河流生态流量的生态积分探讨

薛小杰¹, 张泽中^{1,2}, 黄四霞¹, 惠泱河³, 王 宽⁴

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2 长沙理工大学 水利学院, 湖南 长沙 410076;
3 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069; 4 西安市环保局 灞桥分局环境监测站, 陕西 西安 710038)

【摘要】【目的】探讨更好地度量河流流量生态效益的单位、核算参照值和计算方法。【方法】针对河流径流量生态效益参照值选取困难, 将河流流量生态效益理解为生态效用, 借鉴 Tennant 描述的河流生态流量与栖息地质量关系的思想, 给出河流径流生态积分概念、内涵和计算公式, 用来衡量河流流量生态效用大小, 用生态积分表示河流径流量的生态效益。最后, 以黄河龙羊峡和刘家峡水库 2003 年调度为例进行了方法检验。【结果】2003 年黄河龙羊峡和刘家峡梯级水库对花园口站非汛期的生态基流补偿效益为 289.4 亿生态积分, 其中龙羊峡对花园口站生态基流补偿效益为 197.5 亿生态积分, 刘家峡对花园口站生态基流补偿效益为 91.9 亿生态积分。【结论】河流径流生态积分度量对径流生态效益进行定量衡量, 用生态分弥补了衡量河流生态基流效益的参照值缺失, 可以对水库生态调度等进行合理评价。

【关键词】 河流生态流量; 生态积分; 生态基流; 补偿效益; 水库调度

【中图分类号】 X171; X143

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)02-0220-05

Discussion on total ecological mark of river basic ecological flow

XUE Xiao-jie¹, ZHANG Ze-zhong^{1,2}, HUANG Si-xia¹, HUI Yang-he³, WANG Kuan⁴

(1 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 College of Water Conservancy, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China;
3 Department of City and Resources Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
4 Environmental Protection Bureau of Xi'an Baqiao Sub-bureau Environmental Monitoring Station, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: 【Objective】 The research was to study the unit, reference value and calculation formder of ecological river flux. 【Method】 The calculation formula of river flow total ecological mark was put forward for discussing on measuring the ecological benefit of river flow by using reference tennant method idea of describing the relation between the ecological flow and the habitat quality. Finally, taking Longyangxia and Liujiaxia Reservoirs on Yellow River as demonstration to test the method. 【Result】 The result of the calculating case shows that the basic ecological flow compensation benefits were 28.94 billion ecological marks in 2003, which Huayuankou Station had obtained from Longyangxia and Liujiaxia reservoirs regulation. Namely, Longyangxia and Liujiaxia reservoirs respectively provided 19.75 billion ecological marks and 9.19 billion ecological marks of basic ecological flow compensation benefits for Huayuankou Station. 【Conclusion】 The article was for the purpose of the quota carrying on the weight to the runoff ecological benefit, laying the scientific foundation for the reservoir ecology dispatch.

Key words: ecological river flux; ecological mark; basic ecological flow; compensation benefit; reservoirs operation

* [收稿日期] 2008-06-24

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40501011); 陕西省教育厅科学研究计划项目(04JK231); 西安理工大学科学研究计划项目(106-210709)

[作者简介] 薛小杰(1973—), 男, 陕西扶风人, 副教授, 博士, 主要从事水库调度及水资源系统工程研究。E-mail: xxjxaut@163.com

随着社会经济的发展以及人类对水资源开发活动的日益加剧,河流生态流量研究快速发展。河流生态流量研究始于 20 世纪 40 年代的美国西部,20 世纪 80 年代,澳大利亚、英国和南非等国家相继开展了这方面的研究,20 世纪 90 年代末我国学者对“生态流量”的相关概念进行了激烈讨论,在大量引入国外生态流量核算方法的同时,也积极探索适合我国国情的生态流量核算方法^[1-7]。目前,河流生态流量核算方法有水文学法、水力学法、生境模拟法和整体分析法^[3-9]4 类,据桑连海等^[10]统计,水文学法有 61 种,水力学法有 23 种,生境模拟法有 58 种,整体分析法有 16 种。这些方法从不同学科或综合多种学科的角度出发,求得河流生态流量。水资源合理配置要求水资源的经济、社会和生态的总效益最大。而在生态受到极大关注的今天,很有必要对河流流量的生态效益进行科学评估。但在目前研究中,尚不能对生态效益进行直接核算,往往需要通过间接分析获得。在进行河水的生态效益核算中,往往是采用常规的生态经济学核算方法,将生态效益转换成货币单位。由于在不同的核算中,对生态效益评价所采用的准则不同,核算结果的差距也很大,不能满足现实的需求。近年来,随着能量生态学和生态足迹理论的发展,为河水生态效益的科学度量提供了良好的表达形式,但对核算参照值的选取尚存在一些问题^[11]。如何衡量不同流量级河水的生态效益,在水库等水利工程参与水资源开发中,水库等工程具有补偿效益,合理衡量生态流量的生态效益问题更值得研究,但目前对于河流流量生态效益的研究尚鲜有报道。

本研究针对河流径流量生态效益参照值选取的困难,借鉴 Tennant 描述的河流生态流量与栖息地质量关系的思想,对河流径流量生态效益的度量单位、核算参照值和方法进行探讨,以期为更好地度量河流流量生态效益提供参考。

1 河流生态流量的生态积分

1.1 生态积分的概念

同一河流不同流量及不同河流同一流量,对河流生态和环境质量及效益影响不同;同一条河流、同一流量、对不同河段生态和环境质量及效益影响也不同;同一条河流、同一河段、同一流量不同时段,对河流生态和环境质量及效益影响也不同。如何衡量生态流量对河流生态和环境质量及效益的影响,其参照标准和衡量单位至关重要。目前,对生态流量

的生态效益进行精确量化非常困难。换个角度看生态效益,将河流生态流量的生态效益理解成生态效用、生态价值和良好生态意义。同时,借鉴 Tennant 描述河流生态流量与栖息地质量关系的思想^[12],探讨河流生态流量的生态效用、价值和良好生态意义的参照标准,并用生态积分作为其衡量单位。

Tennant 的河流流量与栖息地质量关系表中,某百分比的流量是不同时期和不同级别所对应某一瞬时的流量值,它表示此径流流量能保证此控制断面及其控制河段这个时期生物栖息质量,满足河流生物发展需求。因此,可以通过专家给此径流流量打分,来表示其对控制河段内生态和环境的贡献大小,即生态效用或生态效益。根据生态流量对控制河段内生态和环境所做贡献大小,请相关领域专家打分,所得分值称为河流径流生态积分。河流径流具有时空变化特性,因此,专家要分别对不同时期和不同量级的径流打分,其分值分别称为时期生态分和级别生态分。从高级到低级,用流量等级阈值下限将河流流量逐级分割,各级水量与相应等级生态分之积的和与对应时期生态分相乘,所得的总分称为河流流量生态积分;单位为分,单位符号(M)。

1.2 专家打分模型

受不完备信息、生态分所需时间、个人偏好和对目标识别程度等不确定性因素的影响,专家的打分结果差别很大。因为熵^[13]是不确定性的最佳量度,借鉴传递熵的思想,用熵表示各专家打分结果的不确定性,可建立评价专家给定信息质量和专家打分选取的熵模型。

在生态分确定过程中,假定存在一理想的最优专家,其打分最公正、最准确。实际计算和判定时,可以选取对径流生态贡献的认识与专家群体有最高一致性的专家,即与总体差异最小的专家。与最优专家给定分值差距越大的待打分专家,其所给出结果的可信度就越低。此差距也用熵表示,可建立以下模型:

设 $S_1, S_2, \dots, S_m$ 为 m 个专家,其构成打分群组 G 。被打分目标(时期或流量等级)为 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 。 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 是第 i 个专家对第 j 个目标的打分值。向量 $x_{ij} = (x_{i1}, \dots, x_{in})^T \in E^n$ 和矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 是专家和专家组在一次评估中提供的结论。记 S^* 为最优专家,取与专家群体有最高一致性的专家,其评分向量为 $x = (x_1^*, \dots, x_n^*)^T \in E^n$ 。用各专家的打分结果与 S^* 的差异大小来度量所选专家的优劣。专家的打分水平向量

为:

$$E_i = (e_{i1}, \dots, e_{ik}). \quad (1)$$

式中: $e_{ik} = 1 - |x_{ik} - \bar{x}_{ik}| / \max x_{ik}$, ($i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, j$), 反映了专家 S_i 对目标 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 所做打分结论的水平。

至此, 可建立如下基于熵的专家打分水平评定模型:

$$H_i = \sum_{j=1}^n h_{ij}. \quad (2)$$

$$\text{式中: } h_{ij} = \begin{cases} -e_{ij} \ln e_{ij}, & \frac{1}{e} \leq e_{ij} \leq 1; \\ \frac{2}{e} - e_{ij} |\ln e_{ij}|, & 0 < e_{ij} < \frac{1}{e}. \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n.$$

此模型将专家对给定问题的打分能力用其给定的评分结果的不确定性来度量, 熵值 H_i 的大小表示不确定性的程度。熵值 H_i 越小, 专家的决策水平越高, 给出的评分越科学; 反之, 熵值最大的专家给出的评价结论可信度越低, 给出的评价越不科学。因

此, 取 H_i 所对应专家 i 对目标 j 所打分 x_{ij} 为目标 j 最后得分 x_j^* , 即:

$$x_j^* = (x_{ij}) \min H_i. \quad (3)$$

时期生态分和级别生态分需相关专家打分, 根据河流中相应生物种类, 每类生物找若干位专家对径流流量的不同时期和不同级别进行打分, 然后用专家打分法^[13] 确定最终流量各时期和各级别的生态分, 生态分单位为分/ m^3 。本文选取 6 位河流生态需水相关领域专家, 对河流不同时期(4~6 月、7~10 月和 11~3 月)及径流不同流量等级进行初步打分, 并运用专家打分法, 确定不同时期和不同流量等级的河流流量生态积分, 结果见表 1 和表 2。

表 1 不同时期的河流流量生态积分

时期 Period	different period		
	4~6 月 Apr. - Jun.	7~10 月 Jul. - Oct.	11~3 月 Nov. - Mar.
分值 Mark	4	1	2

表 2 不同流量等级的河流流量生态积分

Table 2 Ecological marks of flux of the differen grades M

流量等级 Runoff grade	流量等级描述 Description grade	推荐流量等级阈值/% Commend extent value of runoff flux			等级分值 Grade mark
8	最大 Most	(80~100]Q	(180~200]Q	(80~200]Q	1
7	最佳 Furthest	(60~80]Q	(100~180]Q	(50~80]Q	1
6	极好 Best	(50~60]Q	(80~100]Q	(40~50]Q	2
5	非常好 Better	(40~50]Q	(60~80]Q	(30~40]Q	3
4	好 Well	(30~40]Q	(40~60]Q	(20~30]Q	4
3	一般 Common	(10~30]Q	(20~40]Q	(10~20]Q	5
2	差 Worse	(5~10]Q	(10~20]Q	(5~10]Q	6
1	极差 Worst	(0~5]Q	(0~5]Q	(0~5]Q	8

注: Q 表示多年平均流量。

Note: Q is multi-average runoff.

1.3 生态积分的计算

设河流的时期生态积分为 m_e , j 等级生态积分为 m_{gej} , 河流第 i 时期($i = 1, 2, 3 \dots$)的流量 Q 在第 j 等级($j = 1, \dots, 8$)用 Q_{ij} 表示, 以流量 m^3/s 计的流量生态积分 M_e (ecological mark) 可用下式计算:

$$\Delta Q_j = \begin{cases} Q_{ij} - q_{ijd}, & (Q_{ij} < q_{iju}) \\ q_{iju} - q_{ijd}, & (Q_{ij} > q_{iju}) \end{cases} (j = J, \dots, 1) \quad (4)$$

$$Q = \sum_{j=J}^1 \Delta Q_j; \quad (5)$$

$$M_e = m_{te} \sum_{j=1}^J m_{gej} \Delta Q_j. \quad (6)$$

式中: q_{ijd} 、 q_{iju} 分别为推荐流量等级第 j 等级上、下界限阈值, ΔQ_j 为流量 Q 在第 j 等级的水量。

某一径流流量时、日、旬、月等时段的流量生态积分等于该流量的生态积分与时段长(以 s 计)之

积。径流流量时段生态积分 M_E 可用下式表示:

$$M_E = T M_e. \quad (7)$$

式中: T 为时段长度, s。

2 实例应用

目前, 水资源日益短缺, 生态和环境用水被挤占, 造成生态和环境日益恶化, 这已成为社会经济可持续发展的重要障碍。通过水库调度, 可以缓解生态环境恶化、改善生态环境状况^[11]。水库生态补偿效益是指由于水库建设、运行和变化导致的生态效益或效用的变化, 包括水库对生态的负面作用和正面作用。本文结合龙羊峡和刘家峡梯级水库对其下游花园口站生态基流的作用, 利用径流生态积分计算龙羊峡和刘家峡梯级水库生态基流的补偿效益。

2.1 水库生态基流补偿效益的计算

首先,选取要计算生态基流补偿效益年份的年径流流量;第2步,分别用无水库系列和有水库系列的河流年径流量的多年平均年内分配系数,将计算年年径流量转化为无水库和有水库2个年内分配过程;第3步,分别计算这2个过程非汛期河流各站段每月的生态积分 M_E ;第4步,有水库的生态积分与无水库的生态积分之差,为水库基流补偿效益的生态积分,从而得到水库生态基流补偿效益。

表3 花园口断面天然年径流量年内分配系数^[14]

Table 3 Distributing coefficient flux series Huayuankou segments annual runoff

时段 Period of time	年径流量/亿 m ³ Annual runoff	月径流量占年径流量/% Percent of every month runoff occupying annual runoff											
		1月 Jan.	2月 Feb.	3月 Mar.	4月 Apr.	5月 May	6月 Jun.	7月 Jul.	8月 Aug.	9月 Sep.	10月 Oct.	11月 Nov.	12月 Dec.
1950~1986年 1950-1986 year	455.1	3.3	2.8	5.9	5.9	6.1	5.0	12.1	16.6	15.8	14.2	7.9	4.4
1987~1997年 1987-1997 year	286.7	4.8	5.2	8.8	8.7	7.1	6.0	9.3	17.8	13.2	6.8	6.0	6.3

依据表3中无、有龙羊峡和刘家峡水库花园口断的面年径流量年内分配系数,将黄河花园口站2003年年径流量 272.7 亿 m³^[15],按无、有龙羊峡和

2.2 水库生态基流补偿效益的分析

本文仅对花园口站进行方法检验,按照水库生态基流补偿效益计算方法,计算非汛期龙羊峡和刘家峡两库调节补偿黄河花园口站生态基流的补偿效益。

如表3所示,本文采用文献[14]的花园口断面实测径流量年内分配系数数据(1950~1986年是无龙羊峡和刘家峡两库时的数据,1987~1997年是有龙羊峡和刘家峡两库时的数据)。

刘家峡水库2种情况进行年内分配(非汛期),并转化为流量 m³/s,结果见表4。

表4 花园口断面2003年实测径流量^[15]的年内分配 Q_R

Table 4 Survey distributing month flux and flow of Huayuankou segments in 2003

月份 Month	无水库 Reservoirs nonexistence		有水库 Reservoirs existence	
	月径流量/亿 m ³ Month runoff	流量/(m ³ ·s ⁻¹) Quantity	月径流量/亿 m ³ Month runoff	流量/(m ³ ·s ⁻¹) Quantity
1	9.00	347.22	13.10	505.40
2	7.64	294.75	14.20	547.84
3	16.10	621.14	24.00	925.93
4	16.10	621.14	23.70	914.35
5	16.36	631.17	19.36	746.91
6	13.64	526.23	16.36	631.17
11	21.50	829.48	16.40	632.72
12	12.00	462.96	17.20	663.58

黄河花园口站天然状况下的多年平均流量(1952~1959年)是 1 909.95 m³/s^[15]。该站非汛期

的河流径流生态积分和各流量等级阈值见表5。

表5 花园口站河流径流生态积分和各流量等级阈值

Table 5 Ecological marks and commend extent value of flux of Huayuankou

M

流量等级描述 Description grades	流量等级 Runoff grade	推荐流量等级阈值区间 Commend extent value of runoff flux	
		4~6月 Apr. -Jun.	11~3月 Nov. -Mar.
最大 Most	8	(1 909.95~3 819.9]	(1 527.96~3 819.9]
最佳 Furthest	7	(1 145.97~1 909.95]	(954.98~1 527.96]
极好 Best	6	(954.98~1 145.98]	(763.98~954.98]
非常好 Better	5	(763.98~954.98]	(572.99~763.98]
好 Well	4	(572.99~763.98]	(381.99~572.99]
一般 Common	3	(286.50~572.99]	(191.00~381.99]
差 Worse	2	(191.00~286.50]	(95.50~191.00]
极差 Worst	1	(0~95.50]	(0~95.50]

本文以月为时段,在表4和表5的基础上,据公式(4)、(5)、(6)和(7)分别计算无、有龙羊峡和刘家

峡水库时,2003年花园口站径流非汛期生态积分值和水库生态基流补偿积分,结果见表6。

表 6 2003 年花园口站径流非汛期生态积分值和生态基流补偿积分

Table 6 Ecological mark and the compensation ecological mark values of flow of Huayuankou unit 亿 M

项目 Item	月份 Month								生态积分合计 Non-flood season total mark	补偿生态积分 Compensation ecological mark
	1	2	3	4	5	6	11	12		
无水库 Reservoirs nonexistence	99.9	86.3	156.0	302.1	305.2	267.7	185.0	125.7	1 528.0	289.4
有水库 Reservoirs existence	134.5	143.3	195.0	377.7	341.2	305.2	157.8	162.6	1 817.4	

从表 6 可见,2003 年龙羊峡和刘家峡梯级水库对花园口站非汛期的生态基流补偿效益为 289.4 亿分生态积分;采用文献[11]的离差平方法计算,得到龙羊峡和刘家峡水库的生态基流补偿效益分摊比例为 2.15 : 1,由此计算得到龙羊峡对花园口站生态基流补偿效益为 197.5 亿分生态积分,刘家峡对花园口站生态基流补偿效益为 91.9 亿分生态积分。

3 结 论

1)借鉴 Tennant 描述的河流生态流量与栖息地质量关系的思想,给出河流径流生态积分概念和内涵及其计算方法,用其度量河流生态流量的生态效用,表示河流生态流量生态效益。

2)用生态积分理论计算得到 2003 年龙羊峡和刘家峡梯级水库对花园口站非汛期的生态基流补偿效益为 289.4 亿分生态积分,其中龙羊峡对花园口站生态基流补偿效益为 197.5 亿生态积分,刘家峡对花园口站生态基流补偿效益为 91.9 亿生态积分。

3)河流径流生态积分度量了生态流量的生态效用和生态价值的大小。与生态足迹法和能量生态学法相比,该方法用生态分弥补了衡量河流生态基流效益的参照值缺失,对水库生态调度等的合理评价提供了参考。但生态积分并不是生态效益,生态积分与生态效益的换算关系,还需众多领域专家学者合作进一步研究。

[参考文献]

[1] 杨志峰,张 远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,17(3):294-301.
Yang Z F,Zhang Y. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2003, 17(3): 294-301. (in Chinese)

[2] 粟晓玲,康绍忠.生态需水的概念及其计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):740-744.
Su X L,Kang S H. Concept of ecological water requirement and its estimation method [J]. Advances In Water Science, 2003, 14 (6): 740-744. (in Chinese)

[3] 钟华平,刘 恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展,2006,17(3):430-434.
Zhong H P, Liu H, Geng L H, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances In Water Science, 2006, 17(3): 430-434. (in Chinese)

[4] 张泽中,李 群,黄 强,等.基于河流健康生态环境需水内涵及确定方法[J].西安理工大学学报,2008,24(2):196-200.
Zhang Z Z, Li Q, Huang Q, et al. The connotation and calculation method of eco-environmental water demand based on the river health [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(2): 196-200. (in Chinese)

[5] 黄 强,李 群,张泽中,等.计算黄河干流生态环境需水 Tennant 法的改进及应用[J].水动力学研究与进展:A辑,2007, 22(6):774-781.
Huang Q, Li Q, Zhang Z Z, et al. Improvement Tennant method and application it to compute eco-environmental water requirement in Yellow River [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2007, 22(6): 774-781. (in Chinese)

[6] 门宝辉,刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):479-482.
Men B H, Liu C M. Modified calculative criterion of Tennant and its application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese)

[7] 刘昌明,门宝辉,宋进喜.河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J].自然科学进展,2007,17(1):42-48.
Liu C M, Men B H, Song J X. Determination of ecological water demand based on hydrology radar for specific ecological function [J]. Advances in Nature Science, 2007, 17(1): 42-48. (in Chinese)

[8] DFID of the UK. Hand book for the assessment of catchment water demand and use [M]. Oxon: HR Wallingford, 2003: 20-41.

[9] CEI Environmental Edge. Water wars heat up [EB/OL]. <http://ceiengineers.com/publications/EE1203.pdf>. 2003-10-08.

[10] 桑连海,陈西庆,黄 薇.河流环境流量法研究进展[J].水科学进展,2006,17(5):754-760.
Sang L H, Chen X Q, Huang W. Evolution of environmental flow methodologies for rivers [J]. Advances In Water Science, 2006, 17(5): 754-760. (in Chinese)