DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.03.10

渭河生态基流时空分异特征及保障率分析

王一艳[1], 杨 涛[1,2], 王 伟[1], 张 倩[1]
(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 2.污染暴露与生态环境健康国际联合研究中心, 陕西 西安 710062)

摘 要: 以渭河为研究对象,依据渭河干流北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县6个主要断面1971-2014年的水文实测资料,基于河流典型生态环境特征划分河流生态类型,并对其生态基流量进行优化计算,在此基础上揭示渭河生态基流时空分异特征及生态基流保障率。结果表明:选取北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县断面枯水期的最小值作为相应断面的生态基流量推荐值,分别为5.68、2.51、11.39、25.33、77.26和61.86 m^3/s;从时间变化看,各断面生态基流年内最大值均集中在汛期(7-9月),最小值集中在枯水期(12-次年3月)。除汛期外,各断面的生态基流月均值变化轨迹整体一致,各断面生态基流除8月与1、2、3、4、6、10、11、12月差异不显著($P > 0.05$)外,其余各月两两之间差异均显著($P < 0.05$);从空间分布来看,林家村断面1月生态基流量最小,华县断面8月生态基流量最大,体现出渭河上游生态基流量不足而下游河道泥沙淤积的生态环境特征;生态基流量总体上呈上游低下游高的特征,除魏家堡和华县断面月均生态基流量差异不显著($P > 0.05$)外,其余各断面之间差异均显著($P < 0.05$)。

关键词: 生态基流; 时空分异; 保障率; 水资源; 渭河
中图分类号:P333 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)03-0066-10

Spatio-temporal differentiation characteristics and guarantee rate of the environmental flow in Weihe River

WANG Yiyan[1], YANG Tao[1,2], WANG Wei[1], ZHANG Qian[1]
(1. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119, *China*; 2. *International Joint Research Centre of Shaanxi Province for Pollutants Exposure and Eco-environmental Health, Xi'an* 710062, *China.*)

Abstract: Taking Weihe River as the research object, based on the hydrological survey data of six main sections which are Beidao, Linjiacun, Weijiabao, Xianyang, Lintong and Huaxian of the Weihe River mainstream from 1971 to 2014, we classified the ecological types and calculated the optimal environmental flows (e-flows) of the sections according to their respective environmental characteristics. On this basis, the spatio-temporal differentiation characteristics and guarantee rate of e-flow in Weihe River are revealed. According to the results, the minimum runoff values of the sections are recommened as their e-flows which are 5.68 m^3/s, 2.51 m^3/s, 11.39 m^3/s, 25.33 m^3/s, 77.26 m^3/s and 61.86 m^3/s respectively for Beidao, Linjiacun, Weijiabao, Xianyang, Lintong and Huaxian sections during dry season. The maximum value of e-flow of each section occurs in the flood season (from July to September), and the minimum value in the dry season (from December to March). Except for the flood season, monthly average of e-flow in each section is consistent as a whole. The e-flows of the six sections have no significant difference ($P > 0.05$) between August and January, February, March, April, June, October, November and December, but there is a significant difference between any other two months ($P < 0.05$). Spatially, the e-flow of Linjiacun section in January is the smallest and Huaxian section in August is the

收稿日期:2019-10-08; **修回日期**:2020-01-02
基金项目:国家自然科学基金项目(41571512);陕西省自然科学基金项目(2019JM-282);中央高校基础研究基金项目(GK201903080)
作者简介:王一艳(1995-),女,山西朔州人,硕士研究生,研究方向为河流生态基流。
通讯作者:杨 涛(1979-),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为流域水生态管理。

largest, which reflects the environmental characteristics of insufficient e-flow in the upstream and sediment deposition in the downstream of Weihe River. The e-flow is generally low in the upstream and high in the downstream. There is no significant difference in monthly e-flow ($P > 0.05$) in Weijiabao and Huaxian; however the differences among the other sections are significant ($P < 0.05$).

Key words: environmental flow (e-flow); spatio-temporal differentiation; guarantee rate; water resources; Weihe River

1　研究背景

随着我国经济社会的发展,水资源的过度开发利用,引发了水资源短缺、水土流失、水污染加剧以及河道径流量锐减、生物多样性降低、植被退化等生态环境问题,导致河流生态用水无法得到保证[1],河流生态基流量优化计算及配置成为国内外流域水资源管理及生态恢复研究的热点与难点问题。

国外对生态基流研究开展较早,研究主要集中在保护渔业资源和生物多样性、美化生态环境、满足游览与通航需求、维护河流生态系统平衡以及流域生态保护可再生发展等几个方面[2-5],形成了相对成熟的计算方法及理论体系。我国河流生态基流的研究起始于 20 世纪 70 年代对西北干旱地区河流最小生态流量的计算和讨论[6],此后针对日益严重的断流、水污染问题,我国开展了大量的河流生态基流研究,建立了相对完善的生态基流概念内涵,但计算方法的研究相对较少。

目前河流生态基流量相关的估算方法可划分为水文学法、水力学法、生境模拟法、综合分析法、水文-生物分析法和其他方法[7-8]。水文学法对水文资料要求较少,计算过程简单,应用方便,但对河流状况进行了简化,没有考虑生物信息及其相互影响,准确性不高[9]。生境模拟法需大量实测数据,但相关生物资料难以获取,应用受到限制。综合分析法和水文-生物分析法[10-11]在河流生态基流评估实践中的应用较为广泛。刘昌明等[12]针对现有方法的不足,提出了同时考虑河道信息和水生生物信息的生态水力半径法。该法将河道内满足特征鱼类产卵期的适宜流速作为生态流速,计算出河道过水断面的生态水力半径,根据该水力半径计算得到的流量即为生态需水量。与传统的水力法相比[13],该法所涉及的水力学参数较多,可根据特征鱼类在不同季节甚至不同月份的生态流速计算出相应的生态需水量,能反映出生态需水量年内时间变化特征。

渭河作为流经关中地区的主要河流,受人为活动影响较大,上游河段由于受农业活动的影响,生态基流量不足,中游河段水质污染严重,下游河道泥沙淤积[14-15]。

本文根据渭河干流北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县 6 个断面的生态环境特征,对河流生态类型进行划分,对渭河干流生态基流量进行优化计算,并揭示生态基流量时空分异特征,拟为渭河水资源优化配置和水生态恢复提供科学依据。

2　数据与方法

2.1　研究区域概况

渭河起源于甘肃省定西市渭源县西南海拔 3 495 m 的鸟鼠山北侧,是黄河右岸的最大一级支流,流经甘肃、宁夏、陕西 3 个省,其中主要经过今甘肃省的渭源、武山、甘谷、天水市北道区 4 县(区)、陕西省关中平原的宝鸡、杨凌、咸阳、西安和渭南 5 市(区),渭河流域水系及主要水文站分布如图 1 所示。渭河全长 818 km,流域总面积为 13.48×10^4 km^2,降水多集中在夏秋两季,流域内多年平均降雨量 440 ~ 607 mm,年蒸发量 1 271 ~ 1 657 mm。渭河在陕西境内全长 502.4 km,是陕西人民的“母亲河”,在陕西乃至整个西北地区具有重要的战略地位。然而,近年来由于水源不足、水质污染等因素,渭河水资源严重短缺,日缺水量约 55×10^4 t[14]。据 2007 年完成的《陕西省黄河流域入河排污口普查登记报告》显示,渭河废污水年排放量达 7.05×10^8 t,大量未经处理的生活污水和工业废水破坏了河流生态系统的结构和功能,严重威胁到城乡居民的饮水安全。水量短缺和生态基流量无法保障导致河道泥沙淤积、河流自净能力不足,成为制约经济社会发展的主要问题。

2.2　数据来源

2.2.1　*水文数据*　本研究选取的渭河干流北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县断面 1971 - 2014 年的实测大断面资料,包括月平均流量、月平均流速、河底高程、水位等,来源于中华人民共和国水文年鉴《黄河流域水文资料》。其中水力坡降 J 以及河道糙率 n 根据文献资料[16]确定,如表 1 所示。

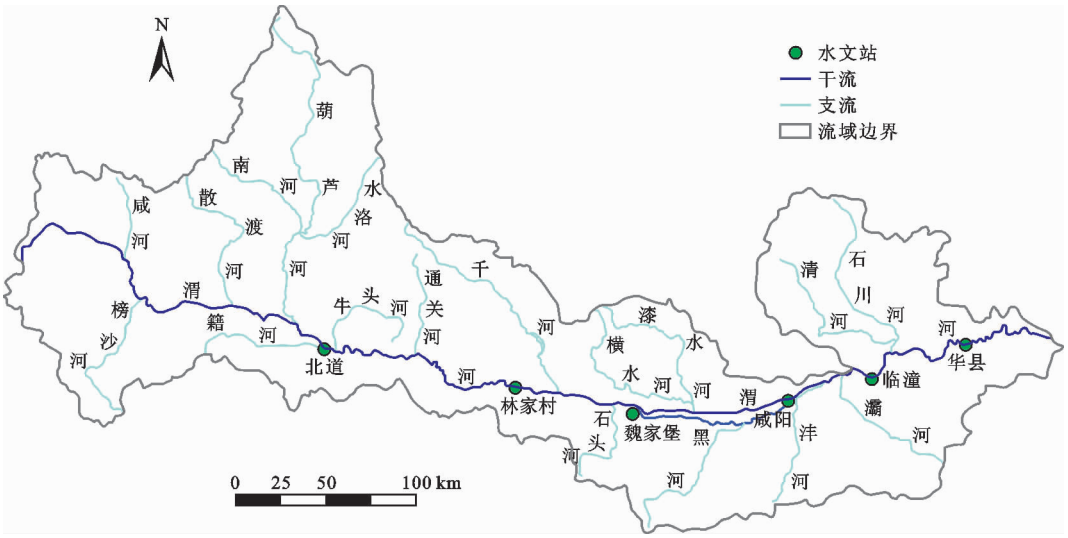

图 1 渭河流域水系及主要水文站分布图

表 1 各断面所在河段的水力坡降及河床糙率取值

断面名称	水力坡降 J/%	河道糙率 n
北道	0.210	0.029
林家村	0.205	0.026
魏家堡	0.090	0.028
咸阳	0.041	0.029
临潼	0.047	0.026
华县	0.024	0.025

2.2.2 水质指标 高强度的人类活动对渭河水质产生了严重的负面影响,河流受到严重污染。渭河主要污染物为化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3—N)、5 日生化需氧量(BOD_5)、挥发酚和石油类。其中,作为地表水有机污染指标的 COD 浓度对河流水生生物构成了严重威胁,并导致生态系统功能退化,在河流生态恢复研究中值得特别关注[15-16]。因此,本文将 COD 浓度作为渭河水质污染的特征指标。按照 2004 年陕西省水利厅组织编制的《陕西省水功能区划》,渭河干流主要断面的 COD 浓度现状值和目标值如表 2 所示。

表 2 渭河干流主要断面的 COD 浓度现状值和目标值

断面名称	现状值/(mg·L^{-1})	目标值/(mg·L^{-1})	到下游的距离/km
北道	30.0	20.0	90.0
林家村	20.0	15.0	65.0
魏家堡	53.5	30.0	60.0
咸阳	58.4	30.0	54.0
临潼	59.2	30.0	84.0
华县	43.8	30.0	73.1

2.2.3 泥沙资料 本文含沙量资料来自中华人民共和国水文年鉴《黄河流域水文资料》,从中选取了渭河干流各断面 1971 – 2014 年的逐月平均含沙量。

2.3 渭河鱼类产卵期生态流速的确定

2.3.1 特征鱼类的确定 北京师范大学徐宗学教授团队于 2011 – 2013 年在渭河流域进行的 4 次鱼类调查结果表明,鲤科鱼类和鳅科鱼类是渭河流域鱼类群落结构的优势类群[17],因此选择鲤科的鲤鱼和鲫鱼以及鳅科的泥鳅[18-19]作为渭河河道内保护的水生生物指示物种。

2.3.2 生态流速的确定 流速是影响鱼类产卵繁殖的重要因素,根据渭河上、中、下游优势鱼类,选取各河段特征鱼类在产卵期所需流速的最大值,作为该河段的生态流速[20]。渭河 3 种常见鱼类产卵期的流速要求见表 3。

表 3 渭河 3 种常见鱼类产卵期的流速要求

鱼的种类	喜爱流速/(m·s^{-1})	临界流速/(m·s^{-1})
鲤鱼 Cyprinus carpio	0.30 ~ 0.80	0.80
鲫鱼 Carassius auratus	0.30 ~ 0.60	0.93
泥鳅 Misgurnus anguillicaudatus (Cantor)	0.30 ~ 1.04	1.04

根据表 3 中鱼类的流速要求,同时结合这 3 种

鱼类产卵季节综合分析[21-23],所选取的渭河各主要断面鱼类所需生态流速(V_E)可确定如下:鲤鱼产卵期为4-7月,V_E取0.30~0.80 m/s;鲫鱼产卵期为4-6月,V_E取0.30~0.60 m/s;泥鳅产卵期为5-6月,V_E取0.30~1.04 m/s,其余非产卵期V_E均取0.30~0.80 m/s[24-29]。

2.4 生态基流量分类评估方法

2.4.1 基于典型生态环境特征的河流生态类型划分　渭河面临的生态环境问题,主要表现在3个方面:一是水资源短缺严重,供需矛盾突出;二是水质污染严重,多数断面水质达不到水域功能标准;三是水沙关系不平衡,下游河道泥沙淤积严重[30]。基于此,将河流生态类型划分为3大类:

(1)生态修复型(E型)。林家村断面处于渭河关中段上游,水质较好,目前为II类水质[15-16],存在的问题是水量短缺。在用水高峰季节,由于生态基流量不足,造成河道干枯以致断流,影响生物生存。该类型河段水生态恢复目标是恢复关键性鱼类的栖息地。

(2)水质污染型(W型)。渭河北道断面位于甘肃天水段下游,靠近城镇,近年来水质污染较严重。魏家堡、咸阳断面处于渭河中游,受人为活动影响大,断面水质为V类以上[31-32],均不能满足水质标准,基本上丧失了水域功能要求。该类型河段水生态恢复目标是满足水功能区水质。

(3)泥沙淤积型(S型)。临潼、华县断面处于渭河下游,由于三门峡水库多年高水位蓄水运行造成回水影响等原因,河床淤积使河道不断抬升,河道泥沙淤积严重,致使下游河道萎缩,主河槽过水断面锐减,渭南以下的渭河成为名副其实的地上悬河[31]。该类型河段水生态恢复目标是减少泥沙淤积,提高断面过水能力。

2.4.2 生态修复型(E型)河段生态基流量估算　生态修复型河段即林家村断面达到河道生态基流量的要求,才能保持河床天然特征和水生生物多样性。根据该修复目标应用生态水力半径法估算得到的生态基流量可为水资源优化配置提供科学合理的参考,从而解决其河道断流、生物栖息地被破坏及多样性减少等问题。该类型河段生态基流量根据公式(1)~(2)计算,具体计算步骤见文献[13]。

$$R_E = n^{3/2} V_E^{3/2} J^{-3/4} \tag{1}$$

$$Q_E = \frac{1}{n} R_E A J^{-3/4} \tag{2}$$

式中:V_E为生态流速,m/s;Q_E为生态需水量(基流量),m^3/s;R_E为生态流速所对应的生态水力半径,m;A为过水断面面积,m^2;n为河道糙率;J为水力坡度。

2.4.3 水质污染型(W型)河段生态基流量估算　北道、魏家堡、咸阳断面所在研究河段需满足河道生态基流量的要求,才能恢复水体自净功能和改善水质,进而增加生物多样性。因此,在该目标下采用生态水力半径法与一维稳态水质模型结合估算生态基流量[33],解决水污染严重和水质恶化问题。控制断面目标污染物浓度根据一维稳态水质模型[34]确定:

$$C(x) = C_0 \exp\left[-\frac{Kx}{86400 V_W}\right] \tag{3}$$

式中:$C(x)$为控制断面目标污染物浓度,mg/L;C_0为控制断面现状污染物浓度,mg/L;K为污染物降解的速率常数,d^{-1},本文取0.2/d[29];x为排污口下游断面距控制断面纵向距离,m;V_W为断面平均流速,m/s。

根据公式(4)确定水质污染型河段的生态流速:

$$V_o = \max(V_E, V_W) \tag{4}$$

根据最优流速得到最优生态水力半径,利用北道、魏家堡和咸阳断面$R-Q$拟合关系,从而得到符合水质目标条件下的生态基流量。

2.4.4 泥沙淤积型(S型)河段生态基流量估算　渭河属于多沙河流,易于淤积,泥沙预计主要集中在下游,尤其是临潼断面以下的河段。临潼、华县断面需达到一定量的河道生态基流,才能平衡水沙关系和保持河床自然形态,从而恢复河流健康。在该目标下采用生态水力半径法与输沙平衡结合估算生态基流量[35],提高汛期流量,解决河道泥沙淤积、河床抬高及防洪安全等问题。

输沙需水量计算关键是选择水流挟沙力公式[36-37],本文所采用的公式如下:

$$S = 1.07 \times \frac{V_s^{2.25}}{R^{0.74} \times \omega^{0.77}} \tag{5}$$

式中:S为某一河段或断面平均含沙量,kg/m^3;R为水力半径,m;V_s为断面平均流速,m/s;ω为悬移质沉速,cm/s,在渭河下游河道挟沙力计算中,ω = 0.004726 cm/s或ω = 0.06426 cm/s,本文取0.004726 cm/s[37]。

再根据公式(6)计算泥沙淤积型渭河河段的生态流速:

$$V_o = \max(V_E, V_S) \tag{6}$$

根据最优流速得到最优生态水力半径,利用临潼和华县断面$R-Q$拟合关系,从而得到河流输沙

所需生态基流量。

3 结果分析与讨论

3.1 渭河逐月生态基流量计算

3.1.1 渭河生态基流量计算结果 据上述优化方法求得各个断面多年月平均生态基流量,如图 2 所示。由于生态基流量是保证生态系统健康的最低流量,因此选取各断面枯水期的最小值作为生态基流量推荐值[38],即渭河干流北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县断面的生态基流量推荐值分别为 5.68、2.51、11.39、25.33、77.26、61.86 m^3/s。从图 2 可以明显地看出汛期(7 -9 月)和非汛期(10 -次年 6 月)的基流量变化过程。除汛期外,各断面的生态基流量变化趋势相同,临潼、华县断面在汛期出现明显的峰值,这是由于渭河属于多沙河流,输沙多集中在汛期,尤其是临潼断面以下的河段在汛期容易淤积。临潼、华县断面汛期生态基流量较大,临潼断面汛期生态基流量最大值出现在 7 月,为505.66 m^3/s,华县断面汛期生态基流量最大值出现在 8 月,为 896.95 m^3/s。

与徐宗学等[38]、武玮等[39]的研究进行对比分析,本文各个断面生态基流量计算结果偏大,尤其是魏家堡、咸阳、临潼、华县 4 个断面,其原因为徐宗学等[38]选取了渭河流域受人类活动影响较小的 1961 -1985 年的径流资料。武玮等[39]选取渭河流域受人类活动影响较小的 1961 -1980 年的径流资料,其多年平均生态基流量计算结果与本文相比,林家村断面结果基本相符,咸阳、华县断面计算结果偏小。杨涛等[40]对渭河林家村断面 1960 -2000 年的实测流量进行计算,得到的林家村断面生态基流量结果与本文相符。可见,本研究的计算结果符合渭河流域开展的相关研究,且能体现河流生态环境特征差异。同一条河流在不同时期受到不同因素的影响,其各个断面所需生态基流量会随之变化,因此水资源管理者应及时对应用后的河流生态基流量进行适应性管理[38],以便更好地维护河流生态健康。

3.1.2 渭河不同水平年生态基流量计算结果 生态基流量优化法中未区分不同水平年的差异,对计算结果可能会产生一定影响。为此,对丰、枯水年两种水平年分别进行计算。根据不同水平年分别计算逐月生态基流量,可以反映出河道年际径流丰枯变化对生态基流量的影响,更符合实际。表 4 为各断面不同水平年逐月生态基流量的计算结果,北道断面丰、枯两种水平年下非汛期平均生态基流量分别为 4.95 和 4.45 m^3/s,林家村断面分别为 8.39 和 4.77 m^3/s,魏家堡断面分别为 37.53 和 15.67 m^3/s,咸阳断面分别为 57.79 和 21.75 m^3/s,临潼断面分别为 93.11 和 59.20 m^3/s,华县断面分别为 114.13和 57.94 m^3/s。以林家村断面在丰、枯水年下的生态基流量月际变化为例,如图 3 所示,多年平均生态基流量与不同水平年径流量的变化趋势保持一致,丰水年基流量高于枯水年,区别最明显的是汛期基流量的差异,同时月基流量汛期高于非汛期,这与实际情况相符。武玮等[39]用 Tennant 法计算得出林家村断面丰、枯水平年下的非汛期平均生态基流量分别为 6.98 和 4.10 m^3/s;咸阳断面丰、枯水平年下的非汛期平均生态基流量分别为 17.84 和6.58 m^3/s;华县断面丰、枯水平年下的非汛期平均生态基流量分别为 21.59 和 8.90 m^3/s,与本文相比,除林家村断面基本相符,咸阳、华县断面整体差异较大。

3.2 渭河生态基流量时空分异特征

3.2.1 渭河生态基流量的逐月变化特征 由北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼和华县 6 个断面的多年平均情形下的逐月生态基流量变化(图 2)可看出,除汛期外,渭河干流各断面生态基流量月均值变化较一致。各断面生态基流量年内最大值均集中在汛期,非汛期均相差不大,反映出渭河干流汛期和非汛期的径流变化过程。除汛期和非汛期生态基流量外,考虑到鱼类产卵期,渭河上游代表鱼类产卵期 4 -7 月、渭河中游代表鱼类产卵期 4 -6 月、渭河下游代表鱼类产卵期 5 -6 月的生态基流量相对汛期较小,但相对其他月份较大。同时,运用相关分析统计方法可得,各断面月均生态基流量除 8 月与 1、2、3、4、6、10、11、12 月差异不显著 ($P > 0.05$) 外,其余各月两两之间差异均显著($P < 0.05$)。

3.2.2 渭河生态基流量的空间分异特征 渭河各断面 1 -12 月生态基流量空间分布如图 4 所示,从图 4 中空间分布特征来看,生态基流量总体呈上游低下游高的特征。其中汛期各断面生态基流量排序为北道 > 林家村 > 魏家堡 > 咸阳 > 临潼 > 华县。鱼类产卵期内(4 -7 月)需要较大的生态基流量,排序为临潼 > 华县 > 咸阳 > 魏家堡 > 林家村 > 北道;非产卵期则为华县 > 临潼 > 咸阳 > 魏家堡 > 林家村 > 北道,各断面生态基流量的差异主要是由于渭河各断面特征鱼类产卵期和生态流速不同,加之各断面河道形态也不同。运用相关分析统计方法得,除魏家堡和华县断面月均生态基流量差异不显著 ($P > 0.05$) 外,其余各断面之间差异均显著($P < 0.05$)。

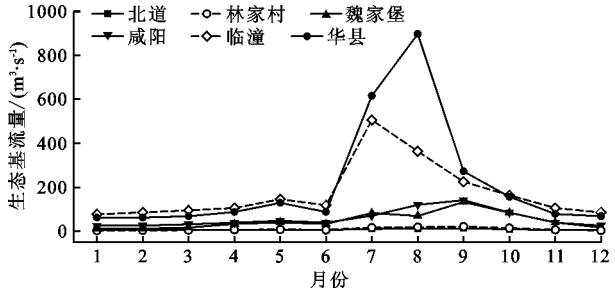

图 2　渭河各断面多年月平均生态基流量

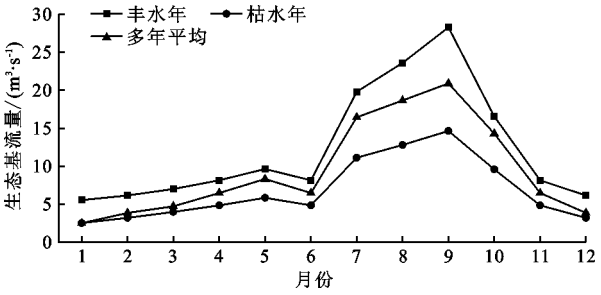

图 3　林家村断面不同水平年的生态基流量月际变化

3.3　渭河生态基流量保障率分析

生态基流保障率反映渭河生态基流量的盈亏情况[41]。生态基流量月保障率公式为:

$$P_n = \frac{D_{(Q_D \geq Q_E)}}{1\text{ 个月的天数}} \times 100\% \qquad (7)$$

式中:P_n 为月份 n 的生态基流量月保障率,%;Q_D 为各站日平均流量,m^3/s;Q_E 为各站月均生态基流量,m^3/s。

根据渭河各断面 1971 – 2014 年日平均流量,以及汛期(7 – 9 月)、非汛期(10 – 次年 6 月)和枯水期(12 – 次年 3 月)计算生态基流月保障率,计算结果如图 5 所示。由图 5 可看出,除北道断面 10 月份日均流量能够满足生态基流量的要求外,其余各个断面各个月份均不能满足生态基流量的要求,各个断面不同月份的生态基流量月保障率有着明显的差异,除林家村断面外,其余断面汛期的生态基流量月保障率最高,非汛期保障率较低,枯水期问题最为突出,其中魏家堡断面枯水期生态基流月保障率均不足 10%,临潼断面的 2 月、华县断面的 1、2 和 3 月保障率为 0,说明该河段生态基流量无法满足泥沙冲淤的需求,影响了河段的基本水体功能。

进一步分析图 5 可知,北道断面最低生态基流量月保障率为 33.33%,林家村断面最低为 35.12%,魏家堡断面最低为 5.38%,即每月仅 2 d 能够满足生态基流的要求,咸阳断面最低为9.68%,即每月只有 3 d 能够满足生态基流的要求,而临潼

表 4　各断面不同水平年逐月生态基流量计算结果　　m^3/s

断面名称	水平年类型	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	非汛期平均	汛期平均
北道	丰水年	2.02	2.02	3.38	4.95	6.74	4.95	16.39	19.52	22.96	13.57	4.95	2.02	4.95	19.62
	枯水年	3.86	3.86	4.04	4.32	4.71	4.32	7.74	8.93	10.32	6.73	4.32	3.86	4.45	9.00
	多年平均	5.68	5.68	5.77	6.00	6.39	6.00	9.99	11.52	13.34	8.74	6.00	5.68	6.22	11.62
林家村	丰水年	5.55	6.15	7.00	8.15	9.64	8.15	19.80	23.59	28.27	16.55	8.15	6.15	8.39	23.88
	枯水年	2.53	3.20	3.98	4.86	5.85	4.86	11.12	12.80	14.64	9.59	4.86	3.20	4.77	12.85
	多年平均	2.51	3.85	4.72	6.47	8.31	6.47	16.44	18.64	20.90	14.30	6.47	3.85	6.33	18.66
魏家堡	丰水年	27.89	27.89	30.43	33.78	38.07	33.78	66.81	57.65	103.78	77.47	38.07	30.43	37.53	76.08
	枯水年	6.69	6.69	8.41	10.74	14.68	10.74	47.26	37.47	84.32	58.28	14.68	10.13	15.67	56.35
	多年平均	11.39	11.39	16.70	33.23	40.19	33.23	82.53	69.52	133.08	84.58	40.19	16.70	31.96	95.04
咸阳	丰水年	64.07	57.77	53.45	51.62	52.81	51.62	66.22	121.26	150.85	79.42	51.62	57.77	57.79	112.77
	枯水年	12.35	14.88	17.98	21.73	26.17	21.73	37.42	61.28	71.36	44.38	21.73	14.88	21.75	56.69
	多年平均	25.33	25.64	31.60	38.94	47.79	38.94	70.67	120.27	141.50	85.02	38.94	25.64	39.76	110.81
临潼	丰水年	72.94	77.13	82.43	88.98	113.75	119.09	570.54	292.84	295.64	117.56	88.98	77.13	93.11	386.34
	枯水年	21.94	32.76	44.44	56.94	93.44	97.70	378.94	358.52	165.43	95.88	56.94	32.76	59.20	300.96
	多年平均	77.26	85.52	95.00	105.78	145.79	117.94	505.66	363.71	225.28	163.67	105.78	85.52	109.14	364.88
华县	丰水年	100.10	94.13	92.47	101.73	131.08	171.67	449.00	977.74	816.86	139.14	98.69	98.15	114.13	747.86
	枯水年	27.02	32.47	43.74	58.71	93.55	90.72	346.47	536.65	189.48	90.22	48.86	36.17	57.94	357.53
	多年平均	61.86	61.86	68.19	87.75	129.26	87.75	616.06	896.95	272.54	156.92	78.49	68.19	88.92	595.18

注:非汛期为 10 – 次年 6 月;汛期为 7 – 9 月。

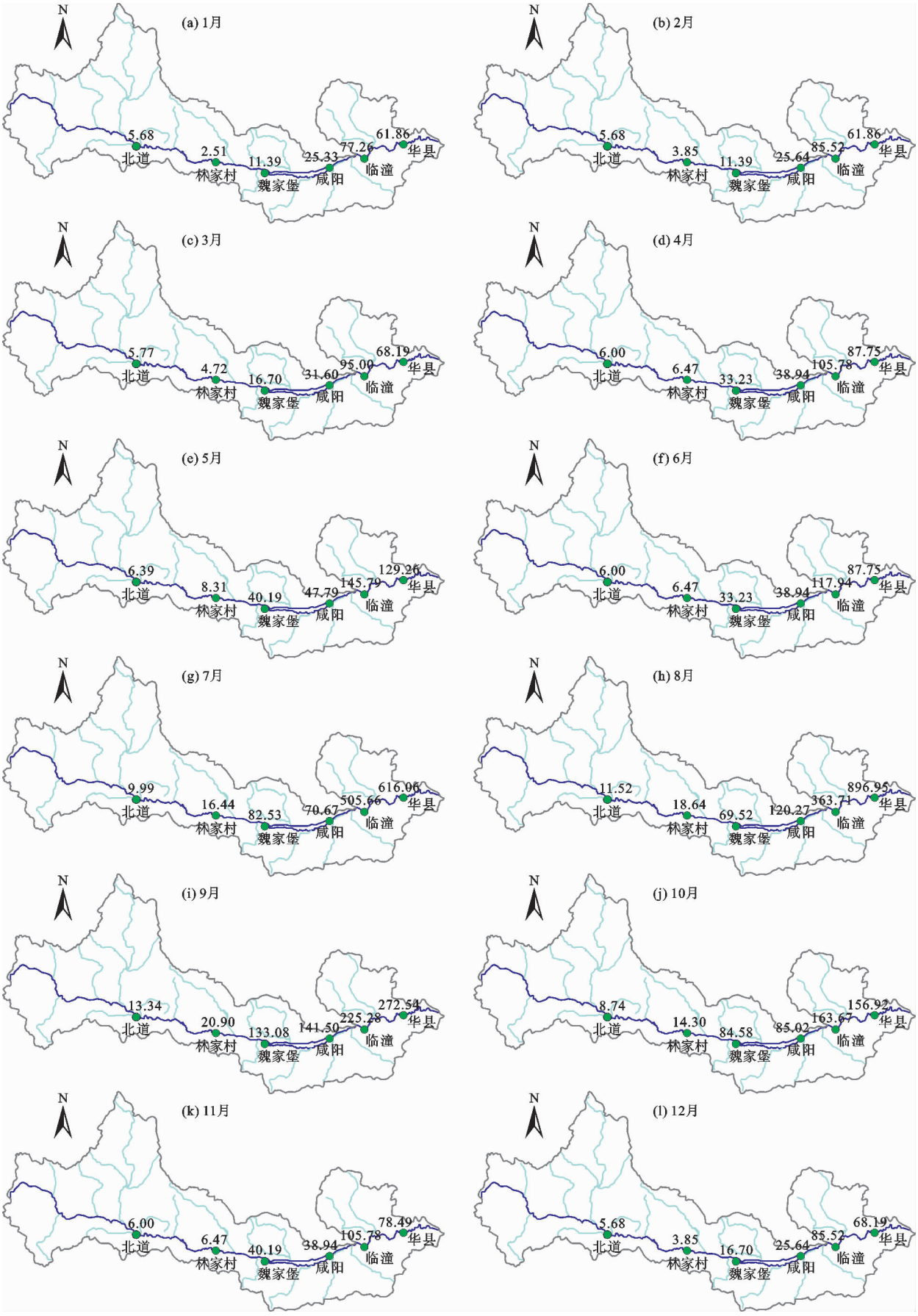

图 4 渭河各断面 1 – 12 月生态基流量空间分布(单位:m^3/s)

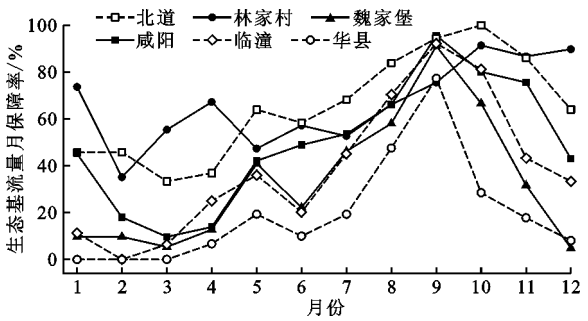

图 5　渭河各断面生态基流量月保障率

和华县断面生态基流量月保障率最低为 0。其中林家村断面生态基流量月保障率相对最高,平均保障率为66.51%,整体趋势相比其他断面差别较大,其中 1、4 和 12 月份比汛期生态基流量月保障率高,可能是渭河林家村河段上游宝鸡峡引渭农田灌溉工程无规律、大范围的引水所致。究其根源,人为活动影响占主导作用。林家村断面目前存在的主要问题是水量短缺,近年来降水量的减少导致渭河来水量减少,1 年中最多有 4 个月处于断流状态,主要集中在 2、3 和 5 月,因此建议从外流域调水以保证河道不断流,从而保护该河段具有经济价值的鱼类,如鲤鱼、鲫鱼和鲇鱼[36]。北道断面位于城镇附近,受人为活动影响更大,相比林家村生态基流量月的保障率较低。魏家堡、咸阳断面周围工业企业较多,目前水质污染较为严重,均为劣Ⅴ类水,河流生态环境功能遭受破坏,应考虑整改周围企业生产环境状况以及对魏家堡水电站发电引水运行进行优化调度,加大枯水期断面下泄水量。临潼、华县断面处于渭河下游,需要同时承接来自上游及支游的泥沙含量,因此河道泥沙淤积严重。为阻止下游淤积情况恶化,必须保证有足够的输沙水量,但输沙需水量常常难以满足,出现了生态基流量月保障率最低为 0 的情况,针对该情况应考虑引江济渭入黄调水工程的受水需求,以满足渭河下游的供水目标,合理配置区域水资源。

3.4　生态基流评价结果的验证

为了进一步验证本文所用方法的计算结果,同时采用 Tennant 法[13]对该 6 个断面进行生态基流量的计算,然后将其与本文计算结果对比。Tenant 法与本文对生态基流的优化方法(简称 AEHRA)计算结果对比如图 6 所示。

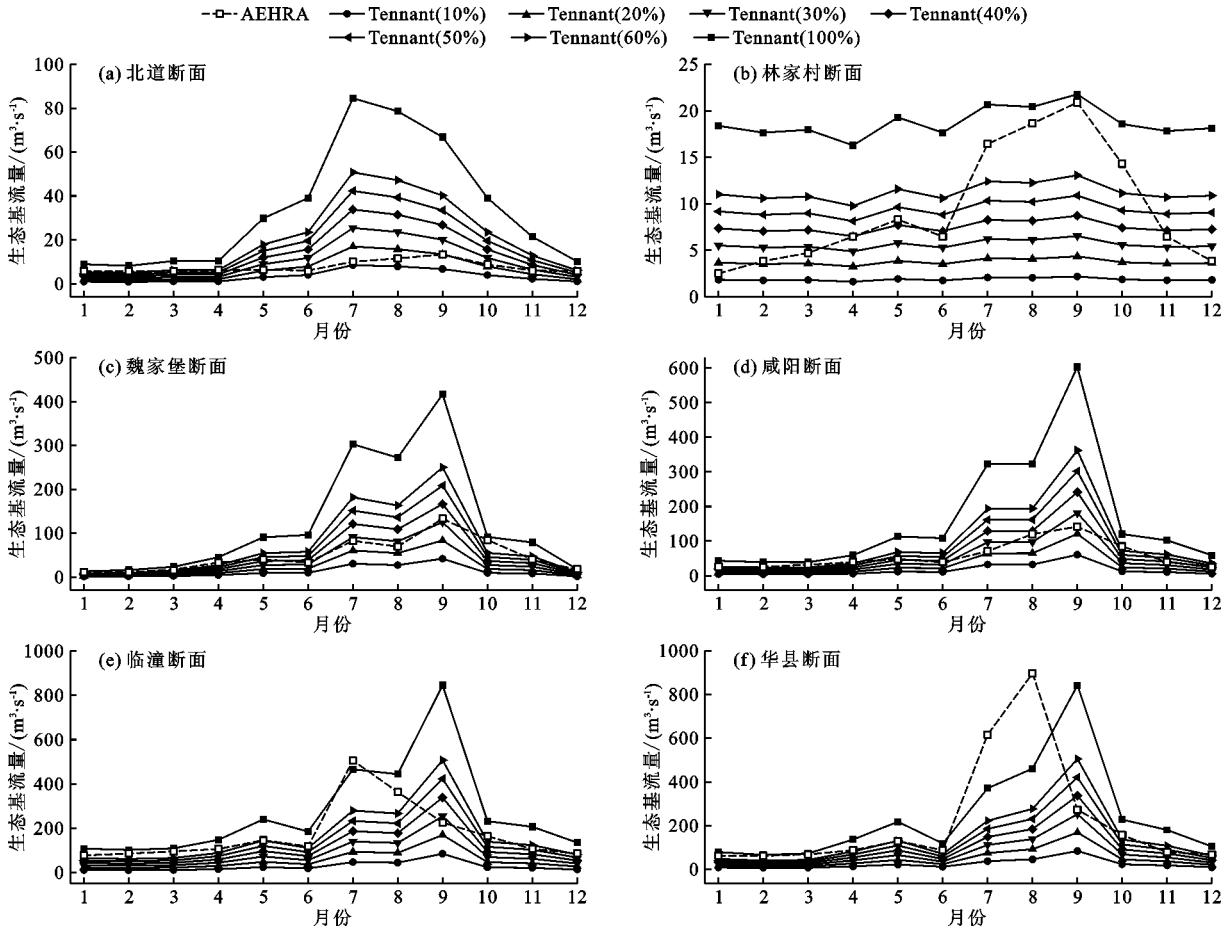

图 6　渭河各断面 AEHRA 与 Tennant 法生态基流量计算结果对比

图 6 表明,渭河的降雨主要集中在 7 -9 月份,这一时期为最大流量,AEHRA 计算结果的最大流量均在这 3 个月份,符合实际。除北道外,其余各断面逐月生态基流量趋势变化较明显,主要集中在汛期。除华县汛期(7 和 8 月)输沙需水量较大,处于 Tennant 法标准的“最佳”~“最大”之间,其余断面计算结果均介于 Tennant 法标准的“差”~“最佳”之间。其中林家村逐月生态基流量相差最大,尤其是汛期,林家村位于渭河关中段上游,建有宝鸡峡引渭农田灌溉枢纽工程[41],受人为因素的影响,汛期相对需水量较大。临潼、华县逐月生态基流量相差较大,汛期最为突出,是因为渭河下游泥沙淤积严重,输沙需水量大。总体而言,本文计算结果处于 Tennant 法的合理范围内,计算得到的生态基流量可以满足河流基本生态功能的需要。

3.5 不确定性与适应性讨论

为了计算方便,本文选取产卵期、汛期具有代表性的时间段来说明计算,在实际的水资源管理调控中,还需要实践来验证。同时本文选取鱼类作为指示生物,但所参考的水生生物资料有限,由过去年份实测资料而计算的生态基流量并不能反映未来的生态基流量趋势,也不完全符合河流真实的生物组成情况,只能作为参考。因此选取鱼类作为指示生物在实际中存在滞后性,这就决定了计算结果的不确定性。本文生态基流量的计算是以水生生物恢复、水体自净和输沙排沙 3 个功能目标为切入点来计算的,而 Tennant 法只以生物生存为切入点来计算,面向不同的水生态修复目标,需要选择适宜的生态基流量计算方法。本文所采用的优化计算方法适合于渭河“上游水少,中游水脏,下游水浊”的水环境特点,避免了 Tennant 法未考虑特征鱼类对流速的需求以及计算标准设定的主观性。

4 结 论

本文在识别渭河干流不同河段典型生态环境特征的基础上,针对不同类型的河流特点和修复目标对其进行生态基流量的优化计算,分析渭河干流生态基流时空分异特征及保障率,得出以下主要结论:

(1)在统计 1971 -2014 的水文资料基础上,确定渭河干流北道、林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县断面的生态基流量推荐值分别为 5.68、2.51、11.39、25.33、77.26 和 61.86 m^3/s。

(2)渭河干流各断面月均生态基流最大值集中在汛期(7 -9 月),最小值集中在枯水期(12 -次年 3 月)。除汛期外,其余月均值变化轨迹整体一致,除 8 月与 1、2、3、4、6、10、11、12 月差异不显著($P > 0.05$)外,其余各月两两之间差异均显著($P < 0.05$);从空间分布特征来看,林家村断面 1 月生态基流量最小,华县断面 8 月生态基流量最大,体现出渭河上游生态基流量不足、下游河道泥沙淤积的生态环境特征。生态基流量总体上呈上游小下游大的特征,除魏家堡和华县断面月均生态基流量差异不显著($P > 0.05$)外,其余各断面之间差异均显著($P < 0.05$)。

(3)根据生态基流量计算结果,对渭河干流各断面进行生态基流量保障率分析,得出北道断面年内最低生态基流量月保障率为 33.33%,林家村断面最低为 35.12%,魏家堡断面最低为 5.38%,临潼和华县断面生态基流量月保障率最低为 0,河流生态基流量在一定程度上难以得到保障。因此需要通过生态调度,从其他流域调水以及灌区节水等途径解决,以促进河流生态系统的恢复。

(4)本文所采用的计算方法经过 Tennant 法的验证表明,除华县汛期 7 和 8 月外,其余断面的计算结果均介于 Tennant 法的“差”~“最佳”之间,处于合理范围内。

参考文献:

[1] 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.

[2] MAGILLIGAN F J,NISLOW K H. Changes in hydrologicregime by dams [J]. Geomorphology,2005,71(1 -2):61 -78.

[3] POFF N L,RICHTER B D,ARTHINGTON A H,et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA):a newframework fordeveloping regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biology,2010,55(1):147 -170.

[4] POFF N L,MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocence: Past progress and future prospects [J]. CurrentOpinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6):667 -675.

[5] GIPPEL C J,STEWARDSON M J. Use of wetted perimeterin defining minimum environmental flows [J]. River Research & Applications,1998,14(1):53 -67.

[6] 陈 昂,隋 欣,廖文根,等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6):401 -411.

[7] LAAHA G,BLÖSCHL G. A national low flow estimation procedure for Austria[J]. Hydrological Sciences Journal,

2007,52(4):625 – 644.
[8] 靳美娟. 生态需水研究进展及估算方法评述[J]. 农业资源与环境学报,2013,30(5):53 – 57.
[9] LIU Changming,MEN Baohui. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement[J]. Progressin Natural Science,2007,17(3):320 – 327.
[10] 侯昕玥,徐宗学,任梅芳,等. 基于麦穗鱼生境模拟的渭河宝鸡段生态基流估算[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(3):362 – 368.
[11] 崔 瑛,张 强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学,2010,22(4):465 – 480.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 李英杰,张振文,王亚萍,等. 渭河关中段水污染状况与防治对策[J]. 人民黄河,2015,37(6):53 – 55 + 59.
[15] SONG Jinxi,XU Zongxue,LIU Changming,et al. Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River – The largest tributary of the Yellow River [J]. Hydrological Processes,2007,21(8):1066 – 1073.
[16] 徐宗学,彭定志,庞 博. 河道生态基流理论基础与计算方法 – 以渭河关中段为例[M]. 北京:科学出版社,2016.
[17] 武 玮,徐宗学,殷旭旺,等. 渭河流域鱼类群落结构特征及其受环境因子的影响分析[J]. 环境科学学报,2014,34(5):1298 – 1308.
[18] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries,1981,6(6):21 – 27.
[19] SIMON T P,LYONS J. Application of the index of biotic integrity to evaluate water resource integrity in freshwater ecosystems. Biological assessment and criteria: Tools for water resource planning and decision making[M]. Florida:Lewis Publishers,1995.
[20] ZHAO Changsen,YANG Shentian,LIU Juguo,et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows:A practical method for streamflow regulation and pollution control[J]. Water Research,2018,141:96 – 108.
[21] 贾仰文,王 浩,赵振武,等. 渭河生态环境流量分析与调度实践[M]. 北京:科学出版社,2017.
[22] 朱邦科,谢从新,阳会军,等. 保安湖主要经济鱼类产卵场调查[J]. 水利渔业,1998(4):8 – 10 + 33.
[23] 王益昌,李维平,侯淑敏,等. 黄河陕西段渔业资源现状调查[J]. 淡水渔业,2015,45(2):97 – 101.
[24] 徐宗学,殷旭旺,等. 渭河流域常见水生生物图谱[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
[25] 杨代勤,陈 芳,刘百韬,等. 黄鳝产卵类型及繁殖力的研究[J]. 湖北农学院学报,1994,14(3):40 – 44.
[26] 李修峰,黄道明,谢文星,等. 汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究[J]. 动物学杂志,2006,41(2):76 – 80.
[27] 袁永锋,李引娣,张林林,等. 黄河干流中上游水生生物资源调查研究[J]. 水生态学杂志,2009,2(6):15 – 19.
[28] 徐丽敏,刘红云,刘四凤. 黄河鲤鱼研究进展[J]. 安徽农业科学,2017,45(25):117 – 119.
[29] 陈永柏,廖文根,彭期冬. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):130 – 133.
[30] 王敏捷. 渭河水环境问题与治理对策[J]. 灾害学,2000,15(1):47 – 50.
[31] 王雁林,王文科,杨泽元. 陕西省渭河流域生态环境需水量探讨[J]. 自然资源学报,2004,19(1):69 – 78.
[32] 赵彦伟,杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展,2005,16(3):349 – 355.
[33] 韦鹤平. 环境系统工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
[34] 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):310 – 316.
[35] 宋进喜,刘昌明,徐宗学,等. 渭河下游河流输沙需水量计算[J]. 地理学报,2005,60(5):717 – 724.
[36] 畅建霞,高 凡,王义民. 变化环境下渭河流域水资源演变与配置[M]. 北京:科学出版社,2017.
[37] 冯普林,马雪妍,李 茜,等. 渭河下游悬移质全沙水流挟沙力公式研究[J]. 人民黄河,2012,34(9):1 – 5 + 23.
[38] 徐宗学,武 玮,于松延. 生态基流研究:进展与挑战[J]. 水力发电学报,2016,35(4):1 – 11.
[39] 武 玮,徐宗学,左德鹏. 渭河关中段生态基流量估算研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):68 – 74.
[40] 杨 涛,李怀恩,张亚平,等. 渭河宝鸡市区段河道生态基流量初步研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(5):17 – 22.
[41] 林启才,李怀恩. 宝鸡峡引水对渭河生态基流的影响及其保障研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(11):114 – 119.