

生态水力半径法改进及其在青海湖流域的应用

马育军^{1,2}, 李小雁^{1,2}

1. 北京师范大学;地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875
2. 北京师范大学资源学院,北京 100875;

摘要 保障河流生态需水是实现流域水资源可持续利用的重要基础。本文在综合考虑水生生物对于河流水深要求以及生态需水年际差异的基础上,对传统生态水力半径法进行了改进,并以青海湖裸鲤为指示生物研究了青海湖流域两条主要河流(布哈河、沙柳河)的生态需水特征。结果表明:(1)改进生态水力半径法计算结果较为合理并可以满足维持河流基本生态功能的需要,不考虑年际差异的生态需水计算结果将被显著高估;(2)1958—2009年布哈河和沙柳河年生态需水量多年平均分别介于 1.45×10^8 — 2.64×10^8 、 1.26×10^8 — $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$;(3)布哈河和沙柳河4—5月生态缺水量多年平均分别为 0.29×10^8 、 $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此,改进生态水力半径法是计算河流生态需水的一种新型有效方法。

关键词 生态水力半径法;年际差异;水深约束;河流生态需水;青海湖流域

中图分类号 X171.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.17.001

Improvement on the Ecological Hydraulic Radius Approach and Its Applications in the Qinghai Lake Watershed

MA Yujun^{1,2}, LI Xiaoyan^{1,2}

1. Beijing Normal University; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China
2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract The guarantee of Environmental Flow Requirements (EFRs) of rivers is an important foundation for the sustainable utilization of water resources. By considering the water depth requirement of aquatic organisms and distinguishing the inter-annual difference of EFRs, the traditional ecological hydraulic radius approach was improved. Then the Adapted Ecological Hydraulic Radius Approach (AEHRA) was used to study the EFRs characteristics of two main rivers (Buha River, Shaliu River) in Qinghai Lake watershed using Naked Carp (*Gymnocypris przewalskii*) as the biological indicator, and the results indicate that (1) EFRs calculated by AEHRA is reasonable and could satisfy the demand for keeping the basic ecological function of rivers. EFRs would be significantly overestimated, if its inter-annual difference is not considered. (2) Annual EFRs of Buha River and Shaliu River were $1.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ — $2.64 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ — $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively in the period of 1958 to 2009. (3) Average ecological water shortages of Buha River and Shaliu River were $0.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively in April and May. Consequently, AEHRA is a new and effectual method for calculating the EFRs of rivers.

Keywords AEHRA; inter-annual difference; water depth constraint; environmental flow requirements of river; Qinghai Lake watershed

0 引言

在干旱半干旱地区,有限的水资源支撑着脆弱的生态系统,长期以来这些地区在对水资源的竞争使用过程中,形成

了城市用水和工业用水挤占农业用水、农业用水挤占生态用水的格局,结果导致河道断流、自然植被衰退、水生生物锐减等一系列严重的生态问题^[1-2],而生态缺水是导致生态环境质

收稿日期:2011-04-21;修回日期:2011-05-23

基金项目:《科技导报》博士生创新研究资助计划(kjdb201001-6);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;地表过程与资源生态国家重点实验室资助项目;教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0056)

作者简介:马育军,博士研究生,研究方向为水土资源可持续利用、生态水文,电子信箱:myj3648@163.com;李小雁(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S110006258M,S300000393M),教授,研究方向为生态水文、水文与水资源,电子信箱:xyli@bnu.edu.cn

量下降的主要原因。为了促进生态系统良性循环,在水资源规划和配置时必须充分考虑生态系统对水的需求。生态需水是水资源在生态环境建设和国民经济各行业合理分配的关键依据,保障生态需水是实现水资源可持续利用的重要基础。

河道生态需水量是指维系河道生态系统健康所必需的水量,其对河流生态系统结构、功能、形态的维护具有重要意义^[3]。目前对河道生态需水的研究方法主要有水文学方法 (Hydrological Methodologies)、水力学方法 (Hydraulic Rating Methodologies)、生境模拟法 (Habitat Simulation Methodologies)、综合分析法 (Holistic Methodologies) 等^[4]。除了上述主要方法外,还有流量-湿地树种关系模型^[5]、Basque 法^[6]、生态水力模拟法^[7]、水文指数法^[8]、生态水力半径法^[9]等。总体而言,已有的各种河道生态需水计算方法同时考虑水生生物信息和生态需水年际差异的较少,导致计算结果相对单一,无法体现不同水平年的生态需水差异。因此,本文以传统生态水力半径法为基础,综合考虑河流水深约束和生态需水年际差异并对其进行改进,在此基础上研究青海湖流域主要河流的生态需水规律,以期河流生态需水的相关研究提供方法借鉴,为青海湖流域河流水资源的优化配置提供科学依据。

1 生态水力半径法改进

1.1 传统生态水力半径法介绍

生态水力半径法由刘昌明院士等于 2007 年提出,是一种同时考虑河道信息(水力半径、糙率、水力坡度)和维持某一生态功能所需河流流速的水力学方法^[9]。该方法的两点基本假设是:(1)天然河道的流态属于明渠均匀流;(2)流速采用河道过水断面的平均流速。基于以上两点假设,根据曼宁公式可以得到水力半径 R 与过水断面平均流速 v 、河道糙率 n 、水力坡度 J 之间的关系:

$$R = v^{3/2} \cdot n^{3/2} \cdot J^{-3/4} \quad (1)$$

将式(1)中的过水断面平均流速赋予生物学意义(生态流速),那么得到的水力半径就是生态水力半径,并可进一步根据下式推求相应过水断面的生态流量:

$$Q = \frac{R^{2/3} \cdot A \cdot J^{1/2}}{n} \quad (2)$$

式(2)中, Q 为生态流量, A 为过水断面面积。与传统水文学方法相比,生态水力半径法包含了水生生物信息和河道断面信息,因此计算结果具有更好的理论基础;同时,该方法可以根据水生生物在不同时间对生态流速的要求计算相应的生态流量,克服了传统水力学方法不能反映季节变化的缺陷。

为了减少对实测水文资料的依赖,赵长森等对生态水力半径法进行了改进,首先以实测资料为基础自动计算产生水位 Z 、水力半径 R 、断面面积 A 数据系列,然后利用最小二乘法拟合 $A-R$ 、 $Z-R$ 曲线,最后按照曼宁公式计算生态流量^[10]。

1.2 考虑水深约束和年际差异的改进方法

通过分析可以发现,原生态水力半径法和赵长森等改进的生态水力半径法均没有考虑水生生物对于河流水深的要

求,而水深是影响洄游鱼类生存和正常繁殖的重要因素,因此本文在已有方法的基础上引入河流水深的约束;同时,水生生物对于河流流速和水深的变化具有一定的适应性,因此生态流速和生态水深的设定应当是合理的阈值范围而不是一个特定数值。以设定的生态流速和生态水深阈值为基础,结合河道的水力参数,可以根据图 1 计算不同情景下的河流生态流量和生态水位。

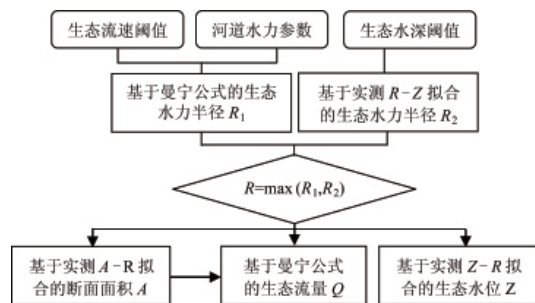


图 1 不同情景下河流生态流量和生态水位计算

Fig. 1 Calculation of ecological flow capacity and ecological water level under different situations

河道生态径流过程应该具有与天然径流相似的变化特征,不同年份应是连续变化且具有丰、平、枯特性^[11],年内分配则应当反映不同时间水生生物对河流水力条件的需求差异。以图 1 为基础,结合历年逐月河流径流量对设定的生态流速阈值与生态水深阈值进行修正,即可得到历年逐月生态流速和生态水位(生态水深加河底高程),在此基础上可计算得到相应的生态流量和生态水位,具体计算过程如图 2 所示。

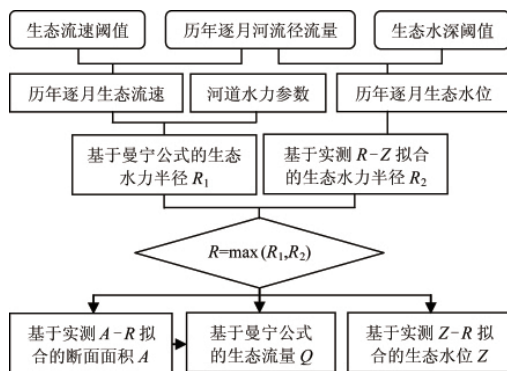


图 2 考虑年际差异的河流生态流量和生态水位计算

Fig. 2 Calculation of ecological flow capacity and ecological water level in consideration of inter-annual difference

图 2 中,历年逐月生态流速和历年逐月生态水位分别按照下式进行计算:

$$v_{i,j} = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min}) \times \frac{Q_{i,j} - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (3)$$

$$Z_{i,j} = Z_0 + h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \times \frac{Q_{i,j} - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (4)$$

其中, $v_{i,j}$ 和 $Z_{i,j}$ 分别为修正得到的第 i 年第 j 月的生态流速 (m/s) 和生态水位 (m); Z_0 为河底高程, m; $Q_{i,j}$ 为第 i 年第 j 月的河流径流量, m^3/s ; $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 分别为某一时段(产卵期或非产

卵期)逐月河流径流量的最大值和最小值; $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$ 分别为这一时段生态流速阈值的最大值和最小值; $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ 分别为这一时段生态水深阈值的最大值和最小值。

2 青海湖流域主要河流生态需水研究

2.1 数据来源与预处理

根据全国水资源分区的划分,青海湖流域属于西北内陆河流域(一级区)的青海湖水系(二级区),截至2010年底流域内仍在观测的水文站只有布哈河口水文站和刚察(二)水文站(以下简称刚察水文站)。

河流径流量资料:据统计,青海湖流域多年平均河流径流量为 $16.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,布哈河和沙柳河是流域最大的两条河

流,二者集水面积之和占流域总面积的53.20%、径流量之和占流域入湖径流量的61.90%^[12]。同时,考虑流域水文站变迁情况,主要选取具有较长观测序列的布哈河口水文站和刚察水文站1958—2009年的逐月径流资料分析两条河流的生态需水规律。两个水文站均位于河流下游,可以反映相应河流的径流特征。

实测断面资料:布哈河口水文站和刚察水文站的观测断面分别如图3所示,其中前者呈V字型,后者为复式断面,主断面呈U字型。两个水文站2009年实测断面资料主要包括基本水尺水位、水面宽、平均水深、平均流速、断面面积、流量等。基于水文站实测断面资料,借助ArcGIS软件按照10cm间隔分别统计某一水位 Z 对应的湿周、断面面积 A 和水力半

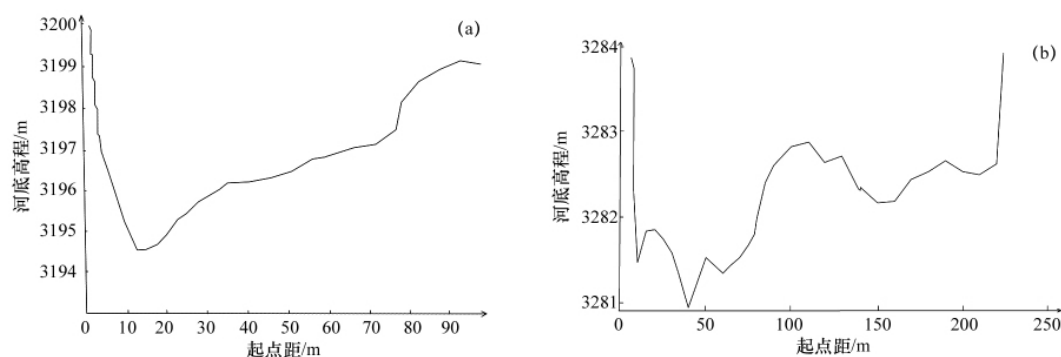


图3 布哈河口水文站(a)和刚察水文站(b)2009年实测断面

Fig. 3 Cross-section of Buha estuary hydrological station (a) and Gangcha hydrological station (b) in 2009

径 R ,在此基础上分别拟合 $A-R$ 、 $Z-R$ 的关系。

生态流速和生态水深资料:鱼类群落结构的变化能够全面而直接地反映水体生物群落与水质状况的整体变化信息,选择鱼类作为对象开展生态流量的研究是合理可行的^[13]。为了分析青海湖流域的河流生态需水状况,选择青海湖裸鲤为指示生物。青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii* K.,俗称湟鱼)是国务院颁布的《水产资源繁殖保护条例》中的国家重要或名贵水生动物之一,也是青海湖中唯一的经济鱼类,属于鲤科裂腹鱼亚科裸鲤属^[14]。大量调查和研究显示,青海湖裸鲤属于溯河性产卵鱼类,繁殖季节主要集中于4—7月^[15-16]。青海湖裸鲤适宜的生态流速和生态水深主要参考已有文献并结合其生活习性进行确定;郑建平等^[17]研究表明马苏大麻哈鱼洄流产卵场的流速平均为0.7m/s、水深平均为0.5m;刘昌明等^[9]建议裂腹鱼生态流速采用0.6m/s;赵长森等^[10]指出淮河流域产卵期产漂流性卵鱼类的最小流速为0.8m/s、产浮性卵的鱼类为0.3m/s、其他鱼类为0.3—0.4m/s,非产卵期最低流速为0.3—0.4m/s;王伟等^[18]认为家鱼繁殖期理想的水流流速是0.7m/s。为了体现青海湖裸鲤对于流速和水深具有一定的适应范围,最终确定其产卵期生态流速为0.6—0.8m/s、生态水深为0.4—0.6m,同时为了保证河流全年不断流、维持河流基本生态功能,确定非产卵期生态流速为0.3—0.4m/s、生态水深为0.2—0.3m。

2.2 不同情景河流生态需水计算

对两个水文站的 $A-R$ 、 $Z-R$ 关系分别进行拟合,结果见图4。所有拟合方程的决定系数均大于0.95,说明方程拟合效果较好,可以用来与曼宁公式相结合推求布哈河和沙柳河的生态流量及生态需水量。

根据不同的生态流速和生态水深组合,共得到9种典型情景下布哈河和沙柳河的生态需水量,如表1—表3所示。计算结果表明,布哈河和沙柳河年生态需水量分别介于 1.42×10^8 — 4.94×10^8 、 1.19×10^8 — $3.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,产卵期生态需水占全年的比例分别介于89.50%—91.34%、82.55%—86.46%;相同流速不同水深情景下生态需水量完全相同,相同水深不同流速情景下生态需水量存在明显差异,表明布哈河和沙柳河生态需水主要受流速影响;设置的9种典型情景中,最小情景同时考虑了生态流速和生态水深的最大需求,最大情景同时考虑了生态流速和生态水深的最大需求,因此这两种情景计算得到的生态需水量之间差异较大,并且存在一定的估计偏差,尤其是高估现象,这将在下文进行分析。

2.3 河流生态需水年际变化特征分析

根据上文介绍的生态水力半径法改进方法,结合1958—2009年的逐月河流径流量对生态流速和生态水深阈值进行修正,得到历年逐月生态流速和生态水深;进一步结合拟合得到的 $Z-R$ 、 $A-R$ 方程及曼宁公式,计算布哈河和沙柳河历

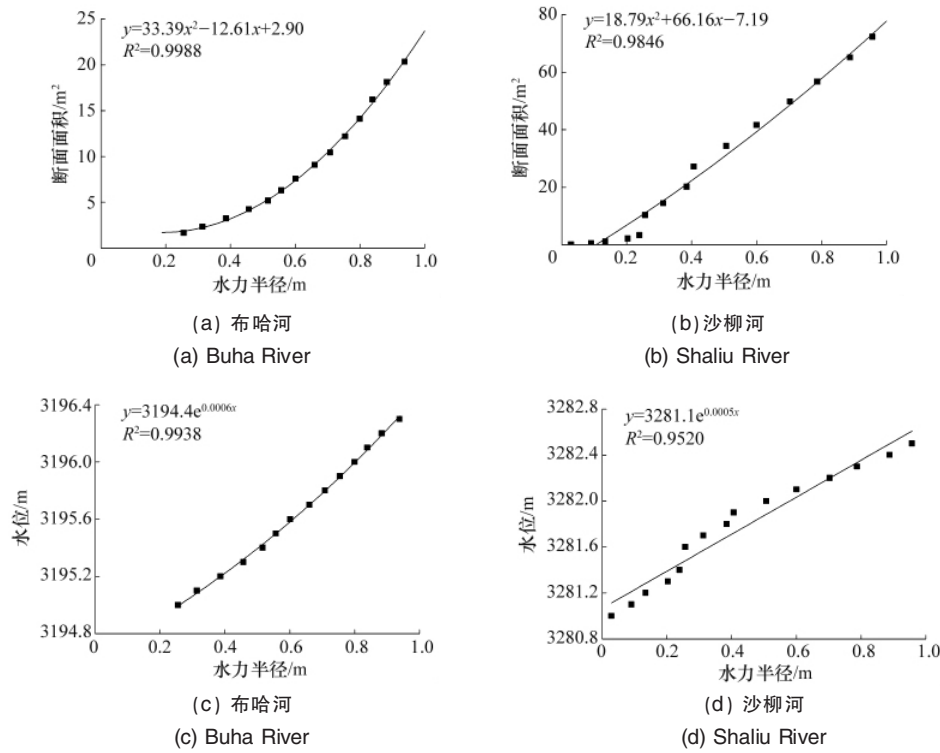


图 4 布哈河口水文站和刚察水文站 A-R、Z-R 关系拟合
Fig. 4 Fitting of A-R,Z-R curve of Buha estuary hydrological station and Gangcha hydrological station

表 1 不同生态流速和生态水深情景下产卵期
生态需水量(单位:10⁶m³)

Table 1 Environmental flow requirements of the spawning season under the situation of different water velocity and different water depth (unit: 10⁶m³)

河流名称	布哈河			沙柳河		
生态水深设定/m	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60
生态流	0.60	1.27	1.27	1.03	1.03	1.03
速设定	0.70	2.52	2.52	1.67	1.67	1.67
/(m·s ⁻¹)	0.80	4.51	4.51	2.51	2.51	2.51

表 2 不同生态流速和生态水深情景下非产卵期
生态需水量(单位:10⁶m³)

Table 2 Environmental flow requirements of the non-spawning season under the situation of different water velocity and different water depth (unit: 10⁶m³)

河流名称	布哈河			沙柳河		
生态水深设定/m	0.20	0.25	0.30	0.20	0.25	0.30
生态流	0.30	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16
速设定	0.35	0.25	0.25	0.32	0.32	0.32
/(m·s ⁻¹)	0.40	0.43	0.43	0.53	0.53	0.53

年生态需水量,结果如图 5 所示。对比表明,生态需水量呈现与河流径流量基本一致的变化趋势,反映了生态径流来源于天然径流的基本特征,也体现了不同水平年生态径流的丰枯差异;相对于河流径流的年际波动而言,生态径流的年度差

表 3 不同生态流速和生态水深情景下全年
生态需水量(单位:10⁶m³)

Table 3 Environmental flow requirements of the whole year under the situation of different water velocity and different water depth (unit: 10⁶m³)

河流名称	布哈河			沙柳河		
生态水深设定/m	最小	中值	最大	最小	中值	最大
生态流	最小	1.42	1.42	1.19	1.19	1.19
速设定	中值	2.77	2.77	1.99	1.99	1.99
/(m·s ⁻¹)	最大	4.94	4.94	3.05	3.05	3.05

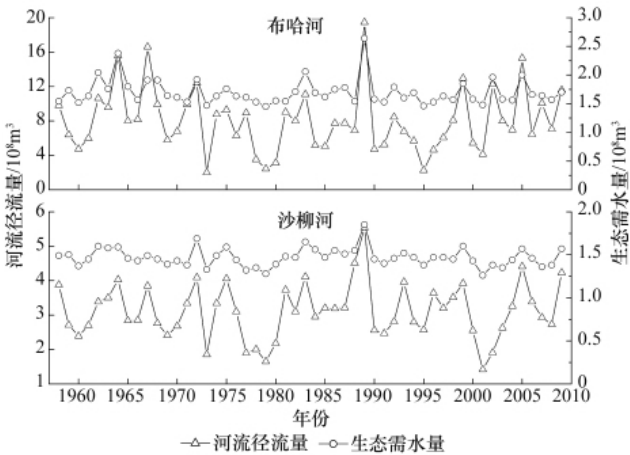


图 5 1958—2009 年逐年河流径流量与生态需水量对比
Fig. 5 Comparison between annual river discharge and environmental flow requirements in the period of 1958 to 2009

异较小,布哈河 1958—2009 年生态需水量最大为 $2.64 \times 10^8 \text{m}^3$ (1989 年)、最小为 $1.45 \times 10^8 \text{m}^3$ (1979 年),二者相差 0.82 倍,而相同时段河流径流量相差达 6.94 倍;沙柳河 1958—2009 年生态需水量最大为 $1.85 \times 10^8 \text{m}^3$ (1989 年)、最小为 $1.26 \times 10^8 \text{m}^3$ (2001 年),二者相差 0.47 倍,而相同时段河流径流量相差达 2.90 倍。两条河流历年生态需水的波动幅度显著小于表 1 中的范围,尤其是对于高值的计算二者存在较大差异,说明不考虑年际差异的生态需水计算结果被明显高估。52 年中,布哈河和沙柳河的年生态需水量占相应年份河流径流量的比例介于 11.49%—73.94% 和 33.43%—88.74%, 均能满足 10% 河流径流量的生态需水最低需求^[9]。

不同水平年布哈河和沙柳河生态需水量的对比结果如图 6 所示。平水年 ($25\% < P < 75\%$), 两条河流不同年份各自生态需水量差异较小,布哈河和沙柳河的生态需水量变化范围分别为 1.64×10^8 — 1.75×10^8 和 1.43×10^8 — $1.52 \times 10^8 \text{m}^3$; 丰水年 ($P < 25\%$), 伴随着保证率的降低, 两条河流的生态需水量逐渐增加, 并均于 1989 年达到最大值; 枯水年 ($P > 75\%$), 伴随着保证率的增加, 布哈河和沙柳河生态需水量不断减小, 并分别于 1979 年和 2001 年达到最小值。

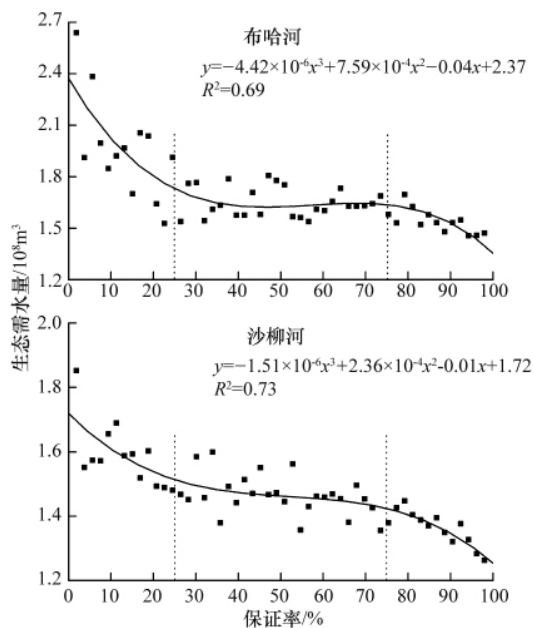


图 6 不同水平年生态需水量对比

Fig. 6 Environmental flow requirements at different guaranteed frequency years

2.4 逐月河流生态需水满足程度评价

目前对于河流生态需水满足程度的定义主要有 3 种: 第一种被定义为年平均径流量与生态需水量的比值^[20], 第二种被定义为天然最小流量与生态需水流量的比值^[21], 第三种被定义为河流径流量大于生态需水量的历时占总历时的比值^[22]。本文主要从第一种和第三种定义的角度评价青海湖流域主要河流的生态需水满足程度。

多年平均逐月河流径流量和生态需水量的对比如图 7

所示。1—3 月河流径流量均稍大于生态需水量, 因此这段时期的河流径流应当主要用于维持河道的基本生态功能; 4—5 月两条河流的河流径流量均小于生态需水量, 表明这两个月河流生态需水供需矛盾突出, 布哈河和沙柳河的生态缺水分别为 0.29×10^8 和 $0.21 \times 10^8 \text{m}^3$, 而此时也正值耕地集中灌溉时期(春灌), 农业用水大量挤占生态用水; 6—11 月两条河流的河流径流量均显著高于生态需水量, 所以为了有效保护河流生态环境, 同时满足区域社会经济发展的水资源需求, 青海湖流域应当主要于这段时间进行人工引水用以满足生活用水、生产用水的需要, 仅从满足河流生态需水的角度出发, 布哈河和沙柳河可引水量分别为 6.43×10^8 和 $1.72 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

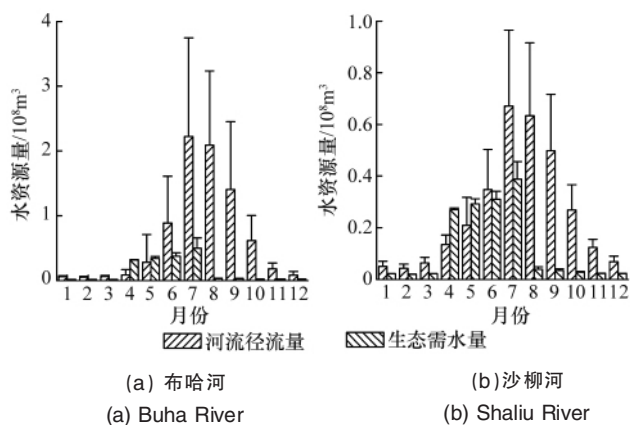


图 7 逐月河流径流量与生态需水量对比

Fig. 7 Comparison between monthly river discharge and environmental flow requirements

不同年代生态需水满足年份占全部年份的比例分别如图 8 所示。1958—2009 年, 布哈河 7 月至来年 3 月的生态需水均可以得到完全满足, 沙柳河只有 8—11 月的生态需水可以得到完全满足; 4—5 月两条河流的生态需水供需矛盾最为突出, 各个年代的生态需水满足程度均 $\leq 50\%$, 沙柳河 4 月的生态需水从未得到满足; 布哈河生态需水满足程度在年代际的变化规律不明显, 而沙柳河 12 月至来年 7 月的生态需水满足程度在 2000S 均呈现明显的下降趋势, 表明河流生态系统结构和功能被破坏的风险日益增大。

为了进一步分析布哈河和沙柳河在不同月份生态需水满足程度差异的原因, 对两个子流域的流域降水量、河流径流量和生态需水量进行对比, 结果如图 9 所示, 流域降水量分别采用各自流域内的天峻气象站和刚察气象站相同时段的月平均降水资料进行计算。对于布哈河而言, 各月降水量均大于河流径流量和生态需水量, 但 11 月至来年 3 月, 三者之间的差异均小于 $0.75 \times 10^8 \text{m}^3$, 因此这段时期应以满足生态用水为主, 生产和生活用水为辅; 4—5 月虽然生态需水量大于河流径流量, 但二者均显著小于流域降水量, 表明该段时期中上游地区自然耗水和人为耗水较多, 未来可以通过水资源的优化配置满足河流生态需水的要求; 6—10 月河流生态

需水可以得到充分满足。对于沙柳河而言,10月至来年2月流域降水量小于河流径流量,这可能是由于一方面刚察气象站位于沙柳河下游地区,而沿沙柳河溯流而上降水不断增加^[12],中上游地区丰富的降水可以形成相对较大的河流径流量;另一方面,降水后通过截留-入渗-蒸发-产流过程,一部分降水储存在土壤中并能对河流径流进行补给,时滞效应导致河流径流的形成对于降雨的响应具有滞后性;4—5月生态需水量大于河流径流量,其中4月的生态需水量也大于流域

降水量,表明该段时期沙柳河的生态缺水主要由于自然降水较少;6—9月,流域降水量显著高于河流径流量和生态需水量,其中7—9月河流径流量明显多于生态需水量,可以成为河道外调水的主要时期。

2.5 计算结果验证

为了评价本文采用的改进生态水力半径法计算结果的合理性,利用 Tennant 法(包括 6 个生态需水等级)^[19]、7Q10 法(包括采用近 10 年最枯月平均流量和 90% 保证率最枯月平均流量两种)^[23]、逐月频率法(MMFM,包括 3 个生态需水等级)^[18]、改进月保证率设定法(IMGFM,包括 5 个生态需水等级)^[24]以及改进生态水力半径法(AEHRA)计算得到的布哈河和沙柳河生态需水量进行对比,结果如图 10 所示。限于篇幅,此处仅列举平水年($P=50\%$)和枯水年($P=95\%$)的计算结果。对比表明,不同水平年,改进生态水力半径法对布哈河生态需水的计算结果均与 Tennant 法“中”生态需水等级接近,对沙柳河生态需水的计算结果均位于 Tennant 法“非常好”生态需水等级之上,并与逐月频率法“适宜”生态需水等级接近。总体而言,改进生态水力半径法与其他方法计算的结果差异度属于相差较小等级^[18],计算得到的河流生态需水量基本可以满足维持河流基本生态功能的需要。

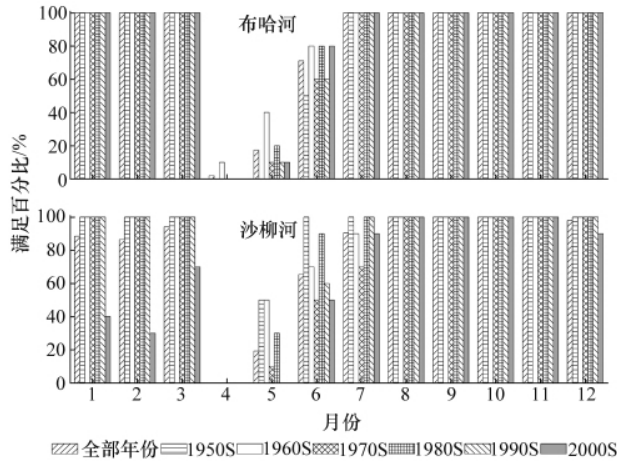
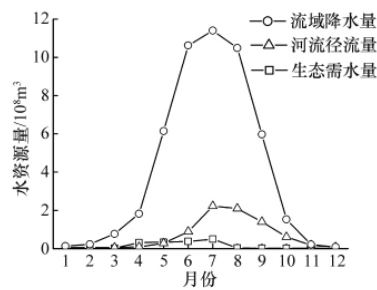


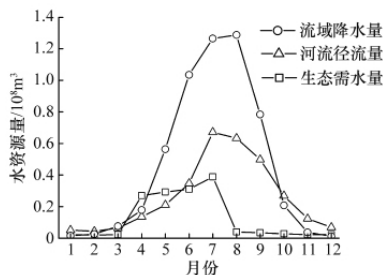
图 8 不同年代生态需水满足程度对比

Fig. 8 Satisfaction degree of environmental flow requirements in different decades



(a) 布哈河

(a) Buha River



(b) 沙柳河

(b) Shaliu River

图 9 流域降水量、河流径流量与生态需水量对比

Fig. 9 Comparison between watershed precipitation, river discharge capacity and environmental flow requirements

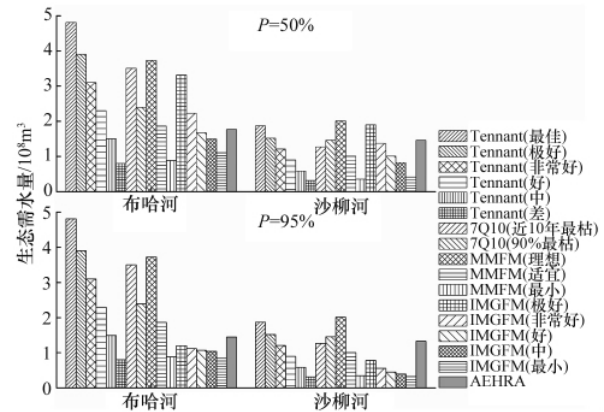


图 10 不同方法生态需水量计算结果对比

Fig. 10 Comparison between environmental flow requirements calculated by different methods

3 结论

基于水生生物信息研究河流生态需水规律,可以在优先保障河流生态用水的前提下合理确定河道外引水的时段和数量,为流域水资源的优化配置提供参考。本文在综合考虑水生生物对于河流水深要求以及生态需水年际差异的基础上,对传统生态水力半径法进行了改进,并以青海湖裸鲤为指示生物研究了青海湖流域主要河流的生态需水特征,得到以下主要结论。

(1) 1958—2009 年布哈河和沙柳河生态需水量分别介于 1.45×10^8 — 2.64×10^8 、 1.26×10^8 — $1.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中平水年 ($25\% < P < 75\%$) 二者分别介于 1.64×10^8 — 1.75×10^8 、 1.43×10^8 —

$1.52 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

(2) 河流生态需水量呈现与天然径流量基本一致的变化趋势,体现了不同水平年生态径流的丰枯差异,但前者的变化幅度明显小于后者,而不考虑年际差异的生态需水计算结果被明显高估。

(3) 4—5 月河流生态需水供需矛盾最为突出,布哈河和沙柳河生态缺水量多年平均分别为 0.29×10^8 、 $0.21 \times 10^8 \text{m}^3$,其中布哈河生态缺水主要是因为中上游地区自然耗水和人为耗水较多,沙柳河生态缺水主要是由于自然降水较少,仅从满足河流生态需水的角度出发,6—11 月两条河流可引水量分别为 6.43×10^8 、 $1.72 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

(4) 通过与其他方法的对比,改进生态水力半径法计算结果较为合理并可以满足维持河流基本生态功能的需要。

参考文献 (References)

- [1] 肖洪浪,程国栋.黑河流域水问题与水管理的初步研究[J].中国沙漠,2006,26(1):1-5.
Xiao Honglang, Cheng Guodong. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 1-5.
- [2] 叶朝霞,陈亚宁,李卫红.基于生态水文过程的塔里木河下游植被生态需水量研究[J].地理学报,2007,62(5):451-461.
Ye Zhaoxia, Chen Yaning, Li Weihong. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 451-461.
- [3] 崔保山,胡波,杨志峰.西南纵向岭谷区河道生态需水计算方法[J].生态学报,2006,26(1):174-185.
Cui Baoshan, Hu Bo, Yang Zhifeng. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 174-185.
- [4] Mazvimavi D, Madamombe E, Makurira H. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(15-18): 995-1006.
- [5] Gregor T A, Johnathan M F, Michael L S. Relating riparian vegetation to present and future streamflows [J]. *Ecological Application*, 1994, 4(3): 544-554.
- [6] Docampo L, Bikuna B G. The basque method for determining instream flows in Northern Spain[J]. *Rivers*, 1995, 6(4): 292-311.
- [7] 李嘉,王余蓉,李克锋,等.计算河段最小生态需水的生态水力学法[J].水利学报,2006,37(10):1169-1174.
Li Jia, Wang Yurong, Li Kefeng, et al. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1169-1174.
- [8] 宋兰兰,陆桂华,刘凌.水文指数法确定河流生态需水[J].水利学报,2006,37(11):1336-1341.
Song Lanlan, Lu Guihua, Liu Ling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(11): 1336-1341.
- [9] 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 Changming, Men Baohui, Song Jinxi. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 42-48.
- [10] 赵长森,刘昌明,夏军,等.闸坝河流河道内生态需水研究—以淮河为例[J].自然资源学报,2008,23(3):400-411.
Zhao Changsen, Liu Changming, Xia Jun, et al. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 400-411.
- [11] 蔡涛,李琼芳,王鸿杰,等.淮河上游生态需水量计算分析[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(6):635-639.
Cai Tao, Li Qiongfang, Wang Hongjie, et al. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, 37(6): 635-639.
- [12] 陈桂琛,陈孝全,苟新京.青海湖流域生态环境保护与修复[M].西宁:青海人民出版社,2008.
Chen Guichen, Chen Xiaoquan, Gou Xinjing. *Protection and restoration of eco-environment in Qinghai Lake watershed* [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2008.
- [13] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.适宜生态流量计算方法研究[J].水科学进展,2007,18(5):745-750.
Chen Minjian, Feng Huali, Wang Liqun, et al. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 745-750.
- [14] 陶元清.青海湖裸鲤种质资源及其实验动物化前景[J].中国比较医学杂志,2005,15(4):229-230.
Tao Yuanqing. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2005, 15(4): 229-230.
- [15] 史建全,祁洪芳.青海湖裸鲤资源增殖放流概述[J].中国渔业经济,2009,27(5):80-84.
Shi Jianquan, Qi Hongfang. *Chinese Fisheries Economics*, 2009, 27(5): 80-84.
- [16] 祁洪芳,史建全.青海湖裸鲤的人工繁殖及苗种的淡水培育技术[J].水产科技情报,2009,36(3):149-151.
Qi Hongfang, Shi Jianquan. *Fisheries Science & Technology Information*, 2009, 36(3): 149-151.
- [17] 郑建平,王芳.大洋河河流生态需水研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):502-504.
Zheng Jianping, Wang Fang. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2006, 34(5): 502-504.
- [18] 王伟,杨晓华,王银堂.滦河下游河道生态需水量[J].水科学进展,2009,20(4):560-565.
Wang Wei, Yang Xiaohua, Wang Yintang. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 560-565.
- [19] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [20] 杨文慧.河流健康的理论构架与诊断体系的研究[D].南京:河海大学,2007.
Yang Wenhui. *Study on theoretical framework and diagnosis system of river health* [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [21] 水利部长江水利委员会.维护健康长江促进人水和谐实施意见[R].武汉:长江水利委员会,2005.
Changjiang Water Resources Commission, The Ministry of Water Resources of PR China. *Maintaining healthy Changjiang, promoting the harmony between people and water* [R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 2005.
- [22] 珠江水利综合技术中心,珠江流域水资源保护局.珠江河流健康评价指标体系研究报告[R].广州:珠江流域水资源保护局,2007.
Zhujiang River Commission Integrated Technology Center, Pearl River Water Resource Protection Bureau. *Evaluation index system of river health of Pearl River* [R]. Guangzhou: Pearl River Water Resource Protection Bureau, 2007.
- [23] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002,33(9):14-19.
Ni Jinren, Cui Shubin, Li Tianhong, et al. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(9): 14-19.
- [24] 马育军,李小雁,张思毅,等.基于改进月保证率设定法的青海湖流域河流生态需水研究[J].资源科学,2011,33(2):265-272.
Ma Yujun, Li Xiaoyan, Zhang Siyi, et al. *Resources Science*, 2011, 33(2): 265-272.

(责任编辑 吴晓丽)