Excellent	30	50
好 Good	20	40
中或差 Fair or degrading	10	30
差或最小 Poor or minimum	10	10
极差 Severe degradation	0~10	0~10

表 2 采用 R2CROSS 单断面法确定最小流量的标准^[6]

Table 2 The criterion of determine the lowest flow by R2CROSS

河流顶宽 (英尺)Upside breadth of river channel (feet)	平均水深 (英尺) Average depth of river water (feet)	湿周率(%) Rate of wetted perimeter(%)	平均流速 (英尺/秒) Average flow rate (feet/sec.)
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

构、过程和功能就要受到破坏。补充河道水面蒸发所需的水量实际就是为维护河道生态基流所需的生态用水量^[29]：

$$W_E = \begin{cases} A(E - P) & \text{当 } E > P \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } E < P \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

其中, W_E 为各月生态用水量, A 为各月平均水面面积, E 、 P 为各月平均蒸发、降水量。根据这一公式可求得各月水面蒸发生态用水量, 汇总后可得全年生态用水量。这种方法思路简洁、测算方便, 但在水系复杂的大型流域一般很难获得河道水面面积的具体数据, 是运用此方法的障碍。

3.1.4 基本功能设定法 河流的基本功能之一是为了输沙排盐, 维持水沙平衡、水盐平衡, 需要一定的水量与之相匹配, 这部分水量也可称之为生态用水。河流的含沙量和输沙量有明显的季节变化, 因而其输沙用水量也有明显的逐月变化。一般而言, 河流汛期输沙占年总输沙量的 80% 以上, 因此可忽略非汛期较小的输沙水量, 把汛期输沙用水量作为全年的估计值^[27]。在测算河流的输沙排盐生态用水量时, 各月生态用水量与河流的输沙排盐量和河水的最大输沙排盐能力有关, 因此将各月的平均输沙量与历年最大平均含沙量的比值作为各月的排沙用水量^[29]。

3.2 植被生态用水量核算

天然植被靠降水中不形成径流的水来维持其生长, 其生态用水量可以直接由降雨量减去径流量求得。如我国西北地区的荒漠草原与典型草原植被, 盖度 20%~60%, 分布地区年降水量 200~450mm, 年径流深 5~50mm, 而且位于高原, 土层深厚, 几乎不形成地下径流。因此地带性荒漠草原与典型草原植被年生态用水量为 200~400mm^[33]。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^[36]。人工植被生态用水也可以理解为水土保持行业常用的林木需水量(指在某一情况下, 林木枝叶生理蒸腾量和土壤蒸发量之和, 即林木蒸发散)。实际蒸散量是由潜水向上输送供给的, 生态用水量可由潜水蒸发或实测蒸腾量法^[37]来估算。

核算林木蒸发散一般以 Penman 综合法为基本依据^[38]。

3.3 湿地生态用水量核算

湿地被誉为“地球之肾”, 与人类的生存、繁衍、发展息息相关, 近年来湿地的重要性也逐渐被人们所认识。但关于湿地生态环境用水的核算, 还没有具体可行的方法。崔保山根据湿地生态环境需水量的基本特征和表现, 对湿地生态用水量进行了分类, 并根据各类型的特定功能和价值对各自的生态用水量计算进行了探讨, 但其计算方法需要大量的基础数据, 在应用中有相当难度^[20]。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。如湿地基本生态用水量, 可采用湿地的陆面和水域蒸发量代替^[39]。

3.4 城市生态用水量核算

河流湖泊、林地草坪是城市生态系统的主要组成部分, 为城市提供了休憩、娱乐等景观价值和保持氮代谢及生物多样性等服务功能, 对提高城市的人居环境质量和保障经济社会可持续发展具有重要作用, 城市绿地生态用水和城市水面生态用水构成了计算城市生态用水量的主体。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^[40]。

城市绿地生态用水一般采用面积定额法计算, 计算公式如下:

$$Q_L = \Psi F \quad (2)$$

式中, Q_L 为城市绿地生态用水量(m^3/a); Ψ 为绿化用水定额($\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$); F 为绿化覆盖面积(m^2)。

城市水面因其没有人工取水, 水面相对固定, 可采用水面蒸发直接计算。

$$Q_S = (E_i - P_i)S / 1000 \quad (3)$$

式中, Q_S 为城市水面生态用水量(m^3/a); E_i 、 P_i 为 i 城市的蒸发和降雨量(mm/a); S 为城市的水面面积(km^2)。

3.5 生态用水核算方法的实际应用

从以上分析数据现状生态用水核算方法主要分为两种: 一种依据历史记录或现状用水量数据核算, 如历史流量评估法、标准设定法等; 另一种依据不同生态系统类型的结构与功能维持用水量核算, 如基本

功能设定法、潜水蒸腾法等。后一种方法也称为生态需水核算方法。我国生态用水总量约 800~1000 亿 m^3 (包括地下水的超采量 $50 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 m^3$), 主要在黄淮海和内陆河流域, 分别为 500 亿 m^3 和 400 亿 m^3 [16]。由于我国华北及西北干旱半干旱地区水资源问题比较突出, 所以在这些地区生态用水问题在研究及应用中涉及的也比较多(见表 3)。

表 3 我国生态用水研究的应用实例

Table 3 Application of ecological water use(EWU) research in China

研究区域 Research area	核算用水类型 Type of water use	生态用水量 Ecological water use ($\times 10^8 m^3$)	水资源量 Water resources ($\times 10^8 m^3$)	生态用水率(%) [*] Ecological water use ratio	文献 Reference
海滦河流域 Hailuan he Basin	河流系统生态用水 River system EWU	124	419.4	0.3	[27]
东辽河流域 East Liaohe Basin	河道系统与洪泛地系统生态用水 Water course system and floodplain land EWU	20.5	60.2	0.34	[29]
西北地区 Northwest area	天然生态保护人工生态建设生态用水 Natural ecological Conservation and artificial ecological construction EWU	480.8	2344	0.21	[35]
新疆地区 Xinjiang area	天然生态系统和人工生态系统 Natural and artificial ecosystem EWU	173.1	945	0.18	[37]
黑河流域 Heihe Basin	中游绿洲防护林、下游天然荒漠绿洲 Middle course oasis shelt forest and downstream natural desert oasis	7.7	28.1	0.27	[41]

* 生态用水率是指生态用水量与当地水资源量的比值 Ecological water use ratio is the ratio of EWU to local water resources

4 问题与讨论

4.1 核算方法

核算方法是生态用水研究的基础也是研究的关键。核算方法理论依据不足, 假设条件过多是目前研究中的一个普遍问题。如定额法是国内较流行的生态用水核算方法, 但其定额的确定缺乏足够的依据, 在许多估算中甚至直接引用农业上的灌溉定额来求解, 计算结果与实际水平差别显著。生态用水核算中采用的不同方法都有其各自的局限性, 但又都是针对具体的研究区域、特定的生态系统的较实用方法。因此在生态用水的核算过程中关键是方法的选择和结合具体案例对核算方法在深度、精度上的进一步探讨。另外, 在研究中特别要加强对关系国民经济发展和对生态环境有重要影响的重大河流域的生态用水的研究; 在区域范围内, 采取综合的方法, 不单单研究森林、河流, 而且要研究湖泊湿地、城市、水库等生态环境的用水量, 使生态用水核算的综合性与生态系统的整合性相统一。

4.2 机理研究

生态用水是目前生态学与水资源学、水文学等领域研究的热点, 国内外学者已对其概念界定、用水量估算等进行了大量的研究, 但对生态用水的形成机理了解欠缺。有些研究直接以植被生长用水量、鱼类等需保护动物用水量作为替代生态用水量, 难以反映生态系统需水的真实状况。因此必须从影响生态用水的内外因素, 针对不同类型生态系统生态用水的形成机理方面进行深入研究。生态用水并不是一个固定不变的值, 根据生态系统特点或生态保护目标也可将其分为最小、适宜、最大生态用水量。加强生态用水阈值研究, 确定生态用水在水资源中配额, 即生态用水率多少为合适也是生态用水机理研究的重点。

4.3 研究尺度

目前我国的生态用水研究, 在研究尺度上往往都显得过于宽泛, 像西北地区、黄河流域等的生态用水研究等。这为宏观研究虽然在大区域的水资源管理、生态环境保护方面能起到一定的理论意义, 但对于水资源的调配则显得难以操作。研究尺度加大, 对于研究区域的基本情况、生态条件及水资源现状很难有

详细准确的认识,在核算生态用水量时采用的数据也需要考虑其信息的不完整性,因此最后结果的可指导性也就大打折扣了。所以,在生态用水研究中,应该流域研究与区域研究相结合,小流域研究与大流域研究相结合,这样由点到面,形成一个研究梯度,在不同尺度上采用不同的方法,以增强研究结果的实用价值。

References:

- [1] Shen G F. Ecological environment construction and protection and utilization of water resources. *China Water Resouces*,2000,(8):26~30.
- [2] Zhang K J. Some character of water resources exploitation and utilization in Haihe Basin. *Haihe Water Resource*, 1991,(4):25~27.
- [3] Shen M C. Ensure ecological water demand and protect wetland resources. *China Forestry*,2001,(7):16~17.
- [4] River basin planning and environment impact assessment(SL45~92). Beijing: Water Power and Water Electric Press,1993.
- [5] Tang Q C. The Development in Oases and Rational Use of Water resource. *Journal of Land Resource and Environment*,1995,9(3):107~111.
- [6] Lin C. *Environmental water use in America*. www.cws.net.cn. 2000. 5.
- [7] “Nine Dragons control the water” was over. <http://www.hnsl.gov.cn/news>. 2000. 12:18.
- [8] Yellow River Conservancy Commission, the Ministry of Water Resources of P. R. C. Guidance to water resource realign and management in Loire~Biscay Basins,2000.
- [9] Cui Z P ed. *China Water Resources Cyclopedia*. (2nd volume). Beijing:Water Power and Water Electric Press, 1990. 183.
- [10] Gleick P H. Water in Crisis;Paths to Sustainable Water Use. *Ecological Applications*,1996,8(3):571~579.
- [11] Pete Wilson, Douglas P Wheeler, David N Kennedy. CALIFORNIA WATER PLAN UPDATE BULLETIN 160-98Executive Summary. November,1998 <http://rubicon.water.ca.gov/>
- [12] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*,1998,1:109~124.
- [13] Rowntree K, Wadeson R. A geomorphological framework for the assessment of instream flow requirements. *Aquatic Ecosystem Health and Management*,1998,1:125~141.
- [14] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers. *Journal of Hydrology*, 2001,241:140~151.
- [15] Shield R and Good R. Environmental water in a regulated river system :the Murrumbidgee River planning approach to the determination of environmental needs . *Water Science and Technology*,2002,45(11):241~249.
- [16] Qian Z Y, et al. *Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China*. Beijing: Water Power and Water Electric Press,2001.
- [17] Wang X Q, Yang Z F, Liu C M. Method of Resolve the Lowest Environmental Water Demands in River Course (II) application. *Acta Scientiae Cicumstantiae*, 2001,21(5): 548~552.
- [18] Zhang Y, Yang Z F. Minimum Ecological Water Requirement of Forestland in Huang-huai-hai Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002,16(2):72~75.
- [19] Yan J P. Approach a quantitative model of use water resources structure in oasis system. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2002,38(2): 89~93.
- [20] Cui B S, Yang Z F. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands. *Acta Scientiae Cicumstantiae*, 2002,22(2): 219~224.
- [21] Poff N L and Ward J V. The physical habitat template of lotic systems; recovery in the context of historical pattern of spatio-temporal heterogeneity. *Environmental Management*,1990,14:629~646.
- [22] James C S. The role of hydraulic in understanding river process, National Rivers Initiative, South African Society of Aquatic Ecologists, Pietermaritburg. South Africa, 29 June~1 July 1998.
- [23] Liu C M. China's Water Supply and Demand in 21st Century. *China Water Resource*, 1999. 10:18~20.

- [24] Jia B Q, Xu Y Q. The Conception of the Eco-environmental Water Demand and its Classification in Arid Land. *Arid Land Geography*, 1998, **21**(2):8~12.
- [25] Boon P J, *et al.* *River conservation and management*. John Wiley & Sons Ltd., 1992. 260~266.
- [26] Petts Geoffrey. *Inpounded Rivers*. John Wiley & Sons Ltd., 1984.
- [27] Li L J, Zheng H X. Environmental and Ecological Water Consumption of River systems in Hai-luanhe Basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(4):495~500.
- [28] Feng H L, Wang C, Li Y. The research on the ecological water requirement in the watershed. *Advances in Environmental Sciences*, 2000, **1**:27~37.
- [29] Yan D H, He Y, Deng W, *et al.* Ecological Water Demand by River System in East Liaohe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(1):46~49.
- [30] Yin K Q, Ni J R. Review of wetland studies. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(5):539~546.
- [31] Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, **1**(4): 6~10.
- [32] Jowett I G. Instream flow methods: A comparison of approach. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 1997, **13**:115~127.
- [33] Li Z M. The Estimation of Minimum Flow in Streams of Taiwan—A Case Study of Eastern Taiwan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, **8**(4):146~150.
- [34] Gippel G J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1998, **14**(1): 53~67.
- [35] Wang F, Liang R J, Yang X L, *et al.* A study of ecological water requirements in northwest China (I): theoretical analysis. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(1):1~8.
- [36] Song Y D, ed. *Research on water resource and ecological problem in Talimu River*. Urumqi: Xinjiang people press, 2000. 249~263.
- [37] Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(2):243~250.
- [38] Chen L H, Wang L X. Classification of Ecological Water Use and Quota Determination of Ecological Water Use of Forest Cover in Beijing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, **8**(4):161~165.
- [39] Quan D R, Ma C H. Construction of Ecological environment and Demand of Ecological Environment on Water Resource. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2001, **22**(3):39~43.
- [40] Qu L Q. On Water for Environment and Construction of Water Eco-environment of Chengdu. *Sichuan Environment*, 1991, **16**(1):51~55.
- [41] Wang G X, Chen G D. Water Demand of Eco-system and Estimate Method in Arid Inland River Basins. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(2):129~134.

参考文献:

- [1] 沈国防. 生态环境建设与水资源的保护和利用. *中国水利*, 2000, **8**:26~30.
- [2] 张克俭. 浅谈海河流域水资源开发利用的一些特点. *海河水利*, 1991, **4**:25~27.
- [3] 沈茂成. 保障生态用水 保护湿地资源. *中国林业*, 2001, **7**:16~17.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 江河流域规划环境影响评价(SL45~92), 北京:水利电力出版社, 1993.
- [5] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用. *干旱区资源与环境*, 1995, **9**(3):107~111.
- [6] 林超等译. 美国的环境用水. 中国水利网. 2000. 5. www.cws.net.cn.
- [7] “九龙治水”到了尽头. 河南水利内部网. 水利新闻, 2000, **12**:18.
- [8] 水利部黄河水利委员会编译. 法国卢瓦尔河-布列塔尼流域水资源整治及管理指导纲要. 2000年.
- [9] 崔宗培主编. 中国水利百科全书(第二卷). 北京:中国水利出版社, 1990. 183.
- [16] 钱正英等. 为数据持续发展水资源战略研究综合报告. 北京:中国水利出版社. 2001.
- [17] 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研究(Ⅱ) 应用. *环境科学学报*, 2001, **21**(5):

548~552.

- [18] 张远,杨志峰. 黄淮海地区林地最小生态需水量研究. 水土保持学报, 2002, 16(2): 72~75.
- [19] 严江平. 绿洲系统用水结构量化模型探讨. 西北师范大学学报(自然科学版), 2002, 38(2): 89~93.
- [20] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2002, 22(2): 219~224.
- [23] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析: 生态水利研究. 中国水利, 1999, 10: 18~20.
- [24] 贾宝全,许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类. 干旱区地理, 1998, 21(2): 8~12.
- [25] 宁远等译. 河流保护与管理. 北京: 科学出版社, 1997. 260~266.
- [26] G E 佩茨著. 王兆印, 等译. 蓄水河流对环境的影响. 北京: 中国环境出版社, 1998.
- [27] 李丽娟,郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量测算. 地理学报, 2000, 55(4): 495~500.
- [28] 丰华丽,王超,李勇. 流域生态需水量的研究. 环境科学动态, 2000, 1: 27~37.
- [29] 严登华,何岩,邓伟,等. 东辽河流域河流系统生态需水研究. 水土保持学报, 2001, 15(1): 46~49.
- [30] 殷康前,倪晋仁. 湿地研究综述. 生态学报, 1998, 18(5): 539~546.
- [33] 李载鸣. 台湾地区溪流生态基础流量推估——和平溪上游案例研究. 水土保持研究, 2001, 8(4): 146~150.
- [35] 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.
- [36] 宋郁东,等著. 中国塔里木河水资源与生态问题研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000. 249~263.
- [37] 贾宝全,慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算. 生态学报, 2000, 20(2): 243~250.
- [38] 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): 161~165.
- [39] 全达人 马春花. 生态环境建设与生态环境用水. 宁夏农学院学报, 2001, 22(3): 39~43.
- [40] 瞿论强. 论成都的环境用水和水生态环境建设. 四川环境, 1991, 16(1): 51~55.
- [41] 王根绪,程国栋. 干旱内陆流域生态环境需水量及其估算——以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129~134.