基于盲数理论的水库生态需水量化分析

杨 军[1],于苏俊[2]

(西南交通大学环境科学与工程学院,四川 成都 610031)

摘要:在界定水库生态需水的概念及内涵后,运用盲数理论对水库生态需水进行量化研究,并在双溪水库得到验证和应用。双溪水库枯水期最小生态需水量为 1 626.4 万 m^3,对应生态水位为 369.6 m,总可信度为 90.2%;枯水期近 10%的低于生态水位调水有使生态有逆向演替倾向。枯水期、平水期双溪水库生态系统处于半稳定状态,丰水期库岸生态处于正常状态,呈顺向演替。

关键词:水库生态系统;水库生态需水;盲数理论;可信度;双溪水库

中图分类号:P343.3 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2008)06-0036-04

Quantitative analysis of ecological water requirement for reservoirs based on blind number theory

YANG Jun, YU Su-jun

(*School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*)

Abstract: Based on the introduction of the concept and meaning of ecological water requirement (EWR) for reservoirs, the blind number theory was applied to calculate the EWR for the Shuangxi Reservoir. The minimum EWR of the Shuangxi Reservoir ecosystem is 16.264 million m^3 with a reliability of 90.2%, corresponding to an ecological water level of 369.6 m. About ten percent of water diversion projects lower than the minimum EWR during dry seasons enables the tendency of retrogressive succession. The ecosystem of the Shuangxi Reservoir is in a quasi-steady state during dry seasons and normal seasons, and is in a steady state and progressive succession during flood seasons.

Key words: reservoir ecosystem; ecological water requirement for reservoir; blind number theory; reliability; the Shuangxi Reservoir

目前,国内外对生态需水的研究,主要集中在流域、河道、湿地、天然湖泊等区域,对人工湖泊即水库生态需水的研究很少,计算模型上多采用确定性模型[1],运用不确定性模型的少。本文主要运用盲数理论来研究水库生态系统类型。

水库是为满足人类需要,在原有水系的谷地等负地形采用人工堤坝拦截汇入水,形成的一种具有特殊功能的人工和自然相结合的贮水水体。按生态系统定义,生态系统就是在一定空间中共同栖居着的所有生物与其环境之间不断地进行物质循环,能量和信息流动过程而形成的统一整体[2]。水库生态系统是由水库的水体、库岸消落带等空间内的生物和非生物的基本组分及其相互作用构成的,主要包括水体生态系统和库岸陆地生态系统。

水库集城市供水,农田灌溉,防洪,发电和文化等多功能于一体,其水位季令性变化较大[3],随着水库营运调水,在库岸形成周期性变化的水陆交错地带——消落带(与水库有直接水力联系,依靠地下水势生长的植被地带)。消落带存在较大生物量,它是水库生态系统的重要内容之一。水库建成蓄水后,一方面有利于部分水生生物繁衍生息,其种类和数量会大幅度增加;另一方面,由于库区的水位变动与自然节律相反,造成水库库区消落带植物难以生存现象[4],同时由于下游河道河水流量变化,或缺水或反自然节

作者简介:杨军(1970—),男,四川仪陇人,硕士研究生,主要从事环境规划、评价与管理方面的研究。E-mail:yangjun0923@126.com

律,往往造成下游河道生态退化。因此,水库生态需水包括以植被为主体的生态需水和鱼类为主体的生态需水,以及维持水库下游一定河段生态需水。

1 水库生态需水量

基于上述概念,可以认为水库最小生态需水量是指一定时期内最大限度防止库区自然生态不退化所需的一定质量的水量,主要包括生物栖息地最小需水量(水生生物、库岸林地)、蒸发渗漏最小需水量(水面、库岸土壤植被、地下水)、防止库水盐化最小需水量、航运最小需水量以及维持水库下游一定河段生态需水量。从生态水文学水分平衡原理[5]角度来分析,水库生态需水量可用函数来表示:

$$W = f(V_0, V_p, V_{rs}, V_{ev}, V'_{rs}, \Delta V_g, q, a) \quad (1)$$

式中:W 为时段内的水库生态需水量,m^3;V_0 为时段前水库蓄水量,m^3;V_p 为时段内库面上的降水量,m^3;V_{rs}为时段内进入水库的地表径流量,m^3;V_{ev}为时段内库面蒸发及库岸植被、土壤蒸腾散发水量,m^3;V'_{rs}为时段内流出水库的地表径流量(应不小于下游河道的生态需水量),m^3;ΔV_g 为时段内流出与进入水库的地下径流量矢量和即渗漏量,m^3;q 为时段内国民经济各部门的用水量,m^3;a 为修正常数,m^3。

由于水库经过多年的运行,其结构、功能以及能量输入、输出上已趋于稳定,水库生态系统已基本达到一种动态平衡。由此,水库的生态需水量与水位(水深)、水库生态系统的面积具有明显的相关性。根据多年生态的环境适应性,从现状的稳定角度看,某时段水库适宜生态需水量可通过水库多年该时段平均水位及其面积来确定。水位的变化调整着库周湿地范围,影响旱地、湿地的生物生存繁殖,特别是植被生态,因而,在供水管理中最重要的内容就是确定水库的最低生态水位,最低生态水位确定之后,才能对水库的可利用水量进行合理分配,如城市供水、农田灌溉、发电用水等。

从水库的基本特征即水文特征、理化特征、沉积特征以及生物特征等出发,某时段最低生态水位法计算公式:

$$V_{min} = KS(H_{min} - H_0) \quad (2)$$

式中:V_{min}为时段内的水库最小生态需水量,m^3;H_{min}为时段内的水库最低生态水位,m;H_0 为湖底高程,m;S 为水库水面面积,m^2;K 为库岸系数(无量纲)。

用公式(2)计算水库最小生态需水量,关键是确定库岸系数 K 和水库最低生态水位 H_{min}。库岸系数是表明水库形状规则以及反映库岸植被种类及其生长情况的系数,它的确定可借用湖岸系数的确定方法。有两种方法确定 K:①专家判断法;②湖底平均坡度法,即以湖底平均坡度来近似地作为湖岸系数。

$$K = \mathrm{tg}\alpha = (0.5l_0 + l_1 + l_2 + \cdots + 0.5l_n)\, h / S_0 \quad (3)$$

式中:K 为库岸系数;l_0 为岸线的长度;$l_1, l_2, \cdots, l_n$ 为各等深线长;h 为等深线高差;S_0 为水库表面积;α 为库底平均倾斜角。

在确定性模型计算中,以水文年月(年)平均水位 H 作为水库最低生态水位,因没有考虑生物的细节而计算的结果可能与客观情况有一定差别。为了使得成果更加符合实际情况,故用权重 μ 来进行调整,即 $H_{min} = \mu H$。μ 反映的是水文年月(年)平均水位与最低生态水位的接近程度。有两种方法计算 μ:①专家判断法;②根据水文年水库生态系统健康等级来估算。对于湖泊生态系统健康等级的研究,可参考文献[6]。

在采用盲处理确定性模型的计算中,平均水位 H 在一系列灰区间变化,每个 H_i 都与一个可信度值相对应,反映 H 与生态水位的接近程度的权重 μ 不必再设置,它的变化由 H 的变化及可信度来体现。由此,公式(2)又可表示为

$$V_{min} = KS(H - H_0) \quad (4)$$

2 计算模型的盲数化处理

由于水文、水质和水力条件等状态因素的时空不均匀性,必然导致随机性、模糊性、灰性或兼而有之,再加之人的行为因素而产生的主观的、认识上的不确知性[7],决定了水库生态系统是一个不确定性的混合体;多种不确定性体现信息的混沌,在信息混沌类中凡具有随机性、模糊性、灰性、未确知性中两种或两种以上的不确定信息称为盲信息。盲数就是表达和处理盲信息的数学工具。作为一个开放的大系统,水库生态系统中相关的水库水面面积、入湖径流量、出湖径流量、降水量、蒸散发量、水位水深、等深线、湖岸线等参量,以及水生生物量和陆生生物量等参量,受理论研究和实际监测(或观测)资料所限,这些信息都在不确定性,使得人们对水库生态系统的认识也是不确知的。对此,可运用盲数理论对水库系统进行综合研究,并确定风险的度量。

在水库生态需水计算模型公式 2、3、4 中,水库水面积 S、平均水位 H、岸线的长度 l 等参量值都是在一系列灰区间 a_i 内变化的。这里,假设 $G(I)$ 是由 a_i 构成的区间型灰数集合,若每个 a_i 都与一个可信度值 α_i 对应($\alpha_i \in [0,1]$),参照盲数定义[7-8],可以将水库生态系统的上述各参量表示为如下形式

$$f(x)=\begin{cases}\alpha_i & x=a_i(i=1,2,\cdots,n)\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$f(x)$为定义在 $G(I)$上的灰函数，称为水库生态系统参量盲数，简要表示为 $\{[a_1,a_n],f(x)\}$。

盲数的均值为：

$$Ef(x)=\begin{cases}\alpha, & x=\dfrac{1}{\alpha}\left(\Theta\sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i\right)\quad(i=1,2,\cdots,n)\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

式中：a,b 为实数且 $a<b$，$\frac{1}{2}(a+b)$称为有理灰数 $[a,b]$的心，记为 $\Theta[a,b]=\frac{1}{2}(a+b)$；$Ef(x)$体现了盲数 $f(x)$的平均取值，它的直观意义是盲数 $f(x)$的均值为$\frac{1}{\alpha}\left(\Theta\sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i\right)$的可信度是$\alpha$。

根据式(6)定义，可以将水库水面面积 S、平均水位 H 等参量盲数分别表示为

$$S=\{[S_1,S_m],f_1(S)\}$$
$$H=\{[H_1,H_n],f_2(H)\} \tag{7}$$

为简化计算，此处将 S_0、l_0 视为常数，K 由正常蓄水位计算得到。若将式(7)代入式(4)中，得到一个包含参量盲数的水库生态需水量计算模型，即

$$V_{\min}=k\otimes\{[S_1,S_m],f_1(S)\}\otimes(\{[H_1,H_2],f_2(H)\}-H_0) \tag{8}$$

式中：$\otimes$表示盲数乘法运算。

式(8)为盲信息下水库水库生态需水量计算模型。根据该模型不仅可以得到水库生态需水量的各种可能取值区间，也可以得到各区间相应的可信度分布。

3 实 例

双溪水库建于 1993 年，位于四川省荣县县城北部 1.5 km，是集中式生活饮用水地表水水源地一级保护区，水质基本符合地表水Ⅱ类水环境质量标准。库底高程为 343.4 m，水面东西长 1.5 km，南北宽 1.2 km，呈心形，南面为大坝，水面面积 220 万 m^3，正常蓄水高程 391.6 m，正常库容 5500 万 m^3，最枯库容 1120 万 m^3，相应水面面积 115 万 m^3，湖岸系数 K 为 0.51708，多年平均径流量 4326 万 m^3。2006 年 12 月库区生态环境指标为：水质良好；鱼类主要有花鲢、白鲢、草鱼、鲤鱼等；有野鸭迁徙，水生维管束植物尚未发现；消落带植被以耐湿、草本植物组成为特点，高程 374.5 m 以下仅见零星草苗，374.5 m 以上逐渐有稀疏枯黄草被，383 m 以上东面有较成片草被和零星灌丛，西面、北面草被稀疏枯黄，高程 387 m 以上有成片人工林分布。根据水库多年的运行资料统计，枯水期、平水期、丰水期 3 期水位、水面面积情况见表 1。

表 1 双溪水库枯平丰 3 期水位及水面积统计

参数	枯 期	平 期	丰 期
水位 H/m	362.18 ~ 374.12	374.12 ~ 382.63	382.63 ~ 391.6
水面面积 S/万 m^2	115.0 ~ 128.3	128.3 ~ 166.1	166.1 ~ 220.0

根据数据分布情况划分若干小区间，以各小区间内数据出现的频率(即占总数百分比)作为该区间可信度水平，则可得到盲数形式的参量信息，即

a. 枯水期：

$$f_1(S)=\begin{cases}0.10, & S=[115.0,119.2]\\ 0.65, & S=[120.2,122.9]\\ 0.20, & S=[127.2,128.3]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$f_2(H)=\begin{cases}0.10, & H=[362.18,369.52]\\ 0.65, & H=[371.29,373.02]\\ 0.20, & H=[373.86,374.12]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

b. 平水期：

$$f_1(S)=\begin{cases}0.15, & S=[128.3,137.1]\\ 0.68, & S=[147.2,159.3]\\ 0.12, & S=[161.0,166.1]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$f_2(H)=\begin{cases}0.15, & H=[374.12,377.23]\\ 0.68, & H=[378.48,380.24]\\ 0.12, & H=[380.31,382.63]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

c. 丰水期：

$$f_1(S)=\begin{cases}0.48, & S=[166.1,176.1]\\ 0.30, & S=[187.5,204.6]\\ 0.10, & S=[210.0,212.5]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$f_2(H)=\begin{cases}0.48, & H=[382.63,383.89]\\ 0.30, & H=[385.40,386.32]\\ 0.10, & H=[387.62,388.55]\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

将枯水期的水文资料代入式(8)中，由盲数基本运算性质，可以计算得到枯水期水库生态需水量及可信度，分别见表 2、表 3。

表 2 枯水期水库 S、H 可能值带边积矩阵

115.0	119.2	1137.2	1581.9	1689.0	1793.9	1844.8	1860.5
120.2	122.9	1180.3	1641.8	1753.0	1861.8	1914.6	1931.0
127.2	128.3	1239.9	1724.7	1841.5	1955.9	2011.3	2028.5
·		362.18	369.52	371.29	373.02	373.86	374.12

表 3　枯水期水库 S、H 可信度带边积矩阵

0.10	0.01	0.065	0.02
0.65	0.065	0.4225	0.13
0.20	0.02	0.13	0.04
·	0.10	0.65	0.20

类似可得到平水期和丰水期的水库生态需水量及可信度。对各期生态需水量 $V_{\min}$的各区间灰数取心,则可将盲数 $V_{\min}$及对应的可信度转变为未确知有理数的可能值。对未确知有理数可能值中各元素按照由小到大的顺序排列,见表 4。

表 4　双溪水库枯水、平水、丰水 3 期生态需水量及可信度

枯水期		平水期		丰水期	
可能值	可信度	可能值	可信度	可能值	可信度
1359.5	0.01	2214.1	0.0225	3526.6	0.2304
1411.0	0.065	2467.2	0.102	3756.3	0.144
1482.5	0.02	2490.8	0.102	3953.0	0.048
1741.4	0.065	2611.8	0.018	4041.4	0.144
1807.4	0.4225	2729.3	0.018	4304.6	0.090
1852.6	0.02	2775.5	0.4624	4354.9	0.048
1898.7	0.13	2938.2	0.0816	4530.0	0.030
1922.8	0.13	3041.3	0.0816	4638.5	0.030
2019.9	0.04	3219.6	0.0144	4881.4	0.010

注:带下划线的数字表示最大可信度及对应可能值。

由盲数均值定义可求得水库多年生态平衡状态下,各期最小生态需水量均值 $V_{i\min}$及总可信度为:

$Ef(V_{枯})$ = 1626.4 万 m^3,总可信度为 0.902,对应生态水位为 369.6 m;

$Ef(V_{平})$ = 2469.3 万 m^3,总可信度为 0.902,对应生态水位为 377.7 m;

$Ef(V_{丰})$ = 3045.5 万 m^3,总可信度为 0.774,对应生态水位为 380.2 m。

丰水期生态水位与统计丰水水位不相符,一是可能与统计中枯平丰期划分与水位分段不一致有关,二是可能与 2006 年四川大面积干旱,双溪流域降雨量小(径流深 100 mm)有关,同时这也反应了地处南方湿润地区的双溪水库库岸生态尚有潜力。

如将各期最大保证率(可信度)对应生态需水量作为适宜生态需水量 $V_{i\text{opt}}$,则有:枯水期为 1 807.4 万 m^3,大于 $V_{枯\text{opt}}$的可信度为 32%;平水期为 2775.5 万 m^3,大于 $V_{平\text{opt}}$的可信度为 17.76%;丰水期为 3 526.6 万 m^3,大于 $V_{丰\text{opt}}$的可信度为 54.4%;类比河流评价标准[9]可知,除丰水期,枯水期和平水期的实际水量 V 有关系:$V_{i\min} < V \leqslant V_{i\text{opt}}$。

4　结　论

a. 枯水期生态水位与统计枯水水位、现实最高枯水位 374.5 m 相符,但较靠近最高枯水位,有近 10%的调水低于生态水位;平水期生态水位与统计平水水位、现实最高平水位 383 m 相符,位居中间;而丰水期生态水位与统计丰水水位、现实最低丰水位 383 m 不相符。

b. 表明枯水期、平水期双溪水库生态系统处于半稳定状态,枯水期近 10%的低于生态水位调水使生态有逆向演替倾向;丰水期库岸生态处正常状态,呈顺向演替。

c. 运用盲数理论对水库生态系统生态需水量的量化分析是可行的,反映了生态的综合状况和发展趋势,从而能更好地为环境决策提供科学依据,并为该领域的研究提供新的方法。

5　建　议

a. 鉴于枯水期有近 10%的低于生态水位调水,因此在水库生态调水时要严格控制水位和低于生态水位的时间。

b. 库岸生态尚有潜力,应加大人工森林培育,以利涵水保土,促进双溪水库生态发展,保护物种的多样性和生态系统的完整与稳定。

参考文献:

[1] 徐志侠. 河道与湖泊生态需水研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005,4-13.

[2] 李博,杨持,林鹏. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:196.

[3] LIITVINOV A S,ROSHCHUPKO V F. Long-term and seasonal water level fluctuations of the Rybinsk Reservoir and their role in the functioning of its ecosystem[J]. Water Resources,2007,34(1):27-34.

[4] 余文公. 三峡水库生态径流调度措施与方案研究[D]. 南京:河海大学,2007,28-44.

[5] 崔保山,赵翔,杨志峰. 基于生态水文学原理的水库最小生态需水量计算[J]. 生态学报,2005,25(7):1790-1794.

[6] 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]. 北京:科学出版社,2003.

[7] 张海亮. 不确定性分析方法在城市水库水污染控制中的应用研究[D]. 吉林:吉林大学,2005.

[8] 李如忠,洪天求. 盲数理论在水库水环境容量计算中的应用[J]. 水利学报,2005.36(7):766-767.

[9] 苏飞. 河流生态需水计算模式及应用研究[D]. 南京:河海大学,2005.

(收稿日期:2007-06-01　编辑:高渭文)