

基于栖息地指标法的生态流量研究^{*1}

洪思扬 王红瑞* 朱中凡 韩鲁杰

(北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,
北京 100875)

【摘要】:以大渡河流域为例,根据指示鱼类对栖息地的环境要求,构建包含水深、水面宽、流速、湿周和过水面积5个参数的栖息地评价体系,选择大渡河上游具有代表性的河段,建立流量与各指标之间的关系式,确定指示鱼类不同阶段的最低流量适宜值,得到满足各栖息地指标要求的最小生态流量。计算得出,足木足河的非避冬期最小生态流量为18.3~78.5m³/s,避冬期为6.6m³/s;大金川的非避冬期最小生态流量为26.6~86.5m³/s,避冬期为26.6m³/s;梭磨河的全年最小生态流量为28.3m³/s;绰斯甲河的非避冬期最小生态流量为31.9~38.2m³/s,避冬期为31.9m³/s。区域最小生态流量的确定,可为研究区鱼类的保护提供参考,进而为维系地区生态平衡,协调生态环境与社会发展提供保障。

【关键词】:生态流量;栖息地法;指示鱼类;大渡河

【中图分类号】:X824 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2018)01-0168-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201801019

水资源的低效开发利用已在世界范围内对生态系统造成了较大影响。为了合理评价河流的可开发程度及其可接受的生态系统退化程度,生态流量的研究和计算在相关领域已成为热点研究方向^[1, 2]。生态流量确定是评估生态环境恶化的重要途径之一,同时也是生态水文学、流域水资源规划、水量分配、水利工程建设等所必须研究的内容^[3]。当前,国内外研究者对生态流量的基本理论、内涵及未来发展动向等进行了深入的探讨,对河流、湖泊、湿地及城市系统的生态流量开展了多角度评估^[4~8]。主要评估方法包括四类,即水文学方法、水力学方法、栖息地法及整体分析法^[9~16],各类方法的侧重点及其适用条件不同,评估方法的选取基于河流类型、估算目标、精度要求、生态环境价值观、资料收集的难易程度及评估成本等因素^[17, 18]。水文学方法相对简单,易于操作,数据易于搜集,无需现场测量,但该方法仅基于经验估算,未直接考虑生物需水及生物间的作用影响,生态学意义不够明确。水力学方法以水力学理论为支撑,包含更丰富的河流信息,现场测量相对容易,短期数据资料即可满足计算要求,但无法体现生态流量的季节性。整体分析法从全局视角考虑河流生态系统,与流域管理规划相结合,符合生态系统整体性原理。但该方法所需要的生态资料不易获得,只能依赖于相关领域专家的经验判断,结果可靠性受到置疑,并且该法耗时较长,资源消耗大。

¹ 收稿日期:2017-03-29;修回日期:2017-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51479003, 51279006)

作者简介:洪思扬(1990~),女,博士研究生,从事水资源系统分析方面研究。E-mail:m18811335236@126.com

*通讯作者 E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

在生态流量的计算中，栖息地法较为复杂，但比较灵活，物理意义比较明确，需要在指定物种及其栖息地参数的基础上，考虑自然河道流量的变化，确定指定流量时栖息地指标的实际利用范围，从而满足特定物种的要求^[19]。该方法是对水力学方法的进一步发展，由于栖息地法可将生态流量量化，且有较强的生物意义，因此被视为当今最为可信的生态流量评估法。该类方法中最具代表性的是河道内流量增加法(IFIM)，该方法于20世纪70年代在美国研发，并得到了广泛应用^[20~24]。IFIM法考虑的主要指标包括流速、水温、溶解氧、水深等，作为概念性方法，IFIM法的使用需要借助于其他模型。在已有的IFIM法研究中，最具代表性的是物理栖息地模拟系统^[25]，该系统将水文因素与生物因素相结合，从而确定适宜流量下的生物种类和栖息地类别。该方法的优点在于可同时满足生态流量评价及景观需水要求等多个目的。同时，栖息地法也存在一定的不足，主要是对数据及费用的要求较高。另外，对某些特定物种的选定，可能无法完全反映整个生态系统的整体性特征。

然而，生态流量评估中的每一种方法都有其产生的独特背景和适用条件，应用这些方法时必须结合所评价对象的自身特点及评价要求。本文结合栖息地法的主要思路和原理及大渡河上游的实际情况，构建包含水深、水面宽、流速、湿周和过水面积5个参数的栖息地评价体系，以南水北调西线工程区大渡河流域为例，开展基于栖息地环境指标的河道生态流量计算方法的研究，以期为大渡河流域水资源的综合管理及可持续开发利用提供科学依据，并为其它相关河流的生态流量计算及河道生态修复等研究提供参考依据。

1 栖息地指标模型法及其应用

1.1 研究区概况

大渡河流域地处四川省，是长江的二级支流。地理位置为 $99^{\circ} 43' \sim 103^{\circ} 48' E$ ， $28^{\circ} 17' \sim 33^{\circ} 33' N$ ，发源于青海省果洛山。绰斯甲河和足木足河均为大渡河的一级支流。流域面积为 $7.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占岷江流域面积的59%。全流域多年平均气温为 $13 \sim 18^{\circ} \text{C}$ 。多年平均降水量为 $800 \sim 1000 \text{ mm}$ ，且较为集中在夏季，约占全年降水总量的70%。土壤主要为草甸土与石灰岩土，植被以天然植被为主，且具有显著的垂直地带分异特征，人工植被主要分布在下游平原区，在中上游高平原和山丘区的河流阶地也有零星分布^[26]。研究区示意图见图1。

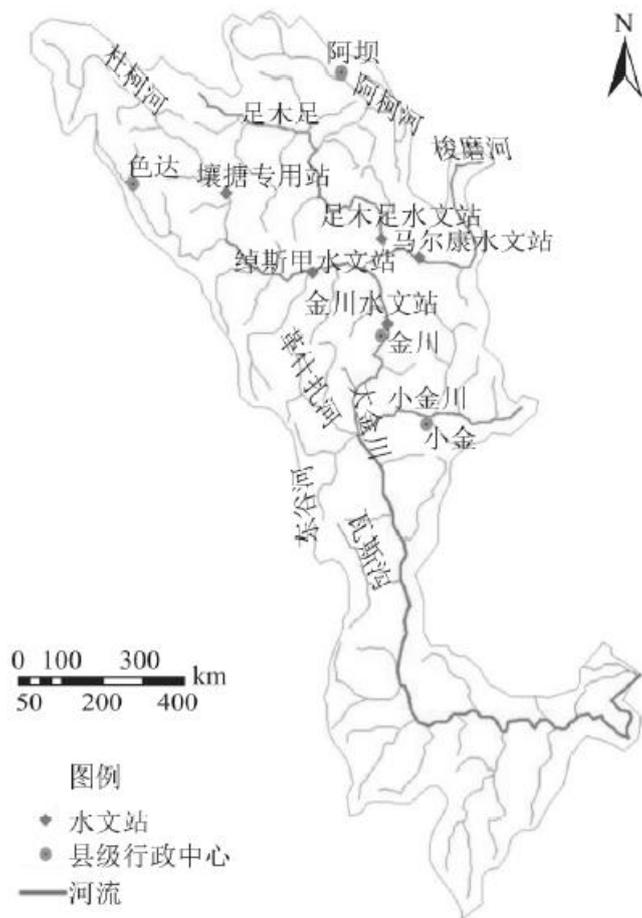


图 1 研究区地理位置概况

Fig. 1 General geographical position of the study area

1.2 指示鱼类及栖息地指标的确定

1.2.1 指示鱼类的确定

鱼类是河流生态系统中的顶级群落，对河流的流量、流速、水体温度、河床侵蚀等水文条件和溶解氧、有毒有害物质浓度等水质条件非常敏感^[27, 28]，其健康状况可以反映水生态系统的总体健康状况，并且对其它类群的存在和丰度有着重要的指示作用^[29]，适宜于河流生态流量的计算，因此本研究选取鱼类作为指示物种。鱼类栖息地指能够保障鱼类进行正常生长、发育、捕食、繁育后代及完成生命周期中各项重要活动的总体环境^[30]。大渡河共有鱼类 7 目 16 科 114 种，从种数来说，大渡河鱼类占四川鱼类种数的 43% 左右。上游的高原性鱼类，与青衣江或岷江上游有相似之处，分布有重口裂腹鱼、齐口裂腹鱼、红尾条鳅、短体条鳅、云斑山鳅、青鳉、虎嘉鱼等。总体而言，上游的鱼类组成比较简单，以裂腹鱼类和条鳅类为主。考虑到各个鱼类物种受保护的程度及其在相应区域的代表性，本文选择川陕哲罗鲑 (*Hucho bleekeri*)、长丝裂腹鱼 (*Schizothorax dolichonema*)、青石爬鳉 (*Euchiloglanis davidi*)、中甸叶须鱼 (*Ptychobarbus chungtienensis*) 及黄石爬鳉 (*Euchiloglanis kishinouyei* Kimura) 作为大渡河生态流量估算的代表性鱼类。其中，川陕哲罗鲑属鲑形目鲑科哲罗鱼属，是我国的土著鲑鱼类，在第四纪冰川时期由北方地区扩散而来，冰期结束后在低温河水中存活下来，进而发展为独立的物种，是历史气候变化的有力物证，具有重要的动物学、鱼类系统发育学及气候学等方面的研究价值，且被列入国家二级保护动物和中国濒危动物红皮书中。

大渡河流域鱼类的生态流量主要体现在 4 个方面: (1) 一定的河流水深和水面宽度能够保证鱼类生存所需的最小空间; (2) 一定的水深能够使洄游性鱼类的鱼道保持顺畅; (3) 一定的河流流速能够保障鱼类生长发育的正常进行; (4) 一定的过水断面面积, 能够在冬季为鱼类提供所需的避冬场所。随着大渡河流域水利水电工程开发程度的加剧, 河流的水深、水面宽度及过水断面面积等水文要素均可能随之发生变化, 水生态系统受到的人为干扰比较严重, 从而使鱼类的洄游通道遭受了一定程度的破坏, 对天然渔业资源造成影响。因此, 科学合理量化地区的生态流量, 对保障区域鱼类洄游通道畅通及生态环境健康发展等均具有重要的现实意义。结合以上 4 个方面的要求, 本文选择流速、水面宽率、水深、湿周率以及过水面积率 5 个指标来构建大渡河流域鱼类栖息地指标。

1.2.2 指示鱼类生活期关键阶段识别

鱼类对生存环境的需求因季节而异, 因此, 应首先确定指示鱼类的生活期及相对应的栖息地环境需求, 在此基础上, 确定相关的栖息地指标标准, 计算相应的生态流量。在大渡河流域, 鱼类的繁殖季一般处于 3 月中旬~6 月中旬, 育幼期一般处于 7~9 月, 成熟期一般处于 9~11 月, 避冬期处于 12~次年 3 月。另外, 还有一些洄游性鱼类在 4 月份溯水而上, 产卵后于 9、10 月回到河口。因此, 必须保证河道在 3~6 月和 9~11 月维持一定的连通性。鱼类生活期关键时段对河流相关指标的要求见表 1。

表 1 大渡河流域的关键鱼类生活期的关键时段及其对河流的要求

月份	生命期	要求	关键性指标
3 月~6 月	洄游与产卵期	保证鱼道通畅和鱼类孵化栖息地条件	流速、水面宽率、水深、湿周率
7 月~9 月	育幼期	保持一定岸边栖息地环境	流速、水深、湿周率
9 月~11 月	洄游期	保持鱼道通畅	流速、水深
12 月~2 月	避冬期	结冰水位保持一定高度, 保证一定的冬季栖息地空间	水深、过水面积率

1.2.3 栖息地指标的适宜性标准确定

栖息地适宜性指标能够反映鱼类对生存环境的要求, 按照适宜程度划分, 鱼类对栖息地的适宜性可以分为最小、适宜和最大 3 类。本文主要针对最小标准开展研究。

据实测统计, 上述几种代表性鱼类产卵所需的流速应控制在 0.4~1m/s, 其中, 大渡河的重要保护鱼类川陕哲罗鲑的流速范围要求在 0.6~1.5m/s 之间。因此, 本文选取 0.6m/s 作为流速的最小适宜性标准。目前, 鱼类产卵等所需要的水面宽率、湿周率(湿周指过水断面上河槽被水流浸湿部分的周长, 湿周率则指湿周占多年平均流量的湿周的比例)和平均水深尚无统一标准。通过分析 R2CROSS 法和 Tennant 法的统计结果, 与中小型河流最小生态流量相对应的平均水深大致为 0.3m, 水面宽率约为 60%~70%, 湿周率约为 70%^[31~33], 吉利娜等^[34]的研究结果表明最小流量所对应的湿周大致为最大湿周的 1/2 以上。结合以上研究成果, 本研究将水面宽率、湿周率和水深的最小适宜值设定为 60%、70%和 0.3m。过水面积率无相关标准, 结合大渡河水系的实际

调查,认为12月份~3月份结冰期间,要求河道保持一定的水位,使得冰层下的过水空间能够保证鱼类的避冬需求,一般要求生存空间不小于最佳可利用空间的30%,即过水断面率的最小适宜性标准为30%(表2)。

表2 鱼类栖息地指标的最小适宜性标准

指标	时段	最小适宜性标准
流速	产卵期、洄游期、育幼期	≥0.6 m/s
水面宽率	产卵期	≥60%
最小水深	产卵期、育幼期、洄游期	≥0.4m
	避冬期	≥0.3 m
湿周率	产卵期、育幼期	≥70%
过水面积率	避冬期	≥30%

1.2.4 栖息地指标与流量关系分析

自然河流与能够表征河床断面特征的栖息地指标之间有着高度的相关性。对断面比较规则的河道而言,可以使用曼宁公式构建水深、流速与径流量之间的关系式,从而计算出对应的生态流量。对断面相对不规则的河道而言,曼宁公式的使用可能会导致一定的偏差。鉴于此,本研究依据系列的实际水文观测资料构建流量与水位的关系式,结合河道断面形态与高程实测资料,建立流量与选择的栖息地指标之间的经验关系式,具体内容见标题1.4。

1.2.5 河道最小生态流量的计算

根据栖息地指标与不同控制断面的流量之间的关系曲线,及鱼类各栖息地指标的最小适宜性值,确定与各个栖息地指标相对应的最小生态流量。不同种类生态环境需水量的生态目标之间有着一定的重复性,因此选取各类生态流量的外包线来确定河道最终的生态环境需水量,见下公式。

$$EQ_{\min} = \max \{EQ_{1, \min}, EQ_{2, \min}, \dots, EQ_{i, \min}, \dots, EQ_{n, \min}\}$$

式中: EQ_{\min} 为鱼类的最低流量需求(m^3/s); $EQ_{i, \min}$ 为第*i*种栖息地指标对应的最小流量(m^3/s);*n*为河道内栖息地指标数。

1.3 水文站点选取

断面资料是通过相应水文站的长期观测获得的。结合大渡河流域实际情况,选取足木足河的足木足水文站、大金川的大金水文站、梭磨河的马尔康水文站、绰斯甲河的绰斯甲水文站为研究断面,以上站点的断面形态较为稳定,满足上述生态流量方法的应用条件,各站的基本情况见下表3。

表3 足木足、大金、马尔康、绰斯甲水文站基本情况表

河名	水文站	经度	纬度	积水面积 (km ²)	多年平均流量 (m ³ /s)
足木足河	足木足	102° 01′	32° 00′	19 896	238.8
大金川	大金	102° 04′	31°32′	40 484	471.0
梭磨河	马尔康	102° 13′	31°54′	2 536	52.8
绰斯甲河	绰斯甲	101° 41′	31° 49′	14 794	179.7

1.4 流量和栖息地指标关系的建立

1.4.1 流量—湿周关系的建立

根据以上选取的计算时段计算大断面，建立流量与湿周的关系。湿周是由实测大断面计算得到，即应用实测大断面时的水位，计算该水位下河床被浸湿的长度，即得到该水位下的对应湿周。该湿周对应的流量是在实测流量成果表中查询实测大断面该日相同水位下的流量得到的。若实测流量成果表中无实测大断面对应水位，则查逐日平均水位表，逐日平均流量表得到对应的流量。当一些水文站无逐日平均水位表时，则直接采用实测大断面该日的逐日平均流量作为对应流量。

值得注意的是，流量系列的范围往往比较集中，不能全面反映流量—湿周的关系。若实测大断面的流量大于或小于河道最小生态流量，则可能使建立的流量—湿周关系不存在变化点。因此，需要对实测大断面对应的流量系列进行内插，使流量系列尽量包含 10%~100%的天然流量。内插流量时，首先建立流量和水位之间的关系曲线，从而延长流量系列。流量—水位关系可以通过实测流量成果表中的流量、水位建立，也可以通过逐日平均流量、逐日平均水位建立。为了尽量保持断面的稳定，采用与实测大断面日期接近的实测流量成果表中流量和水位数据或逐日平均流量、逐日平均水位数据，一般取实测大断面当日前 10d 和后 10d 的资料，对于流量—水位关系稳定的站可以取更长的时间段。在此基础上，计算出相应水位下实测大断面对应的湿周，建立适合的流量—湿周关系。对流量—湿周关系中偏离比较大的点，应用水位—流量关系曲线进行流量校正，计算结果见表 4。表中，Q 代表流量(m³/s)，R 代表湿周(m)。

表 4 足木足、大金、马尔康、绰斯甲水文站流量—湿周关系图

水文站	湿周流量乘幂关系	相关系数
足木足	$R = 32.828 * Q^{0.096}$	$r^2 = 0.971$
大金	$R = 49.336 * Q^{0.117}$	$r^2 = 0.998$
马尔康	$R = 43.461 * Q^{0.021}$	$r^2 = 0.922$
绰斯甲	$R = 78.766 * Q^{0.050}$	$r^2 = 0.956$

1.4.2 流量—其他栖息地指标关系建立

对以上4个水文站，采用相同的数据年代系列，根据各站实测流量资料建立各站流量与平均水深之间的经验关系式、流量与水面宽之间的经验关系式、流量与断面面积之间的经验关系式、流量与平均流速之间的经验关系式(表5)，为最小生态流量计算提供依据。

表5 足木足、大金、马尔康、绰斯甲水文站流量与其他指标的关系

水文站	足木足	大金	马尔康	绰斯甲
平均水深// (m)	$H=1.143Q^{0.214}$ $r^2 = 0.994$	$H= 0.4031Q^{0.329}$ $r^2 = 0.999$	$H=0.112Q^{0.491}$ $r^2 = 0.992$	$H= 0.095Q^{0.515}$ $r^2 = 0.981$
水面宽 IF (m)	$W= 32.474Q^{0.084}$ $r^2 = 0.967$	$W=50.188Q^{0.111}$ $r^2 = 0.998$	$W= 44.123Q^{0.015}$ $r^2 =0.831$	$W= 79.738Q^{0.046}$ $r^2 = 0.937$
断面面积 S (m ²)	$S = 36.969Q^{0.298}$ $r^2 = 0.991$	$S= 20.152Q^{0.441}$ $r^2= 0.999$	$S = 4.975Q^{0.505}$ $r^2= 0.993$	$S = 7.577Q^{0.561}$ $r^2= 0.984$
平均流速 F (m)	$V= 0.027Q^{0.701}$ $r^2 = 0.998$	$V= 0.049Q^{0.560}$ $r^2 = 0.999$	$V=0.202Q^{0.494}$ $r^2 = 0.993$	$V= 0.132Q^{0.440}$ $r^2 = 0.975$

1.5 最小生态流量的计算

使用上述经验关系式计算出与不同栖息地标准相对应的最小生态流量，在此基础上，采用对各栖息地指标确定的生态流量取外包线的原则确定不同季节的生态流量(表6)。

表6 河道栖息地环境的最小生态流量

水文站	足木足	大金	马尔康	绰斯甲
最小流速所对应流量	78.50	86.54	11.10	38.20
不同栖息地最小标准所对应的流量				
最小水深所对应流量(非避冬期)	6.42	14.13	1.59	5.39
最小水深所对应流量(避冬期)	4.78	9.42	1.06	3.59
最小水面宽率对应的流量	6.57	25.48	9.78	27.64
最小湿周率对应的流量	18.23	26.55	28.30	31.94
最小过水断面率对应的流量	5.58	21.76	8.69	22.38
不同季节的最小生态流量				
3~6月	78.50	86.54	28.30	38.20
7~8月	18.28	26.55	28.30	31.94

态流量(m ³ /s)	9~ 11月	18.28	26.55	28.30	31.94
	12~2月	6.59	26.55	28.30	31.94
最小生态流量占多	3~6月	32.87	18.37	21.02	21.26
年平均流量的比例	7~8月	32.80	18.37	53.59	17.77
(%)	9~11月	7.63	5.63	53.59	17.77
	12~2月	2.75	5.63	21.02	17.77

2 结论与展望

本文选用栖息地法, 基于特定保护鱼类, 对大渡河流域的生态流量进行了分析与评价。主要结论如下:

足木足河非避冬期的最小生态流量介于 18.3~78.5m³/s, 避冬期为 6.6m³/s; 大金川非避冬期的最小生态流量介于 26.6~86.5m³/s, 避冬期为 26.6m³/s; 梭磨河最小生态流量全年为 28.3m³/s; 绰斯甲河非避冬期的最小生态流量介于 31.9~38.2m³/s, 避冬期为 31.9m³/s。足木足、马尔康、绰斯甲非避冬期的最小生态流量分别占多年平均流量的 7.6%~32.8%、21.2%~53.5%、17.7%~21.2%, 这个结果与 Tennant 法的要求较为一致^[35,36]。而大金川作为三河交汇河流, 计算所得最小生态流量占多年平均值的 5.6%~18.4%, 其数值与 Tennant 法的计算结果相比偏小, 造成计算结果存在误差的原因是, 大金川年平均流量较大, 观测资料数据中流量数据较大, 拟合得到的函数对低流量数据的计算存在一定误差。

本文仅对生态流量的相关问题进行了初步的探究, 仍存在一定局限性, 希望在今后的研究中进一步改进和完善, 现做两点展望:

(1) 本文选用栖息地指标法衡量河流的生态流量, 主要是通过相关水文参数的计算与分析求得的, 在今后的研究中, 可以将生态流量与区域鱼类通道破坏的实际情况综合起来考虑, 从水文学的视角为鱼类洄游通道的恢复提供对策与建议, 同时, 将鱼类通道的实际变动情况纳入生态流量的评价指标体系, 从而完善水利枢纽地区河流的生态流量评价。

(2) 栖息地法选择地区的代表性物种作为生态流量评价的指示物种, 可满足物种在不同生命阶段对栖息地环境的需求, 生物学理论基础牢固, 但特定物种并不能代表整个生态系统的需求, 且不同物种在对栖息地的需求上也存在一定的矛盾, 处理这些矛盾, 就需要消耗大量的人力与财力去搜集和分析不同的生物资料, 这也是栖息地指标法固有的一些弊端。因此, 在未来的研究中, 应进一步完善区域生态流量的评价指标体系, 合理选择指示物种, 并将不同地区的代表性物种合理归类, 构建适用于不同流域的综合生态流量评价指标体系。

参考文献:

[1] 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, 42(06): 678-684.

LI J, XIA Z Q. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(06): 678-684.

[2] 邵东国, 穆贵玲, 易淑珍, 等. 基于水域面积法的山区河流水电站下游生态流量定值研究 [J]. 环境科学学报,

2015, 35(09) : 2982—2988.

SHAO D G, MU G L, YI S Z, et al. Calculation of ecological flow setting for hydropower stations of mountainous river based on water surface area method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(09) : 2982—2988.

[3] 许新宜, 杨志峰. 试论生态环境需水量 [J]. *水利规划与设计*, 2003, 1: 21—26.

[4] 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(06) : 657—665.

WANG H R, CAO L L, XU X Y, 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(06) : 657—665.

[5] 王红瑞, 董艳艳, 王军红, 等. 黄河河口地区生态供水效益分析 [J]. *自然资源学报*, 2007, 22(06) : 924—935.

WANG H R, DONG Y Y, WANG J H, et al. Analysis of ecological water supply benefits in the estuary district of the Yellow river [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(06) : 924—935.

[6] KNIGHT R R, MURPHY J C, WOLFE W J, et al. Ecological limit functions relating fish community response to hydrologic departures of the ecological flow regime in the Tennessee river basin, United States [J]. *Ecohydrology*, 2015, 7 (5) : 1262 —1280.

[7] MARC V, RODNEY K, SANDRA P, et al. Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics [J]. *Water*, 2015, 7, 2358—2381.

[8] AHMADI N B, HILAIRE S A, BERUBE M, et al. Instream flow determination using a multiple input fuzzy-based rule system:A Case Study [J]. *River Research & Applications*, 2010, 24(3) : 279—292.

[9] 张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19 (08) : 1828 —1837.

ZHANG Q, CUI Y, CHEN Y Q. Evaluation of ecological instream flow of the Pearl River basin, south China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(08) : 1828—1837.

[10] 刘贵花, 朱婧瑄, 熊梦雅, 等. 基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究[J]. *水文*, 2016, 36(01) : 51—57.

LIU G H, ZHU J X, XIONG M Y, et al. Assessment of hydrological regime alteration and ecological flow at meigang station of Xinjiang river [J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(01) : 51—57.

[11] 李法云, 巴晓博, 屠克豹, 等. 辽宁省北部典型河流生态流量计算方法对比[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(06) : 168—174.

LI F Y, BA X B, TU K B, et al. Comparison of calculation methods of instream ecological flow in typical river of northern Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(6) : 168—174.

[12] 王俊钊, 张翔, 吴绍飞, 等. 基于生径比的淮河流域中上游典型断面生态流量研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(05) : 71—77.

WANG J C, ZHANG X, WU S F, et al. Environmental flow of the typical sections in upper and middle Huai River Basin based on REF [J]. South — to —North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(05) : 71—77.

[13] 刘国民, 姜翠玲, 王维琳, 等. 基于栖息地模型的新安江坝下生态流量研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(04) : 61—65.

LIU G M, JIANG C L, WANG W L, et al. Study on ecological flow under Xin' An river dam based on habitat model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(04) : 61—65.

[14] 刘中, 彭瑞文, 林霞, 等. 栖息地法确定樟溪河生态流量研究 [J]. 环境影响评价, 2015, 37 (05) : 49 — 51, 96.

LIU Z, PENG R W, LIN X, et al. The current treatments of VOCs in pharmaceutical industries [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(05) : 49—51, 96.

[15] 李洋, 吴佳鹏, 刘来胜, 等. 基于鱼类产卵场保护的汛期生态流量阈值研究初探——以锦屏大河湾为例 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16) : 306—312.

LI Y, WU J P, LIU L S, et al. Study on the eco—flow threshold Jinping river bend in flood season based on fish spawning grounds protection [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16) : 306—312.

[16] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(05) : 454—457.

XU W, DONG Z C, LUO X L, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(05) : 454—457.

[17] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述 [J]. 水科学进展, 2006, 17(3) : 430—434.

ZHONG H P, LIU H, GENG L H, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3) : 430—434.

[18] 王西琴, 刘昌明, 张远. 基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法——以辽河流域为例 [J]. 地理学报, 2006, 61(11) : 1132—1140.

WANG X Q, LIU C M, ZHANG Y. Water quantity /quality combined evaluation method for rivers' water requirements of the instream environmental flow in dualistic water cycle: A case study of Liaohe river basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11) : 1132—1140.

[19] 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—573.

YANG Z F, YU S W, CHEN H, 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—573.

[20] 英晓明. 基于 IFIM 方法的河流生态环境模拟研究 [D]. 河海大学, 2006.

YING X M. Research on river ecological & environmental modeling based on instream flow incremental methodology [D]. Hohai University, 2006.

[21] LEE S A, KONG C, ADEOLA O, et al. Different coefficients and exponents for metabolic body weight in a model to estimate individual feed intake for growing — finishing pigs [J]. *Asian Australasian journal of animal sciences*, 2016, 29(12) : 1756—1760.

[22] GALBRAITH H S, BLAKESLEE C J, COLE J C, et al. Evaluating methods to establish habitat suitability criteria: a case study in the upper Delaware river basin, USA [J]. *River Research & Applications*, 2014, 32(8) : 1765—1775.

[23] VIGAN G, CONFORTOLA G, FORNAROLI R, et al. Effects of future climate change on a river habitat in an Italian Alpine catchment [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 21(2) : 89—98.

[24] ZHENG W X, LUO C S, DENG Y Y, et al. Essentiality drives the orientation bias of bacterial genes in a continuous manner [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16431.

[25] SUN T, YANG Z F, CUI B S. Critical environmental flows to support integrated ecological objectives for the Yellow River Estuary, China [J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(8) : 973—989.

[26] 胡东来, 严登华, 宋新山, 等. 大渡河流域分布式水循环模型开发研究 [J]. *节水灌溉*, 2009(1) : 1—7.

HU D L, YAN D H, SONG X S, et al. Development of distributed hydrological cycle model for Dadu River basin [J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(1) : 1—7.

[27] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 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.

CHEN Y B, MU W G, PENG Q D, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics of four Chinese carps spawning [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2) : 130—133.

-
- [28] 周鑫. 草鱼对亚硝酸氮、氨氮和温度胁迫的生理响应 [D]. 中国海洋大学, 2012.
- ZHOU X. Physiological response to stress of nitrite, ammonia and temperature in grass carp, *Ctenopharyngodon idella* [D]. Ocean University of China, 2012.
- [29] 刘健康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 112—123.
- [30] 英晓明, 李凌. 河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用 [J]. 生态学报, 2006, 26(5) : 1567—1573.
- YING X M, LI L. Review on instream flow incremental methodology(IFIM) and applications [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5) : 1567—1573.
- [31] 关靖, 周风华, 刘猛. 生物空间需求法在河道生态需水量估算中的应用 [J]. 中国水运, 2015, 10: 191—192.
- [32] 郭文献, 夏自强. 长江中下游河道生态流量研究 [J]. 水利学报, 2007(10) : 619—623.
- GUO W X, XIA Z Q. Study on ecological flow in the middle and lower reaches of the Yangtze river [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(10) : 619—623.
- [33] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 河流生态需水计算方法评述 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(01) : 5—9.
- XU Z X, CHEN M J, DONG Z C. Comments on calculation methods for river ecological water demand [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2004, 32(01) : 5—9.
- [34] 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, 34(2) , 124—130.
- JIL N, LIU S X, LV H X, et al. Theoretical study of minimum instream flow requirement using the wetted perimeter method [J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2006, 34(2) , 124—130.
- [35] 门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. 南水北调西线一期工程河道最小生态径流的估算与评价 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(05) : 137—140.
- MEN B H, LIU C M, XIA J, et al. Estimating and evaluating on minimum ecological flow of western route project of China's South-to-North water transfer scheme for water exporting rivers [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(05) :137—140.
- [36] 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.