

太湖平原河网系统生态环境需水量组成及计算方法研究

李大勇,卞戈亚,董增川,刘 凌

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:从维持和保护河网生态系统正常的基本功能角度出发,根据流域地理位置及河网地区河流自身的特点,探讨河网系统生态环境需水量的内涵和构成,指出平原河网系统生态环境需水量是在特定的时间和空间组合条件下,在合理开发和高效利用系统淡水资源的同时,为了维持和改善河网系统正常的生态结构与生态环境功能所必须蓄存和消耗的水量.在此概念的基础上,对适合于河网系统中各项生态环境需水量的计算方法进行研究,并对定量化研究的影响因素进行了分析.

关键词:生态环境需水量;河网系统;数学模型;太湖

中图分类号:TV211 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)03-0246-05

太湖平原河网地区水环境质量不断恶化,生态平衡频频遭受破坏,河网中预留出一定的有质量保证的水量,并同时保持其水体稀释自净能力已经成为使流域水生态环境系统向良性状态转变的基本保证.

到目前为止,有关生态需水量的研究刚刚处于起步阶段,国外研究的范围主要集中在河流生态基流方面^[1],国内对生态需水量的研究主要集中于水资源匮乏的西北内陆地区和黄淮海流域,许多学者从多个角度进行了有意义的探索,取得了较多有价值的研究成果^[2,3],但至今未见有关于太湖河网系统生态环境需水量研究成果的报道.本文在这一方面进行初步的研究,以期以太湖流域淡水资源的合理配置及流域水生态环境的改善提供借鉴.

1 太湖平原河网系统生态环境需水量组成结构

平原河网系统是指除湖西区、浙西区山区性河流之外的流域面上所有河流交织成网而形成的河流系统.相对于一般意义的河流系统而言,河网系统本质上是河流系统,因此可以在前人对河流系统生态环境需水量研究的基础上剖析其内涵^[4~6].笔者认为,河网生态环境需水量是在特定的时间和空间为满足特定服务目标的变量,它是能够在特定水平下满足河网系统诸项生态环境功能所需水量的总称.因此可以把它定义为:在特定的时间和空间组合条件下,在合理开发和高效利用系统淡水资源的同时,为了维持和改善河网系统正常的生态结构与生态环境功能所必须蓄存和消耗的水量.

河网生态系统的基本功能包括生态环境功能和资源功能.河网系统的生态环境功能表现在它是水生生物理想的栖息地并提供饵料和营养物质、降解污染物、调节气候、补给地下水、调蓄洪水、排水等方面;资源利用价值则表现在供水、航运、水产养殖等方面的经济价值.河网生态系统是人类和其他生物赖以生存的重要资源.

按照空间位置的不同,根据生态系统所发挥的生态环境功能及资源功能,笔者对河网生态环境需水进一步细分,其具体组成见图 1.

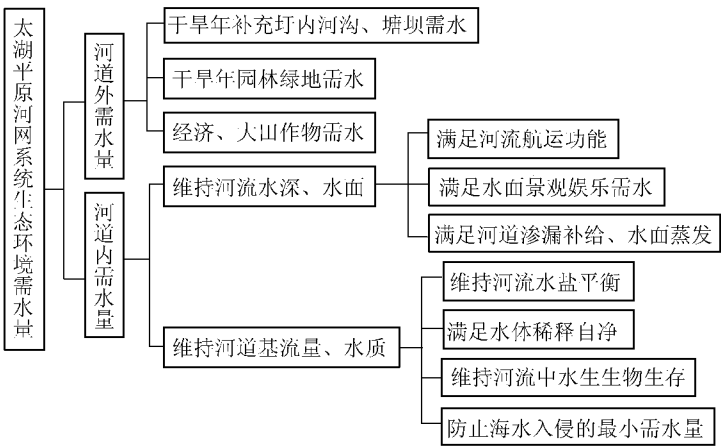


图 1 太湖流域河网系统生态需水量组成结构示意图
Fig.1 Composition of ecological water demand of river network system in Taihu Lake Basin

由于河道生态运行机制比较复杂,且具有时空变化的特征,因此上述生态环境需水量的确定并非图 1 中各项分量的简单相加,对于各项需水量中具有部分兼容的,计算时要根据它们之间的相互关系认真分析,以免重复计算,对于各项需水量之间相互兼容的,比较相互兼容的各项,以最大值为最终的需水量,其余各项累计求和。

2 太湖平原河网系统生态环境需水量计算

河网系统内极少出现干枯断流、河道淤积的生态问题,但系统中水环境问题十分突出,当遇到特殊干旱年时问题更加严重。系统生态平衡的失调更多是由水质恶化引起的,良性的河网水生态环境系统需要一定有质量保证的水量来支撑,以维持系统的生态平衡。可见,系统的生态需水更侧重于环境需水,即系统的生态需水量是为保护和改善河网地区人类居住环境及其水环境所需要的水量。

2.1 河道外生态环境需水量

对河网系统而言,河道外生态需水量主要是考虑干旱年份需要河网补充的水量,即经济作物需水量、城市园林绿地需水量及补充圩内河沟、塘坝的生态需水量。

对于干旱年份的经济作物及园林绿地需水量,因其组成要素对其生长状况的要求与同一地区的农作物要求基本相同,且太湖流域各地区在长期的农作物灌溉实践中已有很好的灌溉基础,故可直接用其组成要素的相应面积乘以其灌溉定额求得。

河网地区低地筑堤围圩保护农田,形成圩区。圩内的河沟、塘坝具有生物栖息地、调蓄水量、养殖、湿润空气等功能,其内不能少于一定的蓄水量,用以维持生态平衡,在正常的丰水或平水年,认为降水基本能够满足河沟、塘坝的最小蓄水要求,干旱年需要从圩外水网调水。在此,笔者把它看作湿地系统进行处理,其水量平衡方程式为

$$W_2 = W_1 + P + S_{\lambda} - S_{\text{出}} - E + \Delta W_g \tag{1}$$

式中: W_2, W_1 ——湿地系统时段初、时段末水量; P ——时段内降雨量; S_{λ} ——时段内流入圩内湿地系统的径流量; $S_{\text{出}}$ ——时段内流到圩外水网的径流量; E ——时段内蒸发量; ΔW_g ——时段内地下水变化量。

为维持湿地系统的生态环境功能,要求系统的蓄水量不发生变化,时段初和时段末蓄水量相等,即 $W_2 = W_1$ 。系统的地下水位维持动态平衡,即 $\Delta W_g = 0$ 。

当 $E/P < 1$ 时,湿地系统需要排水,排水量 $W_d < A(P - E)$;当 $E/P = 1$ 时,系统水量满足生态需水;当 $E/P > 1$ 时,干旱年湿地系统不能满足生态需水,调入水量为 $W_e = A(E - P)$,其中 A 为湿地系统面积。

为了在圩外河网中合理分配调入水量 W_e ,在程文辉等^①研究的基础上,笔者拓展了陆域宽度概念的应用范围。陆域宽度原用于模拟多边形圩内产生的径流向圩外河道汇入。如图 2 所示, A_1 为概化河网所包围的圩内湿地系统面积, L_1, L_2, L_3, L_4 为河道长度,假设调水量 W_e 沿河网均匀分配,因此单位河长的湿地系统面积为

$$B_1 = \frac{A_1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} \tag{2}$$

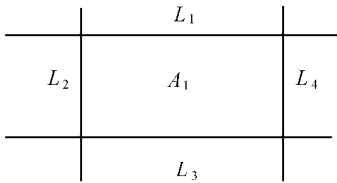


图 2 陆域宽度示意图
Fig.2 Sketch of land width

B_1 称为陆域宽度,即单位河长调水面积的概念。用 B_1 乘以净蒸发 $E - P$,得到单位河长的调水量,然后分别乘以河道长 L_1, L_2, L_3, L_4 ,便得到应从圩外水网每一条河道调出的水量。

2.2 河道内生态环境需水量

河道内生态环境需水量主要是指维持河网系统中河流自身生态环境功能的需水量,具有流量、水深两个特征量。

2.2.1 维持河网中水生生物栖息地的生态基流量

平原河网地区河流受人为活动干扰剧烈,水质日益恶化,河流中水生生物包括鱼类比较贫乏。考虑平原河网地区比较缺乏水生生物调查及其生长习性的观测数据,因此很难做到完全生态学意义上的定量研究。美国著名的 R2CROSS 法适合于浅滩式的河流栖息地类型,湿周法一般适用于宽浅河道^[7],而平原河网河道水深很浅,可近似看作宽浅型河道,且河道断面形状变化不大。因此,笔者认为湿周法比较适合计算此项生态需水量。

① 程文辉,王船海.太湖流域河网水量模型研究.河海大学湖泊水文教研室,1997.

2.2.2 维持河网水体稀释自净功能的生态需水量

太湖流域河网稠密,受潮汐和闸坝人为控制的影响,水流流态顺逆不定,维持河网水体稀释自净功能的生态需水量量化研究比较复杂,主要是根据水环境容量的基本原理,以河流不同环境功能区划的水质目标为约束,进行反推而得。

由于太湖流域同一水体可能具有不同的功能区划,某一水体第 i 个功能区划河段水环境容量的计算公式为^[8]

$$W_i = Q_{0i}(C_{si} - C_{0i}) + K_i V_i C_{si} + q_i C_{si} \quad (3)$$

式中: C_{si} ——第 i 个功能区相应水质标准浓度; K_i ——第 i 个功能区水质降解系数; q_i, Q_{0i}, C_{0i} ——第 i 个功能区包括污水在内的旁侧入流流量、进口断面的入流流量和水质浓度。

考虑太湖流域河网系统河道中的水流方向不固定,故该地区的河道水环境容量按典型年最枯月正向流、反向流和流量为 0 时的水环境容量取平均,即

$$W = (W_{i1}d_1 + W_{i2}d_2 + W_{i3}d_3)/d \quad (4)$$

式中: W ——不定流河道水环境容量; W_{i1}, W_{i2}, W_{i3} ——第 i 个功能区河段正向流、反向流和流量为 0 时的河道环境容量; d_1, d_2, d_3 ——正向流、反向流和流量为 0 时在 1 个月内出现的天数; d ——最枯月的天数。

以典型枯水年 ($P = 90\%$) 太湖流域河网水量模型计算结果作为设计流量 Q_{0i} ,以《江苏省地面水域水功能(环境)类别划分》为依据,确定河流水质目标,取 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中的水质标准为 C_{si} ,用水量模型的输出作为多参数感潮河网水质模型的输入计算 C_{0i} ,污染源的概化以现状年污染物排放量作为标准,工业点源从排污口排入水体,农业面源在时间和空间上按河长均匀分配。

经上述计算,可以确定河网中任意功能区划河段的环境容量 W ,已知这一河段的污染物排放量 W_0 ,经环境规划分析,认为该河段必须接纳一定量(此量超过河段允许纳污量)污染物 W_p 时,可通过增加河段流量的方法,增加河段对污染物的稀释、自净能力,此时河段入口断面流量可反过来推求,即

$$Q_0 = \frac{W_p - K_i V_i C_{si} - q_i C_{si}}{C_{si} - C_i} \quad (5)$$

式中: W_p ——某河流第 i 河段必须接纳的污染物质; C_i —— i 河段入流断面的来水浓度; V_i ——第 i 河段的体积。

在求出同一条河流各个功能区段的 Q_0 后,如果第一河段的 Q_0 与区间来水量 q_i 之和大于第二河段的 Q_0 ,取第一河段的 Q_0 ,否则反之,依次递推下去,最后求出维持该河流稀释自净功能的生态需水量,进而求出维持全河网水体稀释自净功能的生态需水量。

2.2.3 防止海水入侵的河流最小需水量

长江口是典型的河口区,太湖流域东南部诸多河流与长江口相通或直接入海。对这些河流而言,必须设置一定的淡水河流流量,以控制海水入侵在最小的咸水界(一般为 0.2% 含盐度所在地点)内,达到维持淡水资源生态平衡的目的。

2.2.3.1 高度成层型河口

根据库列根在试验水槽中的观测结果,结合原型与模型的分界面和底部阻力的力学条件,得出了在掺混系数 $n > 0.7$ 的条件下盐水楔的长度表达式^[9],利用该公式计算在海水入侵距离为 L_0 的条件下河水的流速,即

$$\frac{L_0}{h} = 6.0 \left(\frac{V_h h}{\nu} \right)^{1/4} \left(\frac{2V_r}{V_h} \right)^{-5/2} \quad (6)$$

式中: ν ——运动黏滞系数; V_h ——流速因子, $V_h = \sqrt{(\Delta p / \rho_m)gh}$,其中 Δp 为海水密度与淡水密度的差, ρ_m 为海水密度与淡水密度的平均和; h ——水深; V_r ——入侵距离为 L_0 的横断面平均流速。

利用式(6)计算出 V_r ,则防止海水入侵所需维持的河流最小流量通过公式 $Q_p = V_r B h$ 计算,其中 B 为河流水面平均宽度。

2.2.3.2 缓混合型河口与强混合型河口

在强混合型河口,含盐度只有纵向变化而无垂直向及横向变化;在缓混合型河口,潮流强度足以引起在河口区的全部深度上的盐水与淡水的紊动混合并阻止大的含盐度变化。因此,对强混合型和缓混合型河口,

均采用感潮河流一维水量、水质数学模型计算盐水入侵问题.对于缓混合型及强混合型河口,防止海水入侵所需维持河道最小流量的具体计算步骤为:

a. 利用水量方程计算感潮河流各断面在各时刻下的水量、水位值,此时定解边界条件为

$$Z|_{x=L} = Z(L,t) \quad Q|_{x=0} = Q_d \tag{7}$$

式中: $Z(L,t)$ ——河口潮位站已知的设计潮位过程; L ——感潮河流的长度; Q_d ——感潮河流为 90% 保证率的设计流量,即为防止海水入侵的河流生态环境需水量,在计算时,可预先给定一个 Q_d .

b. 在各断面各时刻水量、水位已知的情况下,利用水质方程求出各断面各时刻的盐浓度,此时定解边界条件为

$$C|_{x=L} = C_0(L,t) \quad C|_{x=0} = C_d \tag{8}$$

式中: $C_0(L,t)$ ——河口盐浓度变化过程; C_d ——感潮河流不受潮汐影响的河水盐浓度.此两项为已知.

c. 按照步骤 a 和 b 不断试算,一直计算到某一个最小的设计流量 Q_d ,此时感潮河流距河口的距离小于 L 断面处的盐浓度等于不受海水入侵影响的河水盐浓度 C_d ,此时的 Q_d 即为所求的防止海水入侵的最小生态需水量.

2.2.4 补充水面蒸发、河道渗漏损失量的生态环境需水量

太湖流域河网密布,水面面积很大,水面蒸发是流域水体水量消耗的重要方式之一,为维持河流自身生态功能,应保证一部分水量,用于弥补水面蒸发的消耗.根据水面面积、降水量及水面蒸发量,可求得相应各月的蒸发生态需水量 W_E . 即当 $E > P$ 时, $W_E = A(E - P)$; 当 $E < P$ 时, $W_E = 0$.

对于河网地区的河流而言,河道常年有水,河床土壤含水率处于饱和状态,且地下水位高于河流的水位,因此一般不考虑河水渗漏补给地下水.

2.2.5 维持河流水盐平衡的生态需水量

对于太湖流域沿海地区河流,一方面由于枯水期海水透过海堤渗入地下水层,另一方面地表径流汇集了农田来水,使得河流中盐分浓度较高,可能不满足河流用水水质要求,甚至影响水生生物的生存,因此必须通过水资源的合理配置补充一定的淡水资源,以保证河流中具有一定的基流量或水体水位来维持水盐平衡.

计算方法与 2.2.2 类似,只是盐组分随水流运动不存在降解,反推公式为

$$Q_0 = \frac{S_i V - R_i - q_i S_{si}}{S_{si} - S_{0i}} \tag{9}$$

式中: R_i ——某河流第 i 功能区河段的盐容量; S_i ——稀释前第 i 功能区河段的盐浓度; S_{si} ——第 i 功能区水质标准盐浓度; S_{0i} ——入流断面来水的盐浓度;其他符号同前.

维持整条河流水盐平衡的生态需水量的确定方法同 2.2.3.

2.2.6 河流景观和水上娱乐环境需水量

此项生态需水的定量研究至今没有统一的计算方法和标准.笔者认为,对于以观赏和娱乐为主要功能的河流水体来说,只要河水能够达到相应的水质标准,河流景观与娱乐环境用水就已经优先满足;对于观赏和娱乐作为部分功能的河流水体而言,由于河流景观与娱乐环境用水的水质要求并不太高,所以水量大小将成为主要指标,可以采用人均水面面积定额来确定此项生态需水.在一定条件下,这部分用水也可能在满足其他功能目标的同时自动满足.

2.2.7 满足航运功能的需水量

黄永基等^[10]在研究中把此项需水分成天然河道和渠化河道(包括人工运河)通航用水两部分加以详细研究,这里不再讨论.

3 结 语

太湖平原河网系统是一个复杂的水生态环境系统,影响对其生态环境需水量定量化研究的因素很多,以下是笔者的几点考虑:

a. 研究维持河网稀释自净的生态环境需水量时,对所研究的河流要首先进行水环境现状评价以确定河流主要的污染控制因子,因不同的污染控制因子在水体中的降解规律不同,用河流主要污染因子反推出的河流生态环境需水量自然能够满足其他超标污染因子的需水要求.

b. 工业污染源排污口的位置及排放方式不同,维持河流稀释自净所需的水量必不同,因此要对环境规划分析后河流必须接纳的污染物质 W_p 在各个排污口之间进行优化分配,以确定最小的生态环境需水量. 对于面源,笔者采用的时空均化方法并不合理,因此要加强其机理性研究,以确定在不同时空组合下面源污染物质随降雨径流进入河网的量.

c. 太湖平原河网地区水利工程引排水调度频率较高,不同的引排水调度方式必定对河网的生态需水量产生影响.

d. 在计算防止海水入侵的最小生态需水量时,是否应采用盐分指标还需针对具体河流进行具体分析.

e. 笔者在以后的深入研究过程中,将对本文提出的计算方法的合理性及具体实现的可能性进行修正和补充,以期使得单纯地从水量角度定量确定平原河网系统生态环境需水量的方法更为完善.

参考文献:

- [1] 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—512.
- [2] 刘凌,董增川,崔广柏,等.内陆河流生态需水量定量研究[J].湖泊科学,2002,14(1):25—30.
- [3] 张丽,董增川,赵斌.干旱区天然植被生态需水量计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):745—748.
- [4] 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(Ⅰ)——理论[J].环境科学学报,2001,21(5):543—547.
- [5] 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(Ⅱ)——应用[J].环境科学学报,2001,21(5):548—552.
- [6] 卞戈亚,周明耀,朱春龙.南方地区河流系统生态需水量系统组成分析[J].水利与建筑工程学报,2003,1(4):18—21.
- [7] UBERTINI L,MANCIOLA P,CASADEI S. Evaluation of the minimum instream flow of the Tiber river basin[J]. Environmental Quality in Watersheds,1996,4(2):125—136.
- [8] 逢勇,程炜,赵玉萍.鹤地水库水官至石角段水环境容量研究[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(1):76—79.
- [9] 中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[Z].北京:中国环境科学出版社,1992.190—197.
- [10] 黄永基,马滇珍.区域水资源供需分析方法[M].南京:河海大学出版社,1990.124—128.

Composition of eco-environmental water demand of plain river network in Taihu Lake Basin and its calculation method

LI Da-yong, BIAN Ge-ya, DONG Zeng-chuan, LIU Ling

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources
and Hydraulic Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the geological location of the river basin and the characteristics of rivers, the connotation and composition of the eco-environmental water demand of the river network system were discussed from the angle of maintenance and protection of the basic function of the river network system. It is pointed out that the eco-environmental water demand is the volume of water to be stored and consumed for maintenance and improvement of the eco-structural and eco-environmental function of the river network system based on the reasonable development and efficient utilization of fresh water resources under the special temporal and spatial conditions. According to the concept, the calculation method for various types of eco-environmental water demand was studied, and the factors influencing the quantitative study were analyzed.

Key words: eco-environmental water demand; river network system; numerical model; Taihu Lake