



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.05.012

谢悦, 夏军, 张翔, 等. 基于淮河流域中游鱼类不同等级生境保护目标的生态需水[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 76-81, 133. XIE Yue, XIA Jun, ZHANG Xiang, et al. Definition of environmental flow components based on different fish habitat protection goals in the middle reaches of Huai River [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 76-81, 133. (in Chinese)

基于淮河流域中游鱼类不同等级生境 保护目标的生态需水

谢悦^{1,2}, 夏军^{1,2}, 张翔^{1,2}, 柏慕琛^{1,2}

- (1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学), 武汉 430072;
2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心(武汉大学), 武汉 430072)

摘要: 随着社会发展, 生产生活用水长期挤占生态环境用水, 造成河道断流、生境破坏、生态系统恶化等一系列生态环境问题。针对淮河流域目前的水生态环境问题, 以淮河流域中游鱼类为研究对象, 通过分析河段天然流量过程, 以淮河流域生态恢复为目标, 建立鱼类保护目标概念模型, 采用 IHA 及 EFC 指标体系分析天然流量变化特性, 并用 HEG-RAS 模型基于鱼类生态水力需求确定流量值大小, 得出符合天然流量动态变化且满足不同等级生境目标需求的生态需水推荐结果, 可为淮河流域水资源优化配置提供依据。

关键词: 生境目标; 鱼类保护; IHA 分析; HEG-RAS 模型; 生态需水

中图分类号: X176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0076-06

Definition of environmental flow components based on different fish habitat protection goals in the middle reaches of Huai River

XIE Yue^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, BAI Murcheng^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the development of society and economy, water for production and domestic use has occupied the water for environmental use for a long period of time, causing a series of ecological environmental problems, such as river blanking, habitat destruction, and ecosystem deterioration. Aiming at these problems and taking fish in the middle reaches of Huai River as the main object of study, we analyzed the natural river flow process, established a conceptual model for fish protection goals based on the goal of ecological restoration of Huai River, used IHA and EFC index system to analyze the characteristics of natural flow variation, and used HEG-RAS model to determine the quantity of flow based on the eco-hydraulic needs of fish. Thus, we obtained the recommended ecological flow which fits the dynamic changes of natural flow and meets the requirements of different levels of habitat goals. The results can provide a basis for scientific and reasonable use of water resources in Huai River basin.

Key words: habitat goal; fish protection; IHA analysis; HEG-RAS model; environment flow

收稿日期: 2016-06-27 修回日期: 2016-12-05 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1935.029.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2014ZX07204006); 国家自然科学基金(41571028)

Funds: National Science and Technology Major Project on Water Pollution Control and Treatment (2014ZX07204006); National Natural Science Foundation of China(41571028)

作者简介: 谢悦(1992-), 女, 四川简阳人, 主要从事生态水文学方面的研究。E-mail: xieyuesc@whu.edu.cn

通讯作者: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 长期从事系统水文学、基于生态水文的可持续水资源管理方面的研究。

E-mail: xiaj@igsr.nrc.ac.cn

水是河道生态系统的载体,承担着物质迁移转化、能量交换及为水生生物提供生存繁殖空间的作用,健康的河道必须维持一定的水量。随着社会经济的高速发展,生产生活用水不断增加,河道水量不断减少,造成河道断流、水质恶化、生态系统破坏等一系列生态环境问题。如何在经济发展的同时保证水生态环境以及保障河流等生态系统良性发展的生态需水量,已成为当前研究的热点问题。

我国的生态需水研究采用的方法大致可分为水文学法、水力学法及栖息地法^[1]。水文学方法以历史日流量资料为依据,通过变异性分析^[2-3]、频率分析^[4-6]或流量组分分析^[7-9]等统计分析方法确定生态需水值。水力学法大多以河道地形断面条件为依据,通过分析断面水力变化来确定生态需水,如水力半径法^[10-12]、湿周法^[13-14]等。栖息地法的应用研究大多集中在长江流域,以中华鲟、大型底栖动物等珍稀物种的栖息地保护为重点,通过建立流速、水温、水深等参数与栖息地面积关系曲线来确定生态需水^[15-19]。上述方法中,水文学和水力学方法对水生生物需求采用经验概化或直接忽略,与生态系统联系较弱,同时推荐值大多为年均值或月均值,忽略了水文过程的动态性和季节性;栖息地法则需要大量的水文、生物、地质等数据,而我国大多数流域长期以来缺乏生态监测,相关数据较少,应用难度较大。因此,需要建立一种资料需求适中、与生态系统有直接联系的生态需水计算方法。由于水生态系统恢复是个长期的过程,最小生态需水并不能满足健康河道对水量的需求,同时考虑水资源年际间丰枯变化及用水差异,需要根据不同等级生境保护目标确定生态需水量以达到满足不同时期河道保护目标的需求目的^[20]。

淮河是我国受人类活动影响最为严重的河流之一,水利工程在发挥防洪、发电、灌溉及供水方面的功能的同时改变了河道水文形势,出现了河道断流、主槽淤积萎缩等问题,严重影响河道生态系统健康。据统计淮河流域64%的河流处于不健康或亚健康状态^[21-22],河道中鱼类等大量水生生物出现死亡甚至灭绝的状态,水生态问题已成为淮河流域经济社会发展的重要制约因素之一。如何在经济社会发展的同时逐步恢复淮河流域生态健康成为当前研究的一个重点问题。

1 研究对象

1.1 研究区概况

淮河流域位于我国东部,流域面积 2.75×10^5 km²,流域内多年平均降水量为888 mm,多年平均

径流深约为221 mm。淮河流域为典型季节性河流,受梅雨及台风的影响,6月-9月(汛期)暴雨频发,汛期降水总量约占淮河流域全年降水量的60%^[23]。流域总人口约1.70亿,流域平均人口密度为631人/km²,国内生产总值(GDP)为1.73万亿元,人均1.02万元。人口密度大,经济基础比较差,属于经济欠发达地区。

淮河流域历史上水资源丰富,鱼类资源众多,淮河中游曾经分布着较多的产卵场,其中安徽省凤台县的峡山口由于其得天独厚的水流条件使其在历史上成为淮河中游重要的产卵场,但是由于近年来截弯取直、水文情势改变和过度捕捞等造成河道生态环境不断恶化,产卵场逐渐消失,淮河流域鱼类数量急剧下降。本次在淮河凤台县河段选取了分布距离较为均匀的8个典型大断面,区间河段河床为岩石底质,断面较为稳定,河段平均比降为0.02%,糙率0.03。研究区及研究断面见图1。

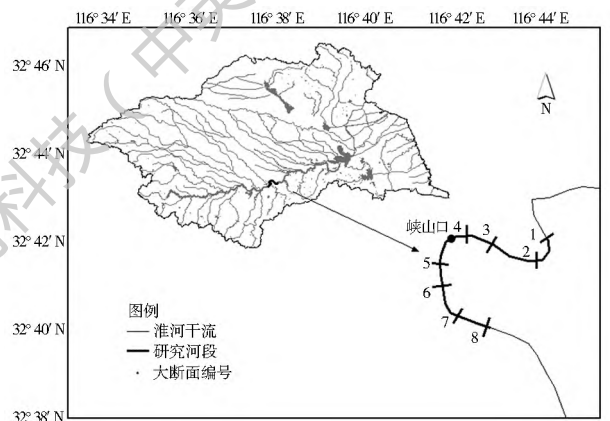


图1 研究区域及研究断面示意图

Fig. 1 Diagram of the study area and study cross section

1.2 指示性物种

参考《淮河流域生态-环境调查与评价报告》和《淮河流域生态用水调度研究报告》^[23],淮河流域鱼类有23种,隶属于9科,其中凤台县河段鱼类主要有鲤鱼科鲫、餐、蛇鮈、油餐、银鮈、蒙古鮠、红鳍鮠、青梢鮠及鲢科光泽黄颡鱼、长吻鮠,鲤鱼科为绝对优势种群。鱼类是河道生态系统的顶级生物,鱼类种群的变化可直观反映河道水文情势的变化对河道生态系统的影响,同时,适宜鱼类生存繁殖的流量过程也能使河道达到健康状态。本文选择凤台县典型鱼类为研究对象,将鱼类在不同时期对水流条件的需求作为生态需水制定的依据。同时本次将4月-6月定义为鱼类产卵期繁殖期,6月-9月定义为育幼期,该时间段对于鱼类种群丰度具有极其重要的作用,对其需求应重点考虑及研究。鱼类生态习性见表1。

表 1 淮河凤台县段鱼类及其生态习性

Tab. 1 Fish species and their ecological habits in Fengtai section of Huai River

鱼类	成鱼生境	产卵生境	产卵特性	洄游特性	产卵期
鲫鱼	河流下层	浅滩、杂草水域	黏性卵	洄游	3月-7月
餐	河流上层	流动水体	漂浮性卵	洄游	6月-7月
蛇鮈	河流下层	卵石、沙质的浅水河滩	黏性卵	洄游	4月-6月
油餐	河流上层	流动水体	漂浮性卵	洄游	5月-6月
银鮈	河流下层	卵石、沙质的浅水河滩	黏性卵	洄游	4月-6月
蒙古鲃	河流中上层	浅滩、杂草水域	黏性卵	洄游	5月-7月
红鳍鲃	河流中上层	浅滩、杂草水域	黏性卵	洄游	5月-7月
青梢鲃	河流中上层	浅滩、杂草水域	黏性卵	洄游	5月-7月
光泽黄颡鱼	河流中下层	近岸浅水区	黏性卵	洄游	4月-5月
长吻鮠	河流中下层	浅滩、杂草水域	黏性卵	洄游	4月-6月

2 研究内容

2.1 研究方法

河流水文情势与河流生态过程具有内在关系,是河流生态过程的主要驱动力^[24]。天然水文过程较为复杂,但生物与环境在长期相互作用的过程中,河流水文情势的变化与水生物年内生命阶段之间形成了天然的匹配关系^[18]。国际上普遍认为,流量的天然变化过程包括大小、频率、发生及持续时间、涨落率等最适宜鱼类的生存,对河道健康最有利^[25]。本文在确立不同等级生境保护目标的基础上,建立生态-水文响应概念性模型,通过历史流量资料分析确定流量组分年内分布变化特征,同时根据鱼类不同时期需求对生境保护目标赋予不同水力学指标,根据一维水力学模型演算确定流量值,综合确定生态需水推荐值。研究流程如图 2 所示。

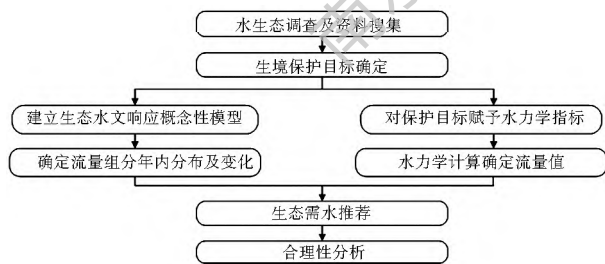


图 2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of the research

2.2 生境保护目标确定

淮河流域水资源问题突出,水资源时空差异性明显,生态环境整体较差。在本次研究中,对研究区域设定了三个不同等级生境:(1)不断流,即河道基流维持水体纵向连通性,无法维持水生生物的正常生存空间,生物由于缺水逐渐消亡生态系统处于极不健康状态;(2)最小生境,即维持河道生态系统现

状不恶化,为关键性物种如鱼类提供最小生存空间;(3)适宜生境,定义为维持水生生态系统完整性,河道水文情势能满足鱼类正常生存繁殖的水文、水力学要求,生态系统呈健康状态。生境保护目标的确定为生态需水推求提供了理论基础和依据。

2.3 生态需水组成要素分析

根据淮河流域特点,以天然流量过程的变化为基准,以 IHA (Indicator of Hydrologic Alteration 即水文变异指标法)及 EFC (Environmental Flow Components 即环境流量指数)指标体系^[26-30]为基础建立一套适用于研究河段生态的水文指标,建立流量组分生态作用概念性模型如图 3。分析河道 1956 年-2012 年日流量过程,统计不同流量组分年内时间分布及变化特征,并确定极低流量、低流量、高流量、脉冲流量及洪水的年内发生时间、频率的统计规律及适宜值(表 2)。由于漫滩洪水会对社会经济造成损害,且其生态作用小洪水也能达到,因此在生态需水过程推荐中不考虑该种流量组分。

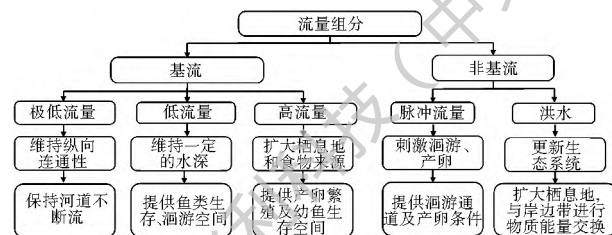


图 3 流量组分生态作用概念性模型

Fig. 3 Conceptual model of the ecological functions of the flow components

2.4 确定基于鱼类需求的生态需水

生态过程与特定的流量组分之间有极高的联系,但生态过程难以与特定的流量值形成对应关系,但是这种关系能建立在生态过程与一些与生态系统具有较大联系的水力学参数如水深、流速、湿周上^[31],

表2 流量组分年内分布及变化

流量组分	发生时间	频率/a	持续时间/d
极低流量	全年	/	/
低流量	10月-5月	/	/
高流量	6月-9月	/	/
流量脉冲	4月-10月	3.8	> 7
洪水	6月-9月	1.8	> 12

如平均水深反映了鱼类在整个断面上生存空间的情

表3 不同生境等级流量组分组成及水力学参数

Tab.3 Composition and hydraulic parameters of flow components for different ecological goals

生境等级	生态目标	流量组分	时间分布	水力学参数
不断流	维持河道纵向连通性, 不断流	极低流量	全年	$D > 0.6 \text{ m}$
最小生境	为鱼类越冬提供一定的生存空间	低流量	10月-3月	$D > 0.6 \text{ m}$
	维持河道水深, 为鱼类提供洄游通道	低流量	4月-5月	$D > 1.5 \text{ m}$
	维持河道水深, 扩大鱼类生存栖息地	高流量	6月-9月	$D > 2 \text{ m}, h > 1 \text{ m}$
	刺激鱼类洄游及产卵, 并为其鱼类提供适宜的产卵条件	脉冲流量	4月-6月	$D > 2 \text{ m}, h > 1 \text{ m}, 0.3 \text{ m/s} < v < 0.5 \text{ m/s}$
扩展鱼类栖息地及食物来源, 并更新生态系统	洪水	6月-9月	$D > 2 \text{ m}; v > 1.2 \text{ m/s}$	
适宜生境	为鱼类越冬提供一定的水深生存空间	低流量	10月-3月	$D > 1 \text{ m}$
	维持河道水深, 为鱼类提供洄游通道	低流量	4月-5月	$D > 1.5 \text{ m}$
	维持河道水深, 扩大鱼类生存栖息地	高流量	6月-9月	$D > 1.5 \text{ m}, h > 1.5 \text{ m}$
	刺激鱼类洄游及产卵, 并为其鱼类提供适宜的产卵条件	脉冲流量	4月-6月	$D > 2 \text{ m}, h > 1.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m/s} < v < 0.8 \text{ m/s}$
扩展鱼类栖息地及食物来源, 并更新生态系统	洪水	6月-9月	$D > 2 \text{ m}, v > 1.5 \text{ m/s}$	

注: 表中 D 表示最大水深, \bar{D} 表示平均水深, v 表示日平均流速, h 表示浅滩处水深。

3 生态需水推荐

基于鱼类需求及水文特性, 对不同等级生态需水推荐结果为: 在极端情况下, 为防止河流生态系统发生毁灭性灾难, 推荐至少维持 $17.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的基流; 维持生态系统现状不恶化的最小生境, 推荐在 10 年- 20 年 5 月、6 月- 9 月分别维持 $44.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $93.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 的基流, 为鱼类产卵繁殖及幼鱼生长提供一定的条件和空间, 推荐在 4 月- 6 月产卵繁殖期保证 2 次以上峰值不小于 $238.45 \text{ m}^3/\text{s}$, 且涨水 2 天以上过程不少于 7 天的脉冲流量, 6 月- 9 月汛期

发生 1 次以上峰值不小于 $1237.07 \text{ m}^3/\text{s}$, 涨水不小于 3 天, 峰值持续 2 天整个过程不少于 12 天的非漫滩洪水; 维持河道生态系统健康的适宜生境, 推荐在 10 月- 5 月、6 月- 9 月分别维持 $93.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $169.49 \text{ m}^3/\text{s}$ 的基流, 为鱼类产卵繁殖及幼鱼生长提供适宜的条件和空间, 推荐在 4 月- 6 月产卵繁殖期保证 4 次以上峰值不小于 $577.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 且涨水 2 天以上过程不少于 7 天的脉冲流量, 6 月- 9 月汛期发生 2 次以上峰值不小于 $1881.06 \text{ m}^3/\text{s}$, 涨水不小于 3 天, 峰值持续 2 天整个过程不少于 12 天的非漫滩洪水。三种推荐生态需水过程示意图见图 4。

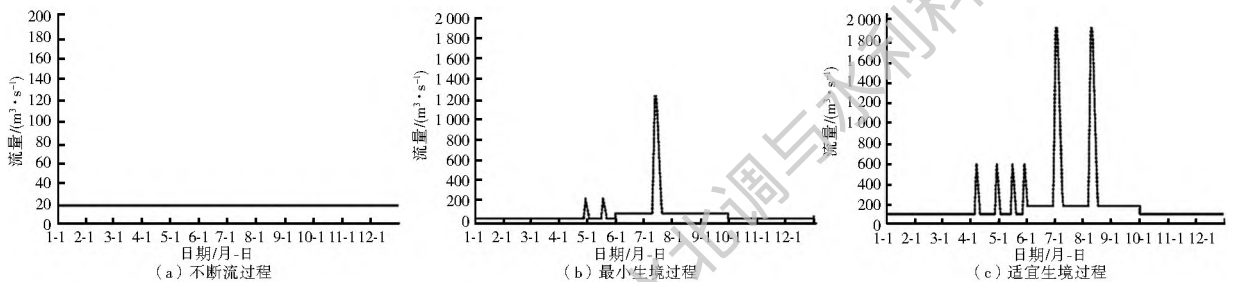


图4 推荐生态需水过程

Fig.4 Recommended environmental flow processes

通过计算结果与 Tennant^[38] 法栖息地质量等级对比(表4)可看出, 不断流流量处于严重退化等

级,河道生态系统不能维持正常功能;最小生态需水在枯水期处于较差水平,汛期处于中等水平;适宜生态需水在枯水期处于中等偏好水平,汛期处于较好等级。由于 Tennant 法采用年均流量比例的方法划分质量等级,忽略了流量季节性变化,均化了河流汛期脉冲流量及洪水对河道流量的改变,对季节性河流非汛期生态需水推荐偏大,并不能完全反映淮河流域生态需水特点,仅具有参考价值。

表 4 推荐流量与 Tennant 法栖息地质量等级对比

Tab. 4 Comparison between recommended flow and Tennant method m^3/s

计算方法	项目	一般用水期 (10月-3月)	鱼类产卵育幼期 (4月-9月)
Tennant 法	差	61.78	61.78
	中	61.78	185.35
	好	123.57	247.13
	极好	247.13	370.7
	最佳	370.7	370.7
	最大	1 235.66	1 235.66
	生态需水法	不断流生态需水	17.5
最小生态需水		44.9	136.89~ 208.42
适宜生态需水		93.27	263.04~ 341.83

4 结语

生态需水是生态用水的依据,在生态系统修复中起着重要的作用,本文在淮河流域现有资料的基础上,参考大量国内外研究,提出一种符合淮河流域的实际生态需水计算方法。在本次研究中综合考虑河道天然水文情势变化特点及以鱼类为代表的水生态系统的需水,同时推荐的生态需水量在对于鱼类种群具有重要意义的产卵繁殖期及育幼期特别考虑,特别推荐了该时期脉冲或洪水发生的频率及涨落持续时间,更具有可操作性。本文资料需求适中且较为综合地考虑了水文生态系统,不同等级推荐流量均符合 Tennant 法栖息地等级范围,有利于水资源管理者在不同水资源管理策略中选择适宜的生态需水,实现水资源合理配置和高效利用,为淮河流域中长期水资源规划提供参考。

本次推荐的生态需水值是基于特定的河道地形条件由水力学参数确定的,由于水流冲刷作用导致河道地形复杂且多变,因此推荐的流量值并非一成不变,在不同时期生态需水可根据河道地形变化做适当的调整。同时,本文研究仅以鱼类作为生态系统的代表研究其在不同生境条件下生态过程与流量之间的关系,在今后研究中会加入河道生态系统中

底栖、浮游动植物等生态需水情况研究,同时考虑水质变化对生态系统的影响综合确定生态需水。本文在分析长系列日流量资料时忽略气候变化及人类活动对水文过程一致性的影响,在以后研究中也应该加入对水文变异性的分析。

参考文献(References):

- [1] 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.(CUI Ying,ZHANG Qiang,CHEN Xiaohong,et al.Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J].Journal of Lake Sciences,2010,22(4):465-480.(in Chinese))
- [2] 刘剑宇,张强,顾西辉.水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J].生态学报,2015,35(16):5477-5485.(LIU Jiayu,ZHANG Qiang,GU Xi hui.Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(16):5477-5485.(in Chinese))
- [3] 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(5):1151-1155.(SHU Chang,LIU Su xia,MO Xing guo,et al.Estimation of instream ecological flow based on RVA[J].Ecology and Environmental Sciences,2010(5):1151-1155.DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.05.022(in Chinese))
- [4] 郑志宏,黄强,魏明华,等.基于中位数众数理论的 Tennant 法改进与应用[J].四川大学学报:工程科学版,2010(6):38-42.(ZHENG Zhi hong,HUANG Qiang,WEI Ming hua,et al.Improvement and application of Tennant method based on median and mode theory[J].Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2010(6):38-42.DOI:10.15961/j.jsuese.2010.06.018(in Chinese))
- [5] 田景环,王轶,茹松楠,等.基于河流功能的 Tennant 法改进及其应用[J].人民黄河,2011(11):100-102.(TIAN Jing huan,WANG Yi,RU Song nan,et al.Improvement Tennant method based on river function and its application[J].Yellow River,2011(11):100-102.(in Chinese))
- [6] 陆建宇,陆宝宏,张建刚,等.沂沭河流域河流生态径流及生态需水研究[J].水电能源科学,2015(9):26-30.(LU Jian yu,LU Bao hong,ZHANG Jian gang,et al.Study on ecological flow and ecological water demand of Yishu he river basin[J].Water Resources and Power,2015(9):26-30.(in Chinese))
- [7] 王加全,马细霞,李艳.基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价[J].水力发电学报,2013,32(1):107-112.(WANG Jia quan,MA Xi xia,LI Yan.Evaluation of reservoir ecological operation schedule by range of variability approach[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(1):107-112.(in Chinese))
- [8] 戴向前,黄晓丽,柳长顺,等.潮白河生态流量估算及恢复保障措施[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):72-76.(DAI Xiang qian,HUANG Xiao li,LIU Chang shun,et al.Study on ecological flow estimation and ecological restoration safeguard measures in Chaobai River[J].South to North Water Transfer and Water Science & Technology,2012,10(1):72-76.(in Chinese))
- [9] 黄速艇,陈森林,艾学山,等.基于流量分级的生态流量过程线确定方法-以东江水库为例[J].水资源与水工程学报,2014

- (5): 22-27. (HU ANG Sir ting, CHEN Ser lin, AI Xue shan, et al. Deterministic method of ecological flow process line based on flow classification: a case study in Dongjiang reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014(5): 22-27. (in Chinese))
- [10] 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(1): 42-48. (LIU Chang ming, MEN Bao hui, SONG Jin xi. Ecological hydraulic radius method for estimating ecological water demand[J]. Progress in Natural Science, 2007(1): 42-48. (in Chinese))
- [11] 赵长森, 刘昌明, 夏军, 等. 坝河河道内生态需水研究-以淮河为例[J]. 自然资源学报, 2008(3): 400-411. (ZHAO Chang sen, LIU Chang ming, XIA Jun, et al. Instream ecological flow of dammed river A case study of Huaihe River[J]. Journal of Natural Resources, 2008(3): 400-411. (in Chinese))
- [12] 吴春华, 刘昌明. 生态水力半径法计算河道内生态需水量研究[J]. 人民黄河, 2008, 10: 52-54. (WU Chun hua, LIU Chang ming. Use of ecological hydraulic radius method to calculate ecological water demand[J]. Yellow River, 2008, 10: 52-54. (in Chinese))
- [13] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量-以滦河水系为例[J]. 地理科学进展, 2010(3): 287-291. (JI Li na, LIU Su xia, WANG Xin chun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: A case study in Luanhe water system[J]. Progress in Geography, 2010(3): 287-291. (in Chinese))
- [14] 吉利娜, 刘苏峡, 吕宏兴, 等. 湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006(2): 124-130. (JI Li na, LIU Su xia, LYU Hong xing, et al. Theoretical study of minimum instream flow requirement using the wetted perimeter method[J]. Journal of Northwest Sci Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006(2): 124-130. DOI: 10. 13207/j. cnki. jir wafu. 2006. 02. 026 (in Chinese))
- [15] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 2011(1): 47-55. (BAN Xuan. Ecological flow requirement for Chinese sturgeon spawning habitat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011(1): 47-55. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 01. 001 (in Chinese))
- [16] 李建, 夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011(6): 678-684. (LI Jian, XIA Zi qiang. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011(6): 678-684. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 06. 007 (in Chinese))
- [17] 班璇. 物理栖息地模型在中华鲟自然繁殖生态流量决策中的应用[J]. 水生态学杂志, 2011(3): 59-65. (BAN Xuan. Applying physical habitat simulation model on the ecological flow decision of Acipenser sinensis natural breeding[J]. Journal of Hydroecology, 2011(3): 59-65. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2011. 03. 009 (in Chinese))
- [18] 张文鸽, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. 水科学进展, 2008(2): 192-197. (ZHANG Wen ge, HU ANG Qiang, JIANG Xiao hui. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation[J]. Advances in Water Science, 2008(2): 192-197. DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2008. 02. 009 (in Chinese))
- [19] 蔡玉鹏, 万力, 杨宇, 等. 基于栖息地模拟法的中华鲟自然繁殖适合生态流量分析[J]. 水生态学杂志, 2010(3): 1-6. (CAI Yu peng, WAN Li, YANG Yu, et al. Analysis on the environmental flow requirements for natural reproduction of Chinese sturgeon based on habitat simulation methods[J]. Journal of Hydroecology, 2010(3): 1-6. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2010. 03. 013 (in Chinese))
- [20] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于生态保护目标的太子河下游河道生态需水量计算[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1466-1471. (FENG Xia qing, ZHANG Guang xin, YIN Xiong rui. Calculation of ecological water requirements in the lower reaches of the Taizi River based on ecological protection objectives[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(7): 1466-1471. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2010. 07. 025 (in Chinese))
- [21] 刘玉年, 夏军, 程绪水, 等. 淮河流域典型闸坝断面的生态综合评价[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(6): 693-697. (LIU Yu nian, XIA Jun, CHENG Xu shui, et al. Integrated assessment of river ecosystems on typical dam water gate sections in the Huaihe River[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 9(6): 693-697. (in Chinese))
- [22] 赵长森, 刘昌明, 夏军, 等. 坝河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 Chang sen, LIU Chang ming, XIA Jun, et al. Instream ecological flow of dammed river A case study of Huaihe River[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 400-411. (in Chinese))
- [23] 佚名. 淮河流域生态用水调度研究[R]. 北京: 清华大学, 2008. (Anonymity. Study on the ecological water use scheduling in Huaihe Basin[R]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [24] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文生态响应关系的环境水流评估方法——以三峡水库及其坝下河段为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2013(6): 715-726. (WANG Jun na, DONG Zhe ren, LIAO Wen gen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach[J]. Science China: Technology Science, 2013(6): 715-726. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11431-013-5193-6
- [25] King J, Brown C, Sabet H. A scenario based holistic approach to environmental flow assessments for rivers[J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6): 619-639.
- [26] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [27] Richter B D; Baumgartner J V, Wigington R, Braun D P. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.
- [28] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, Powell J. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14(4): 329-340.

(下转第 133 页)

- 响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 37-61. (TAO Hong, TAO Fur ping, LIU Werb o. Characteristics and influencing factors of groundwater dynamics in Guanzhong urban agglomeration during the last 50 years[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 37-61. (in Chinese)) DOI: 16030/j.cnki.issn.10003665.2013.06.017
- [19] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8-13. (FAN Zi li, MA Ying jie, ZHANG Hong, et al. Research of Ec o water Table and Rational Depth of Groundwater of Tarim River Drainage Basin[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 8-13. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2004.01.002
- [20] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 新疆玛纳斯河流域 2000-2010 年土地利用/覆盖变化及影响因素[J]. 生态学报, 2014 34(12): 3211-3223. (LIU Jin wei, JIN Tian tian, LIU Guo hua, et al. Analysis of land use/cover change from 2000 to 2010 and its driving forces in Manas River, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3211-3223. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201304230781
- [21] 张鸿义, 曾凡江, 安海棠. 中国干旱区浅层地下水的形成、分布与运移[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 67-73. (ZHANG Hong yi, ZENG Fan jiang, AN Hai tang. Formation, Distribution and Transport of shallow Groundwater in Arid Areas, China [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 67-73. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2011.01.019
- [22] 郑昊安. 节水灌溉对地下水补给的影响研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2013. (ZHENG Hao an. The Characteristics of Water-saving Irrigation Effects on Groundwater Recharge [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [23] 盖有军. 玛纳斯整治非法打井开荒退出荒地 13 万多亩[N]. 新疆日报, <http://www.xinjiangnet.com.cn/2015/0331/1382034.shtml> (GAI You jun. Manas County Government punishes illegal well digging and restores more than 8667 hectares of wasteland[N]. Xinjiang Daily, <http://www.xinjiangnet.com.cn/2015/0331/1382034.shtml>. (in Chinese))

(上接第 81 页)

- [29] Richter B D. Rethinking environmental flows: From allocations and reserves to sustainability boundaries[J]. Rivers Research and Applications, 2010, 26(8): 1052-1063.
- [30] Richter B D, Davis M M, Apse C, Konrad C. A presumptive standard for environmental flow protection[J]. River Research and Applications. Published online, 2011.
- [31] Gippel C J, Bond N R, James C, et al. An asset based, holistic, environmental flows assessment approach[J]. International Journal of Water Resources Development, 2009, 25(2): 301-330.
- [32] 张洪波, 王义民, 蒋晓辉, 等. 基于生态流量恢复的黄河干流水库生态调度研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 15-21. (ZHANG Hong bo, WANG Yi min, JIANG Xiao hui, et al. Ecological regulation of reservoirs on the Yellow River main stream oriented to ecological flow restoration[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 15-21. (in Chinese))
- [33] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 119-126. (PAN Zha rong, RUAN Xiao hong, XU Jing. A new calculation method of in stream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.01.005
- [34] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 基于生态系统分析的河道最小生态需水计算方法研究(Ⅱ)[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 15-18. (XU Zhi xia, CHEN Min jian, DONG Zeng chuan. Research on methods of minimum ecological water requirements in river based on analysis of ecosystem (Ⅱ)[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(12): 15-18. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2004.12.004
- [35] 徐志侠, 王浩, 陈敏建, 等. 基于生态系统分析的河道最小生态需水计算方法研究(Ⅰ)[J]. 水利水电技术, 2005, 01: 31-34. (XU Zhi xia, WANG Hao, CHEN Min jian, et al. Research on methods of minimum ecological water requirements in river based on analysis of ecosystem (Ⅰ)[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 01: 31-34. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2005.01.009
- [36] 佚名. 淮河青、草、鲢、鳙及鳊鱼产卵场的调查[J]. 水产学报, 1981(4): 361-367. (Anonymity. A survey on the spawning grounds of black carp, grass carp, silver carp, bighead carp and bream in Huai He [J]. Journal of Fisheries of China, 1981(4): 361-367. (in Chinese))
- [37] 孟钰, 张翔, 夏军, 等. 水文变异下淮长河长吻鲢生境变化与适宜流量组合推荐[J]. 水利学报, 2016(5): 626-634. (MENG Yu, ZHANG Xiang, XIA Jun, et al. Definition of environmental flow components for Leiocassis Longirostris in the Huai River considering habitat change and hydrological change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(5): 626-634. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150525
- [38] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries Management & Ecology, 1976, 1(4): 6-10.
- [39] Skinner J. R2CROSS efficient for quantifying instream flows. Website: http://cwdb.state.co.us/isf/V2IS1_R2CROSS.htm
- [40] Espegren G D. Development of instream flow recommendations in Colorado using R2CROSS[M]. Colorado Water Conservation Board, 1996.
- [41] Hydraulic engineering center of USACE. HEGRAS: river analysis system hydraulic reference manual version 4.0[M]. Davis CA: US Army Corps of Engineers, 2008.