

生态需水的概念及其计算方法

栗晓玲, 康绍忠

(西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 论述了生态需水的概念, 从生态需水量的基本原理出发, 探讨了各类生态需水量计算的框架。以渭河为例, 估算其多年平均河道内生态需水为 39.80 亿 m^3 。并对未来生态需水研究趋势进行了展望。

关键词: 生态需水; 概念; 计算理论

中图分类号: S271; S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2003)06-740-05

生态需水是目前水科学领域非常热门和较新的研究课题, 仅仅在最近 10 年才开始活跃。该领域尽管是科学文献报告的主题内容, 但研究多局限在全球政策与法律方面, 而且基本上没有真正执行生态需水的配水。有关生态需水的论文还基本停留在介绍一些基本的概念或定义, 其计算方法主要从物理的水量平衡、水热平衡、水沙平衡、水盐平衡等方面考虑, 而且主要是针对现有生态系统或生态水文条件, 没有考虑生态系统和水文过程的相互反馈作用以及不同遗传特性物种的水分生产关系, 还缺乏系统的建立在严谨的生理学、生态学和物理学理论及定量的数学方法基础之上的生态需水量计算方法。

什么是最优的植被群体结构组合和良性循环的生态系统? 什么是最适于西北旱区的节水型生态系统及如何构建西北旱区生态极度脆弱条件下的节水型生态系统? 生态系统最少需要多少水来维持其正常的功能(生态需水的阈值)? 如何处理器官、个体、群体及景观生态的关系, 由典型植株或局部区域的实验观测资料考虑尺度效应确定某一区域的生态需水量? 生态需水和生态耗水有什么区别? 如何评价生态耗水的价值并最优协调生态需水与经济需水的矛盾? 如何定量评价人类活动及水文循环过程演变对生态系统的影响? 这些问题是当前所有水科学和水文生态学工作者所面临的挑战。

1 生态需水量的概念

生态需水量更确切地说应是生态系统的需水量, 理解生态需水量首先得从生态系统谈起。

1.1 生态系统及生态服务

生态系统是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, 包括人类的生命支持系统——大气、水、生物、土壤和岩石, 这些要素相互作用构成一个整体, 即人类的自然环境。生态系统根据地理条件的不同分为水生生态系统和陆地生态系统两大类^[1]。生态系统向人类提供了极其重要的“生态服务”功能: 植物进行光合作用并生产氧; 细菌处理有机废物并维持良好水质; 流域植被建设能减洪并提供稳定的基流及泉水; 坡面和河川径流为生活、生产提供水源, 并为陆地生态系统和野生生物所利用; 健康的生态系统能确保生物多样性的维持和水的良性循环。生态系统服务功能是人类生存与现代文明的基础。生态系统需要水维持其功能并提供生态服务。

收稿日期: 2002-07-29; 修订日期: 2002-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90202201); 国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目 (50279042)

作者简介: 栗晓玲 (1968 -), 女, 四川开江人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。

E-mail: suxiaoling 68 @163. net

1.2 生态需水的概念

笔者认为，生态需水是指维持全球或区域生态系统和谐稳定与修复脆弱生态系统使其形成良性循环，并能最大发挥其有益功能使其提供最大生态服务，达到诸如水热平衡、源汇动态平衡、生态平衡、水土平衡、水沙平衡、水盐平衡等生物、物理、化学平衡，并在单位生态用水提供最大生态服务条件下所需要消耗的最小水量。生态需水与生态耗水或生态用水是不同的概念，目前国内有关生态需水的研究是在现有生态系统和生态水文条件下进行的，所讨论的问题大都是针对现有植被或现有地下水位条件，它是现有生态系统的耗水或用水，并不代表所论流域或区域真实的生态需水，生态需水并不等于生态耗水。讨论一个流域或区域的生态需水必须有以下几个前提条件：最优的生态结构组合；最适宜的地下水位（区域水资源联合调配的目的就是要控制地下水和地面水的合理利用量，要通过地面水和地下水的最优调控来满足生态地下水位，达到既满足生态植被需水的要求，又不造成因地下水位太高而产生潜水的无效蒸发损失）；最节水的生态系统；能维持水和生态系统的平衡；能满足流域或区域生态系统良性循环的需要；有不同水文年型和年内季节的变化。不考虑这些前提条件，所计算出的结果就不能反映生态系统需水的要求，也难以进行考虑生态需水的水资源优化配置。

2 生态需水的基本原理及其计算方法

2.1 生态需水的基本原理

生态需水的基本原理包括水文学原理以及生态系统学原理，即水分循环与水量平衡、水热平衡、水盐平衡、水沙平衡等原理。

(1) 水文循环与水量平衡原理 区域水文循环与水量平衡是生态需水的物质基础。水循环的蒸发过程包含着生物界的基本生理过程——蒸腾作用，涉及到生物生长发育^[2]。在水文循环过程中，任一区域、任一时段进入水量与包括生态需水在内的输出水量之差和水的变化量要满足水量平衡原理，因而水循环和水平衡具有重要的生态意义。

(2) 水热平衡原理 水分在生态系统的物质循环与能量流动的结构体中，既是物质循环的一部分，又是其它物质运转的载体和能量流动的媒介。地面的水分受热后要向空中蒸发（包括植物的蒸腾）。用热量平衡方程推算蒸发量的方法，称为热量平衡法^[3]。热量平衡方程

$$R = A + LE + Q_A \quad (1)$$

式中 R 为辐射平衡量； A 为大气感热； L 为蒸发潜热； E 为蒸发量； Q_A 为土壤热交换量，上式可推导出蒸发量计算式：

$$E = \frac{(R - Q_A) e}{e + 0.64 T} \quad (2)$$

式中 e 为作物冠层上方的湿度梯度； T 为作物冠层上方的温度梯度； e 为标准气压与地面实际气压的比值。

(3) 水沙平衡原理 水沙平衡是指为达到河道泥沙的冲淤平衡，而进行输沙、排沙所需要的水量。输沙水量可通过下式计算^[4]：

$$W_s(t, i) = S(t, i) / C_{\max}(t, i) \quad (3)$$

式中 $W_s(t, i)$ 为 t 时段 i 河段的输沙需水量； $S(t, i)$ 为 t 时段 i 河段的多年平均输沙量； $C_{\max}(t, i)$ 为 t 时段 i 河段的最大含沙量多年平均值。

(4) 水盐平衡原理 水盐平衡是指维持区域盐分平衡所需的排水量。区域水盐平衡可用下式表示：

$$M = m_1 + m_2 + E - P \quad (4)$$

式中 M 为水盐平衡用水量（冲洗用水量）； m_1 为在计划冲洗层内，冲洗以前的土壤含水量与田间持水量之差； m_2 为冲走计划层内过多盐分所需要的水量； E 为冲洗期内蒸发损失量； P 为冲洗期内可利用的降雨量。式中

各变量单位均为 mm。 m_2 可用以经验系数为基础的计算方法(以土壤含盐量为指标的排盐系数法)计算。

$$m_2 = 1000 H (S_0 - S) / K \quad (5)$$

式中 S_0 为冲洗前的土壤含盐量(占干土重的 %); S 为冲洗后要求达到的土壤含盐量(占干土重的 %); ρ 为土壤容重, kg/m^3 ; H 为要求冲洗脱盐深度; K 为排盐系数, kg/m^3 。

2.2 生态需水计算方法

生态需水分为河道外生态需水和河流生态需水。生态需水的计算应根据各种生态类型的需水特点, 考虑不同保证率下的生态需水状况。

(1) 河道外生态需水 主要是植被的生态需水, 包括天然植被和人工植被的生态需水。

人工植被需水可由下式计算:

$$W_p = \sum_{i=1}^n W_{pi} = A_i m_{pi} \quad (7)$$

式中 p 为植被需水保证率; A_i 为 i 类的植被面积; m_{pi} 为相应保证率的植被需水定额; n 为植被类型数。

天然植被的生态需水主要依靠吸取土壤水和地下水来满足, 可用潜水蒸发法间接估算。干旱区天然植被的实际蒸散可近似地用潜水蒸发量 wn_i 来代替:

$$W_{ni} = \sum_{i=1}^n A_{pi} E_i k \quad E_i = a(1 - h/h_{\max})^b E_{601} \quad (7)$$

式中 A_{pi} 是天然植被类型 i 的面积; E_i 为第 i 类型植被在某一地下水埋深时的潜水蒸发量; k 为不同地下水埋深的植被影响系数; a 、 b 为经验系数; h 为地下水埋深; h_{\max} 为地下水极限埋深, E_{601} 为 601 型蒸发器水面蒸发量。

(2) 河流系统生态需水 河流系统生态需水量应按时段、河段分别计算。每条河流至少应分成 4 个河段: 河源(上游)、中游、下游和入海口。不同时段 t 不同河段 i 河流系统生态需水量 $W_p(t, i)$ 主要包括: 维持河流系统的稀释自净能力所需的水量 $W_d(t, i)$; 维持河流下游地区生态适宜的地下水位所需水量 $W_g(t, i)$; 维持河流系统水沙平衡所需要的冲沙水量 $W_s(t, i)$; 维持河流系统水生生物栖息地所需的水量 $W_h(t, i)$; 维持水源涵养林所需水量 $W_f(t)$; 维持水域蒸发所需的水量 $W_e(t, i)$ 。上述各项需水有不同的时间空间上的水量水质需求, 总需水量并不是各项的简单相加。上述第、项属河道内生态需水量存在相互包含关系, 满足这三方面的生态需水量可取 3 项中的最大值, 而河流下游生态适宜的地下水位所需水量与维持水源涵养林所需水量以及水面蒸发量是各自独立的, 因此总需水量为

$$W_r(t, i) = \max(W_d(t, i), W_h(t, i), W_s(t, i)) + W_g(t, i) + W_f(t) + W_e(t, i) \quad (8)$$

稀释自净需水量 $W_d(t, i)$ 可由下式计算:

$$W_d(t, i) = W(t, i) \quad (9)$$

式中 $W(t, i)$ 为某时段某河段的污水排放量; μ 为河流稀释系数, 根据河流主要控制指标的污水排放标准与河流水环境标准确定。

生态适宜的地下水位所需最低生态需水量 $W_g(t, i)$ 与区域地下水埋深有关。如果地下水埋深太浅, 在蒸发的影响下, 盐分可在表土聚积, 使土壤发生强烈盐渍化, 不利植物生长; 埋深太深, 地下水不能通过毛管上升水流到达植物根系层, 使土壤干旱, 植被衰退, 荒漠化发展。所以生态适宜的地下水位埋深 h_0 , 应在一个合理的范围内, 其上限是指潜水强烈蒸发埋深 $h_{0\min}$, 下限是潜水蒸发的极限深度 $h_{0\max}$ ^[5]。因此维持河流下游生态适宜的地下水位所需水量 $W_g(t, i)$ 与生态适宜的地下水埋深 h_0 和实际地下水埋深 h 有关, 当 $h < h_{0\max}$ 时, 最小的生态需水量可表示为

$$W_g(t, i) = f(h, h_0) = A(h - h_{0\max}) \mu \quad (10)$$

式中 A 为地下水埋深大于 $h_{0\max}$ 的面积; μ 为含水层岩性的给水度。如果埋深 $h < h_{0\min}$ 时, 土壤容易产生盐碱化, 应排水, 在人工灌溉的区域, 则要减少地表水灌溉水量。

冲沙需水量 $W_s(t, i)$ 可根据水沙平衡原理计算。

栖息地水生生物需水计算方法有简单估计法，如文献^[6]中介绍的“Montana”法。也可用基于水文与生态学的综合方法，如BBM、IFIM法等^[7,8]。

水源涵养林所需水量 $W_f(t)$ 可用定额法。

河湖补充蒸发生态需水 $W_e(t, i)$ ，可根据河湖水面保护目标，用水面蒸发量 $E(t, i)$ 与相应的河湖水面面积 A 估算：

$$W_e(t, i) = \begin{cases} A(E(t, i) - P(t, i)) & \text{当 } E(t, i) > P(t, i) \\ 0, & \text{当 } E(t, i) \leq P(t, i) \end{cases} \quad (11)$$

3 渭河河流系统生态需水实例分析

渭河是黄河最大的支流，发源于甘肃省渭源县，于宝鸡凤阁岭附近流入陕西省，在潼关注入黄河。渭河干流全长 818 km，陕西省内河长 502.2 km。各断面水文统计资料见表 1。渭河河流系统生态需水的估算包括稀释自净需水量、生态基流需水量、冲沙需水量以及水面蒸发补水量。由于渭河干支流暴雨多发生在汛期（6~9月），年来水来沙量集中于汛期。汛期 4 个月水量占全年的 60%，沙量占全年的 90% 以上，输沙水量集中在汛期，这部分水量也具有稀释自净和维持生态基流需水量的功能，因此总生态需水量是非汛期的稀释自净需水量与生态基流两项

表 1 渭河(陕西段)各断面水文站统计资料

Table 1 Hydrologic statistical characteristic of each section in Weihe River

断面	多年平均降雨量/mm	多年平均蒸发量/mm	多年平均天然径流量/亿 m ³	区间污水排放量/亿 m ³
林家村	703.6	845.0	26.12	
魏家堡	610.4	797.0	41.77	1.00
咸 阳	532.5	867.9	56.85	1.52
华 县	532.2	1017.0	88.09	3.74

注：根据渭河陕西段 1998 年关中地区污水排放量估计各断面区间污水排放量。

表 2 渭河(陕西段)各断面多年平均生态需水量

Table 2 Ecological water requirement of each section in Weihe River 亿 m³

断面	生态需水量				生态需水总量
	非汛期稀释自净需水量	非汛期生态基流需水量	汛期输沙需水量	断面间补充水面蒸发需水量	
林家村		4.23	8.34		
魏家堡	3.33	5.01	11.80	0.10	16.91
咸 阳	5.06	8.22	16.68	0.42	25.32
华 县	12.34	10.57	26.23	1.23	39.80

中的最大值与汛期冲沙需水量及水面蒸发补水量之和。渭河多年平均生态需水总量华县断面为 39.80 亿 m³，占多年平均天然径流量的 42.3%，2000 年该断面实际生态用水量仅为 32.77 亿 m³。其它各断面多年平均生态需水量见表 2。

4 生态需水量研究展望

生态环境需水量是一个新概念，涉及生态学、水文学、地学等学科，需要多学科联合研究。其理论基础、原理方法有待进一步探索。

(1) 生态需水量的理论机制与计算方法研究 包括不同生态类型的生态需水特征；基于生态过程的不同类型生态需水的量化模型，包括不同植被组合的生态需水量，生态需水研究中的尺度问题及不同尺度转换方法等；河流系统中尤其是水生生物生态需水量等的定量化研究以及不同类型生态需水量的耦合关系等方面的研究。

(2) 生态需水量与经济需水的合理配置研究 研究生态需水的目的是维持生态系统的良性循环，而在水资源短缺的条件下，生态需水往往被经济需水挤占，因此在可持续的水资源系统中如何实现生态需水与经济需水的协调，亦即如何实现生态系统可持续的水资源优化配置模式，满足单位产值的水资源消耗最小，生态服务最

大,是今后研究的重点。

(3) 生态需水相关领域科学问题的研究,包括:水文循环的生态控制机理;生态系统健康评价的理论和方法;不同尺度水循环模型的耦合等。

参考文献:

- [1] 钱 易,唐孝炎.环境保护与可持续发展[M].北京:高等教育出版社,2000.14 - 23.
- [2] 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.
- [3] 陆渝蓉.地球水环境化学[M].南京:南京大学出版社,1998.147 - 152.
- [4] 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.
- [5] 宋郁东,樊自立,等.中国塔里木河水资源与生态问题研究[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2000.249 - 264.
- [6] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environment resources[J]. Fisheries, 1976, 11(4):6 - 10.
- [7] King Tharme, de Villiers. Environmental Flow Assessment for Rivers: Manual for the Building Block Methodology[R]. Water Research Commission Report NO TT131/00, Pretoria, South Africa, 2000.
- [8] Azzellino A, Vismara R. Pool quality index: new method to Define Minimum flow Requirements of High Gradient, low-order streams[J]. Journal of environmental engineering, 2001, 127(11):1003 - 1013.

Concept of ecological water requirement and its estimation method^{*}

SU Xiao-ling, KANG Shao-zhong

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area, Ministry of Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The concept of ecological water requirement is presented, and the essential principles and the estimation method for ecological water requirement are discussed. The framework is demonstrated by an application to the Weihe River basin, which ecological water requirement is estimated as $39.80 \times 10^8 \text{ m}^3$. Some prospects of this field are also presented.

Key words: ecological water requirement; concept; estimation method

* The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90202201).