

文章编号: 1006-4710(2012)04-0316-06

基于多目标的河流生态需水阈值研究

杨柳, 解建仓, 张建龙, 朱记伟, 赵月望

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 选取了水生生物保护、河流输沙、河流自净作为河流生态系统健康运行的生态目标, 进行多目标下的河流生态需水阈值研究, 结合变异性范围法(RVA)进行比较验证。以西安市灞河为实例进行分析, 从维护河流生态系统整体功能健康的角度出发, 确定河流生态需水阈值为 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占灞河多年平均地表径流总量 $4.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 29.2%, RVA 法计算结果为 $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占灞河多年平均地表径流总量的 30.41%, 与计算结果吻合。

关键词: 多目标; 生态需水阈值; Tennant 法; 变异性范围法

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A

The Research on River Ecological Water Requirement Threshold Based on Multiple Objectives

YANG Liu, XIE Jiancang, ZHANG Jianlong, ZHU Jiwei, ZHAO Yuewang

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper selects the protection of aquatic organisms, river sediment transportation, river self-purification as the ecological objectives of healthy operation of the river ecosystem to study the multi-objective river ecological water demand threshold, with the range of variability approach (RVA) to carry out comparative verification. With the Bahe River in Xi'an as the actual example to carry out the analysis and as viewed from the healthy whole function of preserving the river ecosystem, the river ecological water requirement threshold determined should be $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 29.2% of the Bahe river's yearly mean total surface runoff ($4.9 \times 10^8 \text{ m}^3$) for years. The results calculated by RVA method is $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 30.41% of the Bahe River's yearly mean total surface runoff, being in coincidence with the calculated result.

Key words: multiple objectives; ecological water requirement threshold; Tennant method; range of variability approach (RVA)

伴随着河流生态与环境问题的日益严重, 河流生态需水逐渐被各级政府重视, 保证生态需水, 进行水资源的可持续性开发和利用已成为当前水文水资源领域研究的热点, 有关生态需水概念及计算方法的研究成果不断涌现。1976 年 Montana 等人在完成对美国西部地区河流流量与生物关系的研究后, 提出了基于水文学的 Montana 估算方法^[1], 奠定了河

流生态需水的理论基础。20 世纪 90 年代, 业内明确提出了生态需水的概念。Gleick 认为提供一定质量和数量的水给天然生态环境, 以获取最小化地改变天然生态系统的过程, 并保护物种多样性和生态整合性^[2]。许新宜^[3]等认为生态需水是生态系统达到某种生态水平或者维持某种生态系统平衡所需要的水量。同时, 越来越多的生态需水量计算方法

收稿日期: 2012-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079120); 陕西省重点实验室基金资助项目(2010JS077)。

作者简介: 杨柳(1987-), 女, 陕西眉县人, 硕士生, 研究方向为区域经济与水资源管理。E-mail: yangliunice@yahoo.cn。

解建仓(1963-), 男, 陕西眉县人, 教授, 博导, 研究方向为水资源系统工程与水利信息化。

E-mail: jcxie@xau.t.edu.cn。

也应运而生。截止目前,河流内生态环境需水的研究方法很多,比较常用的水力学方法有湿周法、R2-CROSS法,等,常用的水文学方法有7Q10法、最小月平均实测流量法、Tennant法、Texas法,等^[4]。通常,湿周法的应用具有一定的局限性,R2-CROSS法更具有地方性,容易产生误差。另外,目前关于河流生态需水量计算的研究大多从单目标问题出发,未能充分考虑河流生态功能的完整性。严登华,王浩^[5]等人在《我国生态需水研究体系及关键研究命题初探》一文中特别指出,要在多目标决策的基础上,科学地确立河流生态目标进行需水量核算。

鉴于上述情况,本研究以水生生物保护需水量、河流输沙需水量、自净需水量为生态目标,通过多目标决策计算河流生态需水阈值。采用变异性范围法(RVA)进行验证,立足整体河流水文情势的流量谱系进行生态流量值估算,提供河流系统与流量相关的生态综合统计特征,为维持河流生态系统健康和合理的水资源开发利用提供科学指导。

1 模型方法

1.1 目标函数确定

河流生态需水阈值是一个范围,有上限和下限,是河流生态环境功能可能受损或遭致破坏的警戒信息^[6],超过上限或低于下限,河流生态系统都会发生紊乱。目前,面对水资源短缺和河流水资源开发利用程度普遍较高的现状,几乎不存在河流生态需水量超过上限的情况。因此本研究探讨河流生态需水阈值下限,即为满足一定的生态目标,维持河流生态系统功能健康发展所需要的最小水量^[7],用 W_{\min} 表示。对于非入海河流而言,生态目标^[8]一般包括:①水生生物栖息,如鱼类洄游、产卵等,或是国家重点保护水生生物对流量的要求,这里称其为生物保护需水量,用 W_b 表示;②满足河道输沙要求的需水量,用 W_s 表示;③河流防止污染的自净需水量,用 W_p 表示。

河道生态需水量计算要在一定的约束条件下,以维持河流生态系统的基本功能为目标,确定其目标函数为:

$$Z = \max \{ W_{\min}(x), W_{\min}(x), W_{p\min}(x) \} \quad (1)$$

1.2 水生生物保护需水量

水生生物保护需水量是指为维护水生生物种群的完整性和多样性,为其生长提供良好的栖息环境的需水量。对于资料缺乏的地区可参照Tennant^[9]法,按多年平均流量的百分比估算河道内水生生物的需水量。根据流量及相应的栖息地描述,选取多

年平均流量的10%进行水生生物保护的最小需水量计算。

1.3 输沙需水量

河流输沙需水量是保证河流输沙、输水的动态平衡以及维持河道正常演变功能的水量。高效输沙水量是指在冲淤平衡的临界状态下(输沙效率与河道淤积情况最优),输移一定量的泥沙至下一河段所需要的最小水量。对于城市河流来说,假定其非汛期河流输沙基本处于冲淤平衡状态,则输沙水量是高效输沙水量。汛期水流泥沙含量高,处于超饱和状态,可通过增大水流速度 v 来提高水流挟沙力 X^* 以满足冲淤平衡计算, X^* 选择张红武公式^[10]进行计算,即:

$$W_s = \sum_{i=1}^{12} \frac{1}{X_i^*} \times T_i \quad (2)$$

$$X_i^* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_v) v^3}{kgh\omega_s} \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \ln\left(\frac{h}{6d_{50}}\right) \right]^{-0.62} \quad (3)$$

其中, W_s 表示年输沙需水总量,单位为 m^3 ; X_i^* 为 i 月平均水流挟沙力,单位为 kg/m^3 ; T_i 为 i 月来沙总量; S_v 为体重比含沙量, v 为平均流速,单位为 m/s ; h 为平均水深,单位为 m ; k 为卡门常数, g 取 $9.81 m/s^2$; ω_s 为沙平均沉速,单位为 m/s ; d_{50} 为泥沙中值粒径,单位为 m ; γ_s 为泥沙容重,单位为 kg/m^3 ; γ_m 为浑水容重,单位为 kg/m^3 。

1.4 自净需水量

河流自净需水量的计算要求保证河流各功能区段内处处达到或高于水质要求,因此,采用环境功能法,以河流的每一个排污口为分界线将河流概化为多个河段,依次计算每一个区段达到水质要求的自净水量,综合考虑整个计算区段的河流自净需水量,一般情况下,应用一维水质数学模型来解决实际问题^[11],即:

$$C = C_0 \exp\left[-\frac{kx}{86400v}\right] \quad (4)$$

其中, C 为水中污染物浓度,单位为 mg/l ; v 为流速,单位为 m/s ; x 为距离,单位为 m ; k 为衰减系数,根据斯屈里特—费利普斯提出的 $s-p$ 方程, k 的表达式为:

$$k = -\frac{v}{C} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5)$$

需要指出的是第 i 个排污口断面处的水中污染物浓度 C_i 应该为上一断面水中污染物质量加上该断面新排入的污染物质量,与该断面河道流量的比值为:

$$C_i = \frac{C_{i-1}Q_{p,i-1} + S_i q_i}{Q_i} \quad (6)$$

其中, $C_{i-1}, Q_{p,i-1}$ 分别为 $i-1$ 排污口断面处的水中污染物浓度, 河道自净需水量; S_i, q_i 分别为排污口处新排入水中的污染物浓度和水量; Q_i 为 i 排污口处污水与河水混合后的水量。

在 $x = x_i$ 处若要使河流水质达标应该满足 $C_i \leq C_{s,i}$, 则该断面的最小河道流量即为河道自净需水量 $Q_{p,i}$, 为:

$$Q_{p,i} = \frac{C_{i-1}Q_{p,i-1} + S_iq_i}{C_{s,i}} \quad (7)$$

同理, 在 $x = x_{i-1}$ 处, 河流水质满足 $C_{s,i-1}$ 的条件下, 最小河道流量即为此处的河道自净需水量 $Q_{p,i-1}$ 。此时, 由(4)式得:

$$C_{i-1} = C_{s,i-1} \exp\left[-\frac{k_{i-1}(x_i - x_{i-1})}{86400v_{i-1}}\right] \quad (8)$$

由(6)式和(7)式可得:

$$Q_{p,i} = \frac{C_{s,i-1} \exp\left[-\frac{k_{i-1}(x_i - x_{i-1})}{86400v_{i-1}}\right] Q_{p,i-1} + S_iq_i}{C_{s,i}} \quad (9)$$

为了使整个计算区间河道内的水质达标, 此区间的河道自净需水量应该为:

$$Q_p = \max\{Q_{p,1}, Q_{p,2}, \dots, Q_{p,i-1}, Q_{p,i}, \dots, Q_{p,n}\} \quad (10)$$

2 实例分析求解

2.1 灞河流域概况

灞河位于陕西省西安市东南部, 南起秦岭, 北至渭河, 东临骊山, 西接皂河, 南北长约 78 km, 东西宽 50 km, 流域总面积 2 581 km², 平均比降 6.0‰。灞

河流域属暖温带半湿润大陆性季风气候, 四季冷暖干湿分明, 多年平均气温 13.3 ℃, 多年平均水面蒸发量为 776 mm。降水量的地域分布差异明显, 由北向南逐渐增加, 由平原向山区递增, 变化范围在 550 ~ 900 mm 之间。降水量年内分配不均, 7 ~ 10 月降水量占全年的 60% 以上, 最高达到 77.1%。年际变化较大, 年最大降水量 999 mm, 为年最小降水量的 2 ~ 3 倍。灞河马渡王站多年平均流量为 15.58 m³/s, 年径流量为 4.9 × 10⁸ m³。

2.2 生物保护需水量计算

中国北方河流 4 ~ 6 月是鱼虾孵化的高峰季节, 水生生物丰富, 旅游季节的高峰期一般也是这个时段, 7 ~ 10 月或者 11 月河水量丰, 泥沙含量高, 河水量应以输沙用水调度为主, 11 月或者 12 月 ~ 翌年 3 月, 河水量相对较枯, 月水量占年水量的比例一般为 3% ~ 7%。这些河流水生态系统具有明显的季节性特征^[12]。因此本研究基于 Tennant 法计算时段的划分思路, 根据实际情况稍加修正后对灞河河流生态需水按季节性划分为 11 月 ~ 翌年 3 月、4 ~ 6 月、7 ~ 10 月 3 个时段, 根据灞河下游干流控制站, 马渡王水文站 1955 年到 2010 年 56 年实测长系列径流资料, 计算得出这三个不同时段平均流量分别为: 6.81 m³/s、16.14 m³/s、26.16 m³/s, 流量计算结果见表 1。根据多年平均流量百分比和河流内生态环境状况的对应关系, 选择 11 月 ~ 翌年 3 月多年平均流量的 10%, 4 ~ 6 月和 7 ~ 10 月多年平均流量的 10% 作为河流水生生物保护需水量的最小值, 年生物保护需水量的最小值的计算结果为 0.5 × 10⁸ m³。

表 1 Tennant 法对河流生态环境状况的描述及流量计算对比表

Tab. 1 A description of the river ecological environment through Tennant and the flow calculation contrast table of circumstances

| 河流生态环境状况 | 推荐基流占平均流量百分比/% | | 平均流量/(m ³ /s) | | |
|----------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------|---------------|
| | 一般用水期 (10 ~ 翌年 3 月) | 鱼类产卵育幼期 (4 ~ 9 月) | 11 ~ 翌年 3 月 | 4 ~ 6 月 | 7 ~ 10 月 |
| 冲刷 | 200 | 200 | 13.62 | 32.28 | 52.32 |
| 最佳 | 60 ~ 100 | 60 ~ 100 | 4.09 ~ 6.81 | 9.68 ~ 16.14 | 15.70 ~ 26.16 |
| 很好 | 40 | 60 | 2.72 | 9.68 | 15.7 |
| 好 | 30 | 50 | 2.04 | 8.07 | 13.08 |
| 较好 | 20 | 40 | 1.36 | 6.46 | 10.46 |
| 一般 | 10 | 30 | 0.68 | 4.85 | 7.85 |
| 差或最差 | 10 | 10 | 0.68 | 1.61 | 2.62 |
| 严重退化 | < 10 | < 10 | < 0.68 | < 1.61 | < 2.62 |

2.3 输沙需水量计算

根据马渡王水文站 1956 年到 2005 年实测含沙量统计资料, 多年平均含沙量月分配如图 1 所示。

月平均含沙量 6 ~ 9 月份较大, 11 月到翌年 3 月较小, 最大月均值一般出现在 7 ~ 8 月份, 最小月均值一般出现在 12 月或者 1 月。采用公式(2)和(3)计

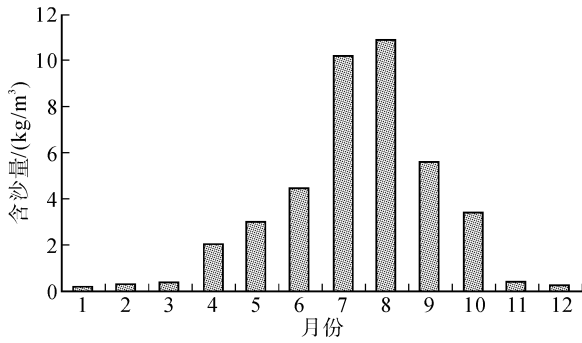


图1 灞河马渡王水文站年平均月含沙量柱状图
Fig.1 The annual average monthly sediment concentration histogram of Bahe Madu Wang hydrological station

算得灞河马渡王站不同代表年河流输沙需水量结果见表2。由计算结果可知河流输沙需水量主要集中在汛期,占全年总输沙需水量的65%以上,主要原因为汛期水流中含沙量极大,因此输沙需水量大。本研究以平水年($P = 50\%$)来估算河流输沙需水量,确定灞河年最小输沙需水量为 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表2 灞河马渡王站不同代表年河流输沙需水量计算结果

Tab.2 The river sediment transport water demand calculation results in different representative years of Bahe Madu Wang hydrological station

| 代表年 | 汛期输沙需水量/(10^4 m^3) | | | 非汛期输沙需水量/(10^4 m^3) | | | | | | | | | 全年输沙需水量/(10^4 m^3) |
|------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------------|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-------|--------------------------------|
| | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | |
| $P = 25\%$ | 3 840 | 4 108 | 2 711 | 1 281 | 132 | 67 | 53 | 94 | 139 | 765 | 1 131 | 1 981 | 16 302 |
| $P = 50\%$ | 3 589 | 3 848 | 2 367 | 1 083 | 101 | 43 | 51 | 86 | 114 | 586 | 896 | 1 488 | 14 252 |
| $P = 75\%$ | 2 931 | 3 233 | 1 609 | 877 | 81 | 39 | 43 | 72 | 106 | 483 | 702 | 1 282 | 11 459 |
| $P = 90\%$ | 2 027 | 2 134 | 1 096 | 666 | 69 | 35 | 30 | 49 | 72 | 397 | 587 | 973 | 8 135 |

表3 灞河水质现状监测结果

Tab.3 Current water quality monitoring results of Bahe River

| 河流 | 断面 | 目标水质 | 实测水质 | | 评价 | 超标污染物 |
|-------------|-------|------|------|------|----|------------------|
| | | | 2009 | 2010 | | |
| 灞河 (城市段) | 灞河入灞口 | IV | V | 劣V | 超标 | 氨氮3.14倍,氟化物0.05倍 |
| | 入渭口 | IV | 劣V | 劣V | 超标 | 氨氮3.14倍 |

表4 灞河不同代表年河流自净需水量计算结果

Tab.4 River self-purification of water demand calculation results in different representative years of Bahe River

| 代表年 | 断面 | 自净需水量/(10^8 m^3) | | | | | | | | | | | | 全年 |
|------------|-------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | |
| $P = 25\%$ | 灞河入灞口 | 0.066 | 0.072 | 0.055 | 0.053 | 0.049 | 0.063 | 0.056 | 0.052 | 0.057 | 0.056 | 0.062 | 0.069 | 0.710 |
| | 入渭口 | 0.073 | 0.075 | 0.066 | 0.06 | 0.057 | 0.068 | 0.064 | 0.067 | 0.058 | 0.065 | 0.066 | 0.073 | 0.792 |
| $P = 50\%$ | 灞河入灞口 | 0.065 | 0.073 | 0.063 | 0.058 | 0.061 | 0.067 | 0.062 | 0.054 | 0.059 | 0.063 | 0.064 | 0.068 | 0.757 |
| | 入渭口 | 0.077 | 0.076 | 0.067 | 0.062 | 0.07 | 0.071 | 0.063 | 0.059 | 0.061 | 0.073 | 0.072 | 0.075 | 0.826 |
| $P = 75\%$ | 灞河入灞口 | 0.072 | 0.071 | 0.061 | 0.063 | 0.058 | 0.064 | 0.074 | 0.069 | 0.066 | 0.07 | 0.065 | 0.073 | 0.806 |
| | 入渭口 | 0.078 | 0.077 | 0.065 | 0.071 | 0.063 | 0.069 | 0.078 | 0.074 | 0.077 | 0.076 | 0.072 | 0.079 | 0.879 |
| $P = 90\%$ | 灞河入灞口 | 0.074 | 0.073 | 0.076 | 0.069 | 0.06 | 0.071 | 0.064 | 0.072 | 0.07 | 0.067 | 0.074 | 0.073 | 0.843 |
| | 入渭口 | 0.079 | 0.078 | 0.081 | 0.073 | 0.069 | 0.074 | 0.073 | 0.076 | 0.077 | 0.075 | 0.078 | 0.08 | 0.913 |
| 多年平均 | 灞河入灞口 | 0.069 | 0.074 | 0.068 | 0.06 | 0.066 | 0.062 | 0.067 | 0.059 | 0.061 | 0.063 | 0.075 | 0.073 | 0.797 |
| | 入渭口 | 0.075 | 0.072 | 0.067 | 0.068 | 0.062 | 0.071 | 0.074 | 0.068 | 0.069 | 0.067 | 0.07 | 0.073 | 0.836 |

2.4 自净需水量计算

2000年以来灞河下游随着西安城市化进程的推进,逐渐成为城中河,频繁的人类活动导致灞河下游水文条件发生了改变,严重干扰着河流生态系统健康,污水排放也主要集中在下游城市段。因此,本研究选择了灞河下游城市段两个监测断面。从表3可以看出,近年两个监测断面水质均为劣V类,其中灞河入灞口处主要污染物为氨氮和氟化物,分别超标3.14倍和0.05倍;入灞口处主要污染物为氨氮,超标3.14倍。废污水中CODCr平均浓度在220 mg/L左右, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 平均浓度在59.0 mg/L左右,大都为超标排放。本研究选定COD衰减系数 k 为0.2 L/d,氨氮衰减系数 k 为0.15 L/d,根据公式(9)计算得灞河城市段不同代表年河流自净需水量(见表4)。根据公式(10),在满足整个计算区间水质达标的情况下,以灞河入渭口多年平均值 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 作为灞河年最小自净需水量。

根据本研究所确定的多生态目标在满足最小水生生物保护需水量、最小输沙需水量、最小自净需水量三个生态目标的情况下,取其中的最大值作为河流生态需水阈值。通过以上计算分析,确定灞河生态需水阈值为 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。若在水资源开发利用过程中生态需水量低于这个值,则河流输沙功能受到影响,导致河流生态系统不能健康运行。

3 比较验证

Richter 等 1997 年提出了 RVA 法^[13],该方法建立在分析 IHA 水文改变指标的基础上,利用 32 个水文参数评估流量特性受水利工程影响的改变程度,提供河流系统与流量相关的生态综合统计特征,识别水文变化在维护生态系统中的重要作用。Richter 等建议以 IHA 各指标的平均值 $\pm \delta$ (标准差) 或者以频率为 75% 和 25% 的值作为各个指标参数的上下限^[14] (即 RVA 阈值)。

本研究以马渡王水文站 1955 年到 2010 年 56 年实测长系列径流资料,进行 IHA 水文指标参数确定。参考舒畅、刘苏峡^[15]等在基于变异性范围法 (RVA) 的河流生态流量估算一文中的成果进行河流生态需水量估算。计算结果见表 5。由表 5 可以看出,灞河汛期在 7~10 月,流量大且变化快,生态流量处于全年的高峰期,可用以满足汛期输沙用水量;4~6 月是鱼虾孵化的高峰季节,水量较丰沛,生态流量也相对较大;12 月~翌年 3 月属于枯水期,生态流量主要用于维持河流的基本流量、自净等功能。由此可见,以 RVA 法对上述河流生态需水阈值计算进行验证,准确性较高。

表 5 马渡王水文站 IHA 指标参数计算结果表

Tab.5 IHA indicators parameter calculation results table of Madu Wang hydrological station

| 月份 | 水文变化指数 | | | 月生态流量/ (m^3/s) | 可支配 系数 |
|------|----------------------------------|--------------------------------------|----------|-------------------------------------|-----------|
| | 均值/ (m^3/s) | RVA 阈值/ (m^3/s) | 上限 下限 | | |
| 4 月 | 17.34 | 21.79 | 9.49 | 5.04 | 0.71 |
| 5 月 | 18.58 | 23.12 | 9.93 | 5.39 | 0.71 |
| 6 月 | 12.51 | 16.97 | 8.89 | 4.43 | 0.65 |
| 7 月 | 26.61 | 36.77 | 18.18 | 8.02 | 0.7 |
| 8 月 | 22.2 | 30.76 | 15.14 | 6.58 | 0.7 |
| 9 月 | 31.08 | 42.47 | 19.61 | 8.22 | 0.74 |
| 10 月 | 24.74 | 33.27 | 16.19 | 7.66 | 0.69 |
| 11 月 | 12.19 | 16.59 | 8.69 | 4.29 | 0.65 |
| 12 月 | 5.31 | 6.93 | 3.71 | 2.09 | 0.61 |
| 1 月 | 3.46 | 4.32 | 2.37 | 1.51 | 0.56 |
| 2 月 | 3.74 | 4.76 | 2.39 | 1.37 | 0.63 |
| 3 月 | 9.37 | 12.38 | 6.1 | 3.09 | 0.67 |

生态流量是生态需水的扩展和深化,能更详细、准确地反映河流生态需水的情况,生态流量得到保障才能更好地维持河流生态系统功能的完整性。从图 2 可见,马渡王各月生态流量均小于 RVA 下限,变化趋势同河流流量的自然变化基本一致,且变动幅度小于河流流量自然变化,这表明该生态流量值能够保持河流基本且稳定的流量,维持河流生态系统的稳定。因此,基于计算月生态流量的思路,计算河流生态需水量,更具有准确性和可操作性。通过生态流量对时间的积分,可得灞河生态需水量为 $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,与计算结果吻合。

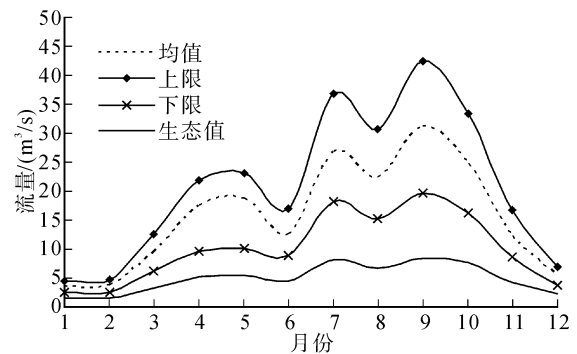


图 2 马渡王月生态流量图

Fig.2 Monthly ecological flow diagram of Madu Wang

4 结论

1) 选取了水生生物保护、河流输沙、河流自净作为河流生态系统健康运行的生态目标,以灞河为研究对象,分别计算了满足上述三个生态目标的最小生态需水量为 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$;

2) 根据本研究确定的目标函数,从维护河流生态系统整体功能健康的角度出发,确定河流生态需水阈值为 $1.43 \times 10^8 \text{ m}^3$,占灞河多年平均地表径流总量的 29.2%;

3) 对河流月生态流量的计算结果分析表明,采用 RVA 法进行比较验证,具有一定的准确性和可操作性。通过 RVA 法计算的灞河生态需水量为 $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,占灞河多年平均地表径流总量的 30.41%,与计算结果吻合。

考虑到灞河下游已逐渐成为西安市的城中河,生态需水要求较高,本研究计算得出的灞河生态需水阈值可作为河流水资源开发利用的警戒线,为维护河流生态系统健康运行提供依据。通过本研究所选三个生态目标的最小生态需水量的计算,明确了灞河目前应以河流输沙作为维护河流生态系统健康的首要任务。其次,本研究倡议加强河流水污染治理。

参考文献:

- [1] Whipple W, Dubois J D, Grigg N, et al. A proposed approach to coordination of water resources development and environmental regulations [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(4):713-716.
- [2] Peter H G. Climate change, exponential curves, water resources, and unprecedented threats to humanity [J]. *Climatic Change*, 2010, 100(1):125-129.
- [3] 王红瑞, 曹玲玲, 许新宜, 等. 基于梯形模糊数的不确定性河道生态需水模型及其应用 [J]. *水利学报*, 2011, 42(6):657-664.
Wang Hongrui, Cao Lingling, Xu Xinyi, et al. An uncertain model for ecological water demand of river based on trapezoidal fuzzy numbers and its application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(6):657-664.
- [4] 王西琴. 河流生态需水理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [5] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探 [J]. *水利学报*, 2007, 38(3):267-273.
Yan Denghua, Wang Hao, Wang Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3):267-273.
- [6] 杨志峰, 于世伟, 陈贺, 等. 基于栖息地突变分析的春汛期生态需水阈值模型 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(4):567-572.
Yang Zhifeng, Yu Shiwei, Chen He, et al. Model for defining environmental flow thresholds of spring flood period using abrupt habitat change analysis [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4):567-572.
- [7] 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):510-511.
Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Research advance in ecological water demand and environmental water demand [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4):510-511.
- [8] 韩鲁杰, 王红瑞, 许新宜, 等. 生态流速—临界水深法及在杜柯河中的应用 [J]. *人民长江*, 2009, 40(21):62-65.
Han Lujie, Wang Hongrui, Xu Xinyi, et al. Ecological flow of critical depth method and application in Du Ke river [J]. *Yangtze River*, 2009, 40(21):62-65.
- [9] 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):479-480.
Men Baohui, Liu Changming. Modified calculative criterion of Tennant and its application [J]. *Journal of Harbin Institute Technology*, 2008, 40(3):479-480.
- [10] 吴腾, 洪建, 胡德超, 等. 标准化最小距离判别法及其对水流挟沙力公式的检验 [J]. *泥沙研究*, 2008, (1):21-25.
Wu Teng, Hong Jian, Hu Dechao, et al. Standardized minimum distance discrimination method and verification of sediment-carrying capacity formulas [J]. *Journal of Sediment Research*, 2008, (1):21-25.
- [11] 宋进喜, 曹明明, 李怀恩, 等. 渭河(陕西段)河道自净需水量研究 [J]. *地理科学*, 2005, 25(3):3310-3316.
Song Jinxi, Cao Mingming, Li Huaen, et al. Water requirements of the stream's self purification of the WeiHe river in Shaanxi province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(3):3310-3316.
- [12] 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*, 2007, 22(6):774-781.
Huang Qiang, Li Qun, Zhang Zezhong, et al. Improvement tennant method and application it to compute eco-environmental water requirement in Yellow river [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(6):774-781.
- [13] Brian R, Jeffrey Br, Robert W, et al. How much water does a river need [J]. *Freshwater Biology*, 2003, 37(1):231-249.
- [14] 张洪波, 王义民, 黄强, 等. 基于 RVA 的水库工程对河流水文条件的影响评价 [J]. *西安理工大学学报*, 2008, 24(3):262-267.
Zhang Hongbo, Wang Yimin, Huang Qiang, et al. Effects of reservoir engineering based on RVA upon river flow regime [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2008, 24(3):262-267.
- [15] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5):1151-1152.
Shu Chang, Liu Suxia, Mo Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5):1151-1152.

(责任编辑 李虹燕)