

# 内陆河流生态环境需水量定量研究\*

刘 凌 董增川 崔广柏 郑孝宇

(河海大学水资源开发利用国家专业实验室,南京 210098)

**提 要** 在有限的水资源中,必须维持合理的生态环境需水量,以满足国民经济持续发展和生态平衡维护的需要.以内陆河流为对象,以生态学理论和水环境容量理论为基础,从维持河流系统水生生物生存、维持水体一定量稀释自净能力以及防止河流水面净蒸发损失的角度出发,分析计算了河流系统的生态环境需水量,以期水资源合理配置提供科学依据.

**关键词** 生态环境需水量 内陆河流 分析计算

**分类号** X171

生态环境是人类赖以生存和发展的空间,水资源是生态环境建设中最重要、不可替代的物质<sup>[1]</sup>.随着我国国民经济的快速发展,水资源供需矛盾日益尖锐,如何能在有限的水资源中,维持合理的生态环境需水量,以满足国民经济持续发展、水资源永续利用以及生态平衡维护的需要,这是当前亟待解决的薄弱环节和关键问题.

从广义上讲,所谓生态环境需水量,是指维持全球生物地理生态系统水分平衡所需要的水量.由于工业化、城市化进程对水的竞争使用,造成城市用水和工业用水挤占农业用水,农业用水又挤占生态环境用水的格局,造成自然植被衰退、森林草原退化、河湖萎缩、土地沙化、水土流失、灌区次生盐渍化、地表地下水体污染、河床淤积以及地下水大面积超采等严重的生态后果.因此,要保护生态环境,合理利用有限的水资源,实现国民经济的可持续发展,首先必须科学研究生态环境需水量问题,以实现水资源的科学配置和有效管理,维护生态平衡.

按照地理学的定义,河流是由河槽和河槽中足够流动的水构成.水是维持河流环境生态平衡的基础.对内陆河流来说,其主要的生态环境功能包括水生生物生存、纳污能力、河流沿程的蒸发与渗漏、润湿空气和补充土壤含水量等.对河流生态环境需水量的研究,一直以来是薄弱环节,目前基本采用定性估算的办法来确定生态需水量,定量研究还很缺乏<sup>[2-3]</sup>,主要原因是影响因素太多、体系复杂,并且与人类社会活动密切相关,至今还缺乏统一的方法与标准,缺乏定量模式.本文的研究,是针对内陆河流,从维持河流系统水生生物生存、维持水体一定量稀释自净能力、满足水面蒸发损失需要的角度,探讨并分析计算生态环境需水量,以期水资源的合理配置提供科学依据.

## 1 研究方法

### 1.1 维持河流系统水生生物生存的最小生态环境需水量

水域生态系统中水生生物可分为生产者、消费者和分解者三类,当水域生态系统受到外界

\* 教育部优秀年轻教师基金资助项目和江苏省自然科学基金资助项目(BK97152).

收稿日期 2001-07-05 收到修改稿日期 2001-08-28. 刘凌,女,1964年生,博士,副教授.

强烈干扰时,会引起生态平衡失调,当干扰还不甚巨大时,如水量减少、水质轻度污染,将首先造成生态系统二级结构变化,包括物种数量比例改变、种群数量丰度变化、群落垂直分层结构减少等,这些变化又会直接造成营养关系的破坏,包括分解者种群结构的改变,进而引起生态系统功能受阻或功能下降;当外部干扰进一步加剧,如水量严重缺少,水体污染严重时,将会引起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,生态系统发生剧烈变化,进而造成系统的崩溃。因此,对水域生态系统来说,为保持系统的生态平衡,必须维持一部分有质量保证的水量,以满足水生生物的正常生存的需要。

一般情况下,河流在从源头流向河口的过程中,都是随着汇流面积的扩大而水量见增。如果把河道水量表示成河流汇水面积或河流长度的函数,则水量是汇水面积或河长的单调递增函数或阶跃增函数。假定设定了一个河流生态需水流量  $Q_E$ ,只要它是合理的、存在的(在数学上表示有解,在实际中表示在一定保证率下河流或河段存在这样的流量),则必定能沿着河流从源头找到一个对应的断面  $K$ ,且  $K$  断面以下的河道水量  $Q$  一般总能满足要求:  $Q \geq Q_E$ ,也就是说,只要在河流某一个断面计算生态需水量之后,其下游同一功能的河道流量一般总能满足河道生态功能的流量要求。

根据此河流特征,再结合生态学理论,可知:要计算维持河流水生生物生存的最小生态需水量,可通过调查分析水体水生生物产量与水体水量之间关系,建立河流上游某一断面的生态需水量的设计流量标准,以此作为维持河流水生生物生存的最小生态需水量,在其下游同一功能的河段必将能满足环境生态功能的要求。

据调查研究<sup>[4]</sup>,河流水体水生生物产量与水体水量之间关系如下:

(1)河道内径流为 50% 保证率河道流量的 60%(即 40% 为河道外耗水),这是为大多数水生生物在主要生长期提供优良至极好的栖息条件所推荐的基本径流量。

在这种流量条件下,河宽、水深及流速将为水生生物提供优良的生长环境,大部分河道,包括许多急流浅滩区将被淹没,通常可输水的边槽也出现水流,大部分河岸滩地将成为鱼类所能游及的地带,也将成为野生动物安全的穴居区,大部分旋涡、急流和浅滩将适中地没于水中,提供鱼类优良的繁殖和生长环境。岸边植物将有充裕的水量,在任何浅滩区,鱼类的回游将不成问题。无脊椎动物种类繁多,数量丰富。预计在任何河段中,水温将不再是约束鱼类活动的条件。河流及天然景色极好。

(2)河道内径流为 50% 保证率河道流量的 30%(即 70% 为河道外耗水),这是保持大多数水生动物有良好的栖息条件所推荐的基本径流量。

在这种流量条件下,河宽、水深及流速一般令人满意。除极宽浅滩外,大部分河道将没于水中,大部分边槽将有水流。许多河岸将成为鱼类的活动区,也可成为野生动物穴居的场所。河流的许多聚流和大部分旋涡区的深度将足以作为鱼类的活动场所。大鱼可通过急流浅滩区和河段的大部分区域,水温预计不会成为鱼类活动的约束条件。无脊椎动物将有所减少,但预计不会成为捕鱼量减少的控制因素。河流及天然景色基本令人满意。

(3)河道内径流为 50% 保证率河道流量的 10%(即 90% 为河道外耗水),是保持大多数水生生物短时间生存所推荐的最低瞬时径流量。

在这种流量条件下,河宽、水深和流速将显著减少,水生生态环境恶化,河道或正常湿周近

一半露出水面,宽浅滩露出部分将会更多,边槽将大部分或全部干涸,卵石、沙坝也基本干涸无水,作为鱼类及皮毛动物的岸边穴居场所将显著消失,许多正常的湿润区水深将变浅,以至鱼类不能在此活动而一般只能集中于最深的水坑中,岸边植物将会缺水,大鱼遇到浅滩处将有困难回游到上游,水温常常是一个约束因素,尤其是在七、八月的下游河段,无脊椎动物将大大减少,天然河流景色将被严重破坏。

根据以上关系可知,要维持河流大部分水生生物基本、良好的生存条件,所需的最小生态环境需水量,可定为河流上游某断面 50% 保证率的年平均流量的 30%,此为河流满足水生生物生存的设计流量标准。

若对于较大的河流,或沿程水量、水功能差异悬殊的河流,或某些下游水量小于上游水量的内陆河流,则可以此标准分段设定最小生态需水量。

## 1.2 保持水体一定量稀释净化能力的基流(水)

水体易受到污染,水环境质量下降将对生态系统造成严重的影响和破坏<sup>51</sup>,水体对污染物质具有一定稀释、净化能力,它通过一系列物理、化学和生物作用,使污染物浓度逐渐降低,使水质恢复到原来状态,保持水域生态平衡,这称为水环境容量,水环境容量的大小,与水体水量以及水体对污染物的降解能力有关,水量越大、对污染物降解能力越强,则水环境容量也越大,从保护生态环境、维护水域生态平衡的角度出发,对接纳污染物质的水体,维持一部分生态需水量,以满足水体对污染物质一定量稀释净化能力的需要,这是生态环境需水量的重要组成部分。

对许多河流来说,不要求污染源的排放量跟随水量的变化而变化,因此可采用稳态水质模型,计算设计流量下的环境容量,河流污染物一维迁移转化的质量守恒方程为:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(QC) = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(E_x A \frac{\partial C}{\partial x}) \pm \sum w \quad (1)$$

上式中, $A$  为断面面积( $m^2$ ), $C$  为污染物的断面平均浓度( $mg/L$ ); $Q$  为断面平均流量( $m^3/s$ ); $E_x$  为纵向分散系数( $cm^2/s$ ); $w$  为河流中污染物的源与汇( $mg/(L \cdot s)$ ); $x$  为空间坐标( $m$ )。

方程(1)中的源漏项,如果只考虑有机污染物在河流中的生物降解反应,可得:

$$\sum w = -KC \quad (2)$$

上式中, $K$  为有机污染物在河流中的降解系数( $1/d$ )。

对一般中小型内陆河河段,当污水排入河段后,污染物的浓度在横断面上可很快达到混合均匀,此时纵向弥散作用可以忽略不计,方程(1)改写成:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = -KC \quad (3)$$

上式中, $u$  为断面平均流速( $m/s$ )。

对于河网化河段和潮汐河段,因地形、水位等原因,水流往往会出现停止或流速非常缓慢,污染物排入水体后,由于稀释混合作用不太强烈,其浓度在横断面上分布不均匀,断面上各点流速也不完全一致,此时应考虑纵向弥散作用的影响,方程(1)写成:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC \quad (4)$$

方程(3)和(4)的边界条件为: $C|_{x=0} = C_0$ , $C_0$  为上游来水污染物浓度( $mg/L$ )。

解方程(3)和(4),得一般内陆河河段的解如方程(5)所示,潮汐河段和河网化河段的解如方程(6)所示.

$$C = C_0 \exp\left[-\frac{Kx}{u}\right] \quad (5)$$

$$C = C_0 \exp\left[-\frac{u}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4KE_x/u^2}\right)x\right] \quad (6)$$

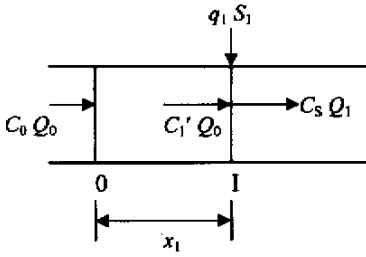


图 1 河段污染源排污示意图

Fig. 1 Pollution source scheme in river section

考虑河流污染源排放污染物的情况如图 1 所示,河流可被概化为多个河段,以河流的每一个排污口为河段分界线,在河流起始断面处,上游来水污染物浓度为  $C_0$ ,河流流量为  $Q_0$ ,在距起始断面 ( $x=0$ )  $x_1$  距离处,是河流的第一个排污口,此河段为河流的第一个河段,以  $I$  表示,假设第一个排污口排入河流的污染物浓度为  $S_1$ ,污水量为  $q_1$ ,在第  $I$  断面混合后,从此断面流出的污染物浓度必须满足水质标准  $C_s$ ,流出的流量为  $Q_1$ .

对于一般内陆河河段,有:

$$C_1 = C_0 \exp\left[-\frac{Kx_1}{u}\right] \quad (7)$$

在第  $I$  断面处,根据质量守恒定律,有:

$$W_1 = (Q_0 + q_1)C_s - Q_0 C_0 \exp\left(-\frac{Kx_1}{u}\right) \quad (8)$$

$W_1$  即为河流第  $I$  河段允许排入的污染物的量,河流其余河段的允许纳污量可依次计算.

对于潮汐河段和河网化河段,根据公式(6),可得:

$$W_1 = (Q_0 + q_1)C_s - Q_0 C_0 \exp\left[-\frac{u}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4KE_x/u^2}\right)x_1\right] \quad (9)$$

对整个河流,总允许纳污量  $W$  等于各河段允许纳污量  $W_i$  之和.

对河流来说,当计算所得允许纳污量  $W$  小于河段实际纳污量时,为了使河段水质达到要求的水质标准,有两种解决方法:一是削减污染源的排污量;二是在经过环境规划分析,认为河流必须接纳一定量污染物(此量超过允许纳污量)的情况下,可通过增加河流流量的方法,增加河流对污染物的稀释、自净能力,此时河流所需的流量  $Q_0$ ,即为维持河流一定量稀释净化能力的生态环境需水量.各河段  $Q_0$  的大小,可通过方程(8)和(9)反求,一般内陆河段如方程(10)所示,潮汐河段和河网化河段如方程(11)所示.

$$Q_0 = \frac{W_p - q_1 C_s}{C_s - C_0 \exp\left(-\frac{Kx_1}{u}\right)} \quad (10)$$

$$Q_0 = \frac{W_p - q_1 C_s}{C_s - C_0 \exp\left[-\frac{u}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4KE_x/u^2}\right)x_1\right]} \quad (11)$$

上两式中,  $W_p$  为河段必须接纳的最小排污量 ( $\text{mg/s}$ ).

求出河段  $Q_0$  后 ,再对整个河流做迭代计算 ,得到河流所需的最小生态环境需水量.

### 1.3 防止河流蒸发、渗漏的生态需水量

对于大面积水体来说 ,水面蒸发是水量消耗的重要方式之一 ,如果水体得不到足够的水量补充 ,会使河流水位逐渐下降 ,湖泊逐年退化 ,丧失其应有的功能 ,生态环境将遭到严重破坏 .因此为维持河流自身生态功能 ,应维持一部分水量 ,用于弥补水面蒸发的消耗 .

对于此部分生态环境需水量的确定 ,应首先调查、测量水面面积 ,分析典型年的逐日水面水份蒸发深度 ,计算水体的蒸发水量 ,再扣除降雨量后 ,即为该水体的净蒸发水量 ,此为河流生态需水量的一部分 .表示如下 :

$$V_e = H \cdot A - P \tag{12}$$

式中 , $V_e$  为计算时段内水体的净蒸发损失量( $m^3$ ) ; $H$  为计算时段内水面蒸发深度( $m$ ) ; $A$  为计算时段内水体平均蓄水水面面积( $m^2$ ) ; $P$  为计算时段内降雨量( $m$ ) .

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 .但对于常年有水的河道来说 ,河床含水率一般是饱和的 ,因此其渗流损失可忽略 .

### 1.4 河流总生态需水量

对于内陆河流 ,在计算每条河流总的生态环境需水量时 ,应将计算的“维持水生生物生存的需水量”与“维持水体一定量稀释净化能力的需水量”相比较 ,因这二者可以共用 ,所以取较大者 ,再加上所计算的“防止河流蒸发、渗漏的需水量” ,即可得该河流总的生态环境需水量 .这样的河流可同时满足维持以上三方面生态功能的要求 .

## 2 计算示例

以北京市妫水河为例 ,计算生态需水量 .妫水河属永定河水系 ,全长 18.5km ,起始断面为黑汉岭 ,终止断面为官厅水库 ,主要功能为饮用水源、景观和农业灌溉 .

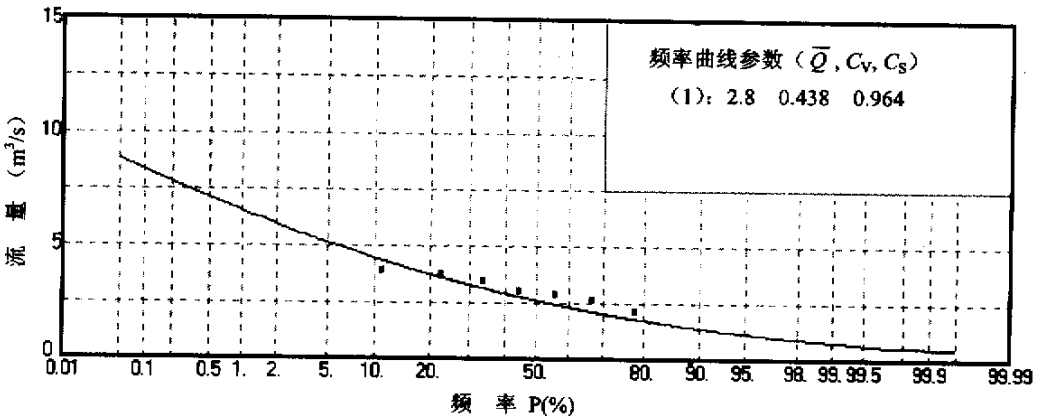


图 2 妫水河年平均流量频率曲线

Fig.2 Annual flow rate probability curve in Guishui River

首先计算满足河流水生生物生存的最小需水量 .位于妫水河中游的水文站是延庆东大桥站 (上游无水文站 ,因河流水量条件变化不大 ,此站可代替) 根据多年实测流量资料 ,点绘经验

频率点,如图 2 中“·”所示,计算得出:多年平均流量  $\bar{Q} = 2.80\text{m}^3/\text{s}$ ,  $C_o$  为 0.438,取  $C_s$  为 0.964. 根据统计参数绘制理论频率曲线,如图 2 中实线所示,由于  $P > 20\%$  部分适线良好,故不再进一步调整. 根据频率曲线,得出 50% 保证率的河历年平均流量为  $2.62\text{m}^3/\text{s}$ ,因此,维持妫水河水生生物生存所需的最小生态环境需水量为 50% 保证率的河历年平均流量的 30%,即  $0.786\text{m}^3/\text{s}$ ,年均需水量为  $2479 \times 10^4\text{t}$ .

其次计算维持妫水河一定量稀释自净能力所需的最小生态环境需水量:

表 1 妫水河沿河排污口排污情况

Tab. 1 Pollution source situation in Guishui River

排污口	排污口所在地	污水量 ( $\times 10^4\text{t/a}$ )	COD <sub>Cr</sub> 排放量 ( $\text{t/a}$ )
1	永宁镇新华营村	6.31	0.246
2	延庆县城东	5.91	0.621
3	延庆县城东	7.88	1.75
4	延庆县城南	5.91	2.96
5	延庆县城南	11.83	5.78
6	延庆镇莲花池西	5.26	2.53
7	延庆镇民主村东北	39.42	10.49
8	延庆至康庄桥西	157.68	62.28
9	延庆镇东屯入河口	295.65	62.97
合计		535.85	149.63

妫水河水质现状为Ⅳ级,水质目标为Ⅱ级,河流全长 18.5km,90% 保证率的最枯月平均流量为  $0.024\text{m}^3/\text{s}$ ,平均断面面积为  $5.05\text{m}^2$ ,沿河共有 9 个排污口,排污情况如表 1 所示,COD<sub>Cr</sub> 在河流中的降解系数为  $0.1\text{d}^{-1}$ . 通过计算,得出妫水河在现状水流条件下 COD<sub>Cr</sub> 的允许纳污量为  $45\text{t/a}$ ,而河流各排污口的现状排污总量为  $149.6\text{t/a}$ ,因此应削减 COD<sub>Cr</sub> 排污量  $104.6\text{t/a}$ . 经过环境规划分析,认为该河流必须接纳 50% 的现状排污量,即  $74.8\text{t/a}$ ,因此,以  $74.8\text{t/a}$  作为该河流的最大允许纳污量,在满足Ⅱ

级水质标准的条件下,河流必须具备的最小基流量为  $0.19\text{m}^3/\text{s}$ ,即年需水量为  $599 \times 10^4\text{t}$ ,此为维持妫水河一定量稀释自净能力的生态环境需水量.

第三,计算妫水河净蒸发水量,为  $25.5 \times 10^4\text{t/a}$ . 第四,计算妫水河总生态需水量. 因为第一部分需水量为  $2479 \times 10^4\text{t/a}$ ,第二部分需水量为  $599 \times 10^4\text{t/a}$ ,取较大者为  $2479 \times 10^4\text{t/a}$ ,再加上第三部分需水量为  $25.5 \times 10^4\text{t/a}$ ,所以妫水河总生态需水量为  $2504.5 \times 10^4\text{t/a}$ .

## 参 考 文 献

- 1 金 岚. 环境生态学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 50 - 55
- 2 刘 江. 全国生态环境建设规划. 北京: 中华工商联合出版社, 1999. 21 - 36
- 3 谢新民, 杨小柳. 半干旱半湿润地区枯水季水资源实时预测理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. 227 - 229
- 4 黄永基, 马 珍. 区域水资源供需分析方法. 南京: 河海大学出版社, 1990. 119 - 145
- 5 杨士弘. 城市生态环境学. 北京: 科学出版社, 1996. 91 - 109

## Quantitative Study on Ecological Water Demand in Continental Rivers

LIU Ling    DONG Zengchuan    CUI Guangbai    ZHENG Xiaoyu

(*Water Resources Development and Utilization Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

### Abstract

The water resources are the important and limited source in the world, it is necessary to allocate a certain amount of ecological water demand for sustainable developmental river. Based on the ecology and water environmental capacity theories, the ecological water demand of continental river system is analyzed and calculated in this paper from three aspects, i. e., the water demand for maintenance of aquatic living life survival, the water demand for the maintenance of natural dilution and purification of water body and the water demand to cover the net evaporation deficiency. It is noteworthy that this study will be beneficial for water resources proper allocation in progress. Finally, as an example, the ecological water demand in Guishui River, Yongding River Basin, Beijing is calculated.

**Key Words** Ecological water demand, continental rivers

### 《中国晚第四纪湖泊演化与古气候动力学》出版

由中国科学院南京地理与湖泊研究所于革研究员等撰写的《古气候动力学与中国古湖泊数据库——重建晚第四纪古气候古水文》一书日前由气象出版社出版。该书介绍了古湖泊数据库和古气候模拟基本理论、方法和最新研究成果。全书共分十章,内容包括(1)国内外古气候动力学研究现状和有关基本问题(2)古湖泊数据库建立的基本原理和方法,以及中国第四纪湖泊数据库基本内容和成果(3)水热平衡模式和古降水量估算(4)全球大气环流模式、模式运行和控制试验(5)21kaBP和6kaBP古气候模拟试验和结果分析(6)区域大气环流模式和对21kaBP气候模拟(7)古气候模拟结果与地质资料以及与国际模式结果的对比;以及(8)古气候动力学有关问题讨论。该书可供气候学、古气候学、第四纪地质学等方面的专业人员、研究生参考。

该书的问世,标志着我国湖泊沉积与全球变化研究进入了新的阶段。该书归纳和总结了以往我国湖泊沉积研究成果,并按国际标准逐一标定,剔除那些湖泊流域限制的局部信息和非气候信号,汇集成库,成为国际古湖泊数据库的组成部分,供国际享用。选择了晚第四纪的典型时段,进行古气候模拟,并运用区域湖泊水位资料,对模拟结果进行比较与验证,依据大气环流格局与水汽输送途径,对不同区域气候特点进行了动力学的阐释,在全球气候模拟过程中考虑了陆面过程的影响,强迫输入我国古植被状况,提高了模拟的水平,揭示出我国古气候区域变化的特点与规律。在我国古气候模拟研究方面紧密与国际接轨,迈出了坚实的一步。近年来,人类活动与气候变化驱动的湖泊环境变化成为国际研究的新热点,为未来气候预测服务的气候模拟,其研究的时间尺度不断向人类历史时期靠拢,这预示着高分辨率高精度的湖泊数据库的建立,在未来全球环境研究中有璀璨的前景。(李)