

最小生态径流的内涵及计算方法研究

于龙娟,夏自强,杜晓舜

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 从生态学的角度出发,论述生态环境用水的重要组成部分——最小生态径流的概念及其计算方法.列举了国内外最小生态径流的各种计算方法,如国外的最小连续 30 d 平均流量法、7Q10 法、Tennant 法、R2CROSS 法、河道湿周法和 IFIM 法,国内的环境功能设定法和水质目标约束法等.结合现有国内外的各种最小生态径流计算方法,针对生态水文的实际情况,提出了新的计算方法——逐月最小生态径流计算法和逐月频率计算法.利用洛河和伊河的天然径流资料,对不同方法计算结果的合理性进行比较分析.

关键词 最小生态径流 计算方法 合理性分析

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)01-0018-05

在水资源利用中考虑经济和生活用水的同时,必须重视生态环境用水,明确生态环境用水的概念,研究一套科学合理的生态环境用水的计算方法.最小生态径流是生态环境用水的一个重要组成部分,其大小关系到河流生态系统的存在状况,是生态环境用水的一个重要研究方向^[1,2].

1 最小生态径流的概念

最小生态径流是指在受人类活动影响情况下,水体中为了保证水生生物存在所需要的水量,或者说是河流中可以满足现状生态要求的最小径流量.最小生态径流对水量、水质和持续时间都有一定的要求.河流的最大允许取水量由天然径流量与最小生态径流量的差确定.

最小生态径流评价模型应该考虑河流所处的气候带,河流水文状况及等级,特定的卫生、渔业、疗养标准要求,河流的经济利用类型和利用程度,还要保证生物稳定性和河流的自净条件.如果在径流破坏期,河流中的流量小于河流在自然条件下的最小径流,那么河流的生态状况不合格.

最小生态径流在一年中不是一个常量,根据生态群落的繁殖和发育规律,最小生态径流同河道水流年内变化特征一样,是一个连续变化的过程.同时针对每一条河流,由于生态种类的不同,其生态方面需求的最小径流值也是不一样的.

2 最小生态径流的计算

20 世纪六七十年代以来,国外学者提出一些类似最小生态径流的概念,并给出了许多计算和评价方法^[3,4].这些方法主要分为 3 类,分别是非现场类型标准设定法、栖息地保持类型标准设定法和增量法.国内学者也提出了一些最小生态径流计算方法,如环境功能设定法和水质目标约束法等等.

2.1 非现场类型标准设定法

2.1.1 最小连续 30 d 平均流量法

俄罗斯专家认为,最小生态径流在河川径流用于经济需要时,可以同径流的观测资料相比,从而得出河床的水文地理不利期以及生态储备期.这个计算结果可以用图表的形式表示,根据这个结果可以实现具体河流集水区的合理使用.除此之外,还必须根据自然保护要求,对被使用水体进行经济评价和社会评价.

最小连续 30 d 平均流量法的具体计算方法如下^[5,6]:取 80% 保证率的最小连续 30 d 平均流量作为枯水期河流的最小生态径流,它的准确性取决于河流所在地的地理和社会经济条件.丰水期为扩大留在河网中的

水量,最小生态径流量增大(特别是在有水库的情况下),此时最小生态径流可以采取 50% ~ 75% 保证率的最小连续 30 d 平均流量.逐年干化的河流的基本最小生态径流量可以采用多年平均(50% 保证率)或枯季流量(日常流量).在内陆干旱地区必须考虑到存在河流径流的形成带(河流上游)和它的自然衰竭带(河流下游),分别确定它们的最小生态径流值.

2.1.2 美国的 7Q10 法

7Q10 法采用 90% 保证率最枯连续 7 d 的平均水量作为河流最小流量设计值. 7Q10 法标准要求比较高,鉴于我国经济发展水平比较落后、南北方水资源情况差别较大的情况,一般河流采用近 10 a 最枯月平均流量或 90% 保证率最枯月平均流量.

2.1.3 Tennant 法

Tennant 法(即 Montana 法)根据对生物物种和生境的有利程度,给出河流生态用水的流量级别.该法的河流流量推荐值见表 1.该法不需要现场测量.在有水文站点的河流,年平均流量的估算可以从历史资料获得;在没有水文站点的河流,年平均流量可以通过其他的水文技术来间接获得.在美国,该法通常作为优先度不高的河段研究河流流量推荐值使用,或者作为其他方法的一种检验.

表 1 河流生态用水的流量状况标准

Table 1 River discharge criterion for ecological water consumption		
流量对生态的有利程度	10 月至翌年 3 月的河流生态用水量占年平均流量的百分比/%	4 ~ 9 月的河流生态用水量占年平均流量的百分比/%
极限允许范围	10 ~ 200	10 ~ 200
最佳范围	60 ~ 100	60 ~ 100
极 好	40	60
很 好	30	50
良 好	20	40
一般或较差	10	30
极 差	0 ~ 10	0 ~ 10

2.2 栖息地保持类型标准设定法

2.2.1 R2CROSS 法

R2CROSS 法以曼宁公式为基础.该方法假设浅滩是最临界的河流栖息地类型,从而保护了浅滩栖息地,也基本保护了其他的水生栖息地,如水塘和水道.对于一般的浅滩式河流栖息地,将河流平均深度、平均流速和湿周率作为反映生物栖息地质量的水力学指标,所有河流的平均流速推荐采用常数 0.3 m/s.该法的河流流量推荐值见表 2.

表 2 采用 R2CROSS 单断面法确定最小流量的标准

Table 2 Lowest discharge criterion determined by the R2CROSS single cross-section method			
河流顶宽 /m	平均水深 /m	湿周率 /%	平均流速 /(m·s ⁻¹)
0.30 ~ 6.10	0.06	50	0.3
6.40 ~ 12.19	0.06 ~ 0.12	50	0.3
12.50 ~ 18.29	0.12 ~ 0.18	50 ~ 60	0.3
18.59 ~ 30.48	0.18 ~ 0.30	≥ 70	0.3

2.2.2 河道湿周法

湿周通常随着河流流量的增大而增加,然而当湿周超过某临界值后,河流流量的大幅度增加也只能导致湿周的微小变化,即河流湿周存在一个临界值.只要保护好作为水生生物栖息地的临界湿周区域,也就基本上满足非临界区域水生生物栖息地保护的最低要求.湿周法河道内流量推荐值是依据湿周一流量关系图中转折点的位置而确定(见图 1).该方法一般适用于宽浅河道.河道的形状会影响该方法的分析结果.

2.3 增量法

增量法主要指 IFIM 法.该法把大量的水文水化学实测数据与特定的水生生物物种在不同生长阶段的生物学信息相结合,进行流量增加的变化对栖息地影响的评价.考虑的主要指标有河水流速、最小水深、河床底质、水温、溶解氧、总碱度、浊度、透光度等. IFIM 法根据这些指标,采用 PHABSIM 模型模拟流速变化与生物栖息地类型的关系,通过水力数据和生物学信息的结合,确定适合于一定流量的主要水生生物及其栖息地类型.

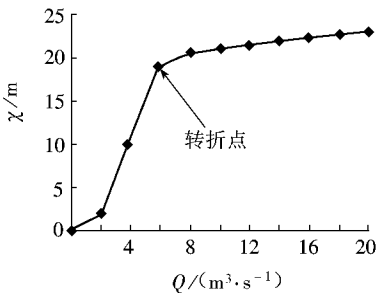


图 1 湿周一流量关系

Fig.1 Relationship between discharge and wetted perimeter

2.4 国内的最小生态径流计算方法

2.4.1 环境功能设定法^[7]

环境功能设定法根据河流的稀释自净功能,设定合理的河道最小生态径流(Q_v). 首先将河流划分为 i 小段,将每一小段看做一个闭合的汇水区,计算每一小段的最小生态径流 Q_{vi} ($i=1,2,\dots,n$),对其求和得到的就是整条河流的最小生态径流.

Q_{vi} 必须同时满足下列方程:

$$Q_{vi} \geq \lambda Q_{wi} \quad Q_{vi} \geq Q_{ni}(p) \quad (p \geq p_0) \quad (1)$$

式中: λ ——河流稀释系数; Q_{wi} ——第 i 段达标排放的污水总量; $Q_{ni}(p)$ ——不同水文年(如平水年、枯水年等)设定保证率下(如 $p_0=90\%$, $p_0=80\%$ 等)第 i 段的河流流量.

2.4.2 水质目标约束法

依据环境水力学有关水质污染稀释自净需水量计算的基本思路,1992~1993 年我国学者曾研究过以水环境质量目标为约束的城市河段最小流量测算方法,其公式如下:

$$C_s [Q_1 + \sum q(1 - K_2)] = (1 - K) [Q_1 C_1 + W(1 - K_1)(1 - K_2)] \quad (2)$$

式中: C_s ——河段水质控制目标, mg/L ; Q_1 ——河段上游流入的水量, m^3/s ; C_1 ——河段上游入水的污染物浓度, mg/L ; W ——河段内污染物的产生量, g/s ; K ——污染物削减综合系数; K_1 ——河段内污染物治理系数; K_2 ——河段内污废水资源化系数; $\sum q$ ——单位时间内河段中城市污废水的产生总量, m^3/s .

K_1 和 K_2 是与社会经济发展、环境保护投资、污染源治理效益等有关的系数. 河流的生态环境用水量减少,水中污染物的浓度就会上升,当污染物浓度达到最大极限允许浓度时,所需的生态环境用水即为河流的最小生态径流.

2.5 新计算方法

结合现有国内外的各种最小生态径流计算方法,并针对生态水文的实际情况,本文提出了新的计算方法——逐月最小生态径流计算法和逐月频率计算法.

2.5.1 逐月最小生态径流计算法

最小生态径流同河道水流年内变化特征一样,是连续变化的. 如果仅仅分丰水期和枯水期两种情况计算最小生态径流值,可以简化计算方法,但是计算误差较大,而且使用起来不方便. 所以笔者认为最小生态径流应该逐月计算. 最小生态径流要保证水生生物的最低生存条件,因此它的值应该是天然状态下水生生物所能容忍的干旱的极限. 目前河流流量受人类的干预越来越大,所以为了排除人为因素的影响,计算要使用河流还原后的天然径流. 在尽可能长的天然月径流系列中取最小值作为该月的最小生态径流量. 如果在天然情况下水生生物已经安全经历过这样的最小径流,并且生态系统没有遭到严重的不可恢复的破坏,就说明在不考虑水质的情况下,水生生态系统能够适应这个最小径流量,水生生物的最低生存条件在这个流量条件下能够得到保证. 如果考虑污染物稀释用水,最小生态径流值可能还要相应地增大.

为了检验逐月最小生态径流计算法的合理性,笔者使用洛河和伊河 1980~1999 年的流量资料,应用逐月最小生态径流计算法计算这两条河的最小生态径流. 洛河是潼关以下黄河上的最大支流,发源于陕西省华山南麓,在巩义市神堤汇入黄河,干流全长 446.9 km,流域面积 18881 km^2 (含伊河). 伊河为洛阳市境内的第二大河,是洛河的最大支流,发源于洛阳市境内熊耳山南麓,东行至偃师杨村汇入洛河,干流全长 265 km,流域面积 6041.0 km^2 .

使用逐月最小生态径流计算法算得洛河和伊河的年最小生态径流值见表 3. 洛河最小生态径流年平均流量是 5.45 m^3/s ,最小生态径流的年水量是 1.72 亿 m^3 ,占年平均径流量的 21.41%. 伊河的最小生态径流年平均流量是 9.47 m^3/s ,最小生态径流的年水量是 2.99 亿 m^3 ,占年平均径流量的 28.73%.

2.5.2 逐月频率计算法

逐月最小生态径流计算法算得的最小生态径流值虽然能够满足水生生物的最低生活条件,但如果长期处于这种最低生存条件下,肯定不利于水生生态系统的健康发展. 因此在水量允许的情况下,可以适当放宽条件,增大最小生态径流,于是笔者提出了下面的最小生态径流逐月频率计算法.

最小生态径流逐月频率计算法在考虑生态系统对水量要求的同时,还考虑了不同时期生态系统的不同

要求,将最小生态径流看做一个有丰有枯的年内变化过程.生态系统是与自然径流过程相适应的,所以最小生态径流也按照自然径流的规律,不同季节取不同的频率,枯季小、丰季大,年内连续变化.首先对尽可能长的天然月径流量系列进行频率计算,然后冬季取 80% 保证率、春秋季节取 75% 保证率、夏季取 50% 保证率的月径流量值作为河流的最小生态径流量.

使用与上法相同的洛河和伊河资料,用逐月频率计算法计算该两河的最小生态径流值结果见表 4.洛河的最小生态径流年平均流量是 $13.05\text{ m}^3/\text{s}$,最小生态径流的年水量是 4.12 亿 m^3 ,占年平均径流量的 51.30%.伊河的最小生态径流年平均流量是 $18.26\text{ m}^3/\text{s}$,最小生态径流的年水量是 5.76 亿 m^3 ,占年平均径流量的 55.38%.

表 3 洛河和伊河使用逐月最小生态径流
计算法算得的最小生态径流值

Table 3 Minimum ecological runoff through Luohe
River and Yihe River estimated by the month-by-month
minimum ecological runoff calculation method

月份	洛河		伊河	
	$W/\text{亿 m}^3$	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$W/\text{亿 m}^3$	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.01	0.28	0.14	5.39
2	0.01	0.44	0.12	5.08
3	0.13	4.71	0.24	8.87
4	0.19	7.39	0.30	11.74
5	0.07	2.76	0.17	6.46
6	0.29	11.05	0.26	10.08
7	0.52	19.29	0.52	19.53
8	0.28	10.32	0.43	15.99
9	0.12	4.72	0.36	14.01
10	0.05	1.81	0.20	7.55
11	0.05	1.91	0.16	6.11
12	0.01	0.32	0.07	2.59

表 4 洛河和伊河使用逐月频率计算法
算得的最小生态径流值

Table 4 Minimum ecological runoff through Luohe
River and Yihe River estimated by month-by-month
frequency calculation method

月份	频率 /%	洛河		伊河	
		$W/\text{亿 m}^3$	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$W/\text{亿 m}^3$	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
1	80	0.07	2.43	0.15	5.60
2	80	0.07	2.69	0.15	6.20
3	75	0.25	9.33	0.33	12.32
4	75	0.33	12.73	0.40	15.43
5	75	0.25	9.33	0.41	15.31
6	50	0.56	21.60	0.62	23.92
7	50	1.06	39.58	1.29	48.16
8	50	0.83	30.99	1.32	49.28
9	75	0.35	13.50	0.47	18.13
10	75	0.17	6.35	0.29	10.83
11	75	0.12	4.63	0.17	6.56
12	80	0.067	2.50	0.16	5.97

3 不同计算方法的合理性分析

使用不同方法计算洛河和伊河的最小生态径流,并用参考 Tennant 法的生态径流取值范围,对各种计算方法进行合理性分析.逐月最小生态径流法与 7Q10 法的计算结果相近,10 月至翌年 3 月的河流最小生态径流量一般都比年平均流量小 10%,生态径流条件极差;4~9 月占年平均流量的 20% 左右,生态径流条件较差.但由于资料系列比较长,逐月最小生态径流法算得的最小生态径流值更小一些.在水质和水流条件改变较小的河流里,生态系统在经历天然径流系列的最小值时没有遭到严重的破坏,逐月最小生态径流法在这种情况下是适用的.而 7Q10 法则侧重于考虑现状生态系统已经适应了现有的径流取用水和水质污染状况,认为最近 10 a 的最小径流值作为最小生态径流符合现状生态系统的要求.由于人类活动的影响,河流的最小径流值可能会很小,甚至为零,不能保证生态系统的最低生存条件,所以笔者认为频率计算方法比最小生态径流计算方法更合理.

逐月频率计算法算得的洛河和伊河 10 月至翌年 3 月的河流生态用水流量占年平均流量的 9.18% 和 12.02%,接近 10% 的生态系统的最低生存条件;4~9 月占年平均流量的 42.12% 和 43.37%,生态条件良好.从计算结果可以看出,这种方法算得的最小生态径流,在水量上枯季能够满足生态系统的最低生存条件,而丰水期能够为生态系统提供一个良好的生存条件,比其他方法更合理.此方法的另一个优越性在于,考虑了不同时期生态系统的不同需求,给出了一个年内最小生态径流的变化过程.但在考虑生产、生活和生态环境用水的水资源综合评价中,最小生态径流的取值还要受供需平衡等多方面因素的影响,不能简单地按照生态的要求来确定.

综上所述,考虑与水文特征相互作用的水生生物的众多要求的最小生态径流计算,以及相应的水资源的评价是非常复杂的任务,目前在这方面的理论研究还不够深入,计算方法也不够成熟,还需要对其进行更加深入细致的研究.

参考文献：

- [1] 王礼先. 生态环境用水的界定和计算方法[J]. 中国水利, 2002, (10) 28—30.
- [2] 夏青. 水资源管理与水环境管理[J]. 中国水利, 2002, (10) 72—73.
- [3] 倪晋仁, 崔树彬. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002, (9) 14—19.
- [4] 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, (4) 507—512.
- [5] ФЕДОРОВ Ю А, ВЛАДИМИРОВ А М. Экологический и водный ресурс [М]. Санкт-Петербург : Российский Государственный Гидрометеорологический Институт, 2000. 19—24.
- [6] ВЛАДИМИРОВ А М, ОРЛОВ В Г, САКОВИЧ В М. Экологические аспекты использования и охраны водных ресурсов (вод суши) [М]. Санкт-Петербург : Российский Государственный Гидрометеорологический Институт, 1997. 260—266.
- [7] 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[J]. 环境科学学报, 2001, (5) 544—547.

Connotation of minimum ecological runoff and its calculation method

YU Long-juan, XIA Zi-qiang, DU Xiao-shun

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : A discussion is made on some important components of ecological water consumption from the angle of ecology, including the concept of the minimum ecological runoff and its calculation method. An introduction is given to some calculation methods for the minimum ecological runoff, such as the minimum continuous 30 days' mean discharge method, 7Q10 method, Tennant method, R2CROSS method, wetted channel perimeter method, and IFIM method used at abroad, and the environment function enactment method and water quality objective restriction method mainly used in China. Aiming at the current situation of ecological hydrology, new methods are proposed for calculation of the minimum ecological runoff, i. e. the month-by-month minimum ecological runoff calculation method and month-by-month frequency calculation method. The rationality of the calculated results by the two methods is analyzed by use of the natural runoff data of the Luohe River and the Yihe River.

Key words : minimum ecological runoff ; calculation method ; analysis of rationality