

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.008

河流生物栖息地的生态水文学研究

陈凯麒¹, 陶 洁²

(1. 国家环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:从研究对象、空间尺度和生态群体 3 个角度对河流生物栖息地进行分类, 阐述了生态指标与水文要素间主要存在的 4 种关系, 总结流量、流速、水位/水深、水温、水质等水流要素对河流生物的影响, 归纳了目前表征河流生物栖息地的水文水力学指标和适宜性评估方法, 并指出未来研究方向。
关键词:河流生物栖息地; 生态水文学; 生态群体; 生态指标; 水文要素; 水文情势; 水文水力学
中图分类号:X171.4; X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)06-0052-05

Research on eco-hydrology of river habitat

CHEN Kaiqi¹, TAO Jie²

(1. Appraisal Center for Environment & Engineering, Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China, Beijing 100012, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: River habitats were classified from three angles of research objects, spatial scales and ecological groups. Four relationships between ecological indicators and hydrological features were discussed. The affection on river biology of hydrological features, such as flow, velocity, water level/ water depth, water temperature, and water quality was summed up. Finally, the paper summarized hydrological-hydraulic indicators and suitability assessment methods for river habitat and pointed out the future research directions.
Key words: river habitat; eco-hydrology; ecological groups; ecological indicators; hydrological features; hydrological regime; hydrology and hydraulics

河流是重要的生物栖息地, 为众多物种提供生存繁衍的条件, 维系着生物的食物链及能量流过程。水文情势是影响河流生态系统结构和功能的关键因素之一, 直接表征河流栖息地状况, 并作用于栖息在其中的所有物种。作为生态学与水文学的交叉学科, 生态水文学是认识和研究河流生命系统和生命支持系统相互作用及耦合关系的重要理论与技术支持^[1]。河流生物栖息地的生态水文学研究主要包括两方面内容: 一是影响河流栖息地生态系统的主要水文因子; 二是河流栖息地生态系统和水文过程间的交互关系, 即水文过程变化对生态系统的驱动作用以及生态系统对水文过程变化的响应。国内外许多专家学者从不同区域、流域尺度开展了河流生物栖息地的生态水文学研究, 探讨了影响河流生物资源的水文学机制, 如, Petts 等^[2]基于 38 年数据指出 200 d 洪水下的鱼类产量是 20 d 下的 3 倍。Richter 等^[3]认为受大坝影响, 洛诺克河 5—6 月平均流量的增加导致河内鲈鱼产卵成功率下降, 且洪水脉冲频率的显著增加也使得鲈鱼的饵料资源, 即栖息在岸边的无脊椎动物, 因无法适应快速的干湿交替而数量减少。Peck 等^[4]证明鱼类生长率和食物转化率与水流速度成负相关关系, 但也有研究表明持续水流锻炼会促进鱼类的生长^[5-6]。李大鹏等^[7]指出高水流速度对史氏鲟的生长有着积极的影响, 史氏鲟的生长效率、特定生长率和日增重都随流速的增大而增大。李翀等^[8]认为“四大家鱼”产

基金项目: 中国长江三峡集团公司资助项目 (0799558, 0799556, 0799564)
作者简介: 陈凯麒 (1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水环境及生态保护、环境影响评价工作。E-mail: chenkg@acee.org.cn

卵场江段每年5—6月的总涨水日数是决定家鱼鱼苗发江量多少的一个重要环境因子。班璇等^[9]研究了三峡工程蓄水对中华鲟产卵的生态水文学影响,认为水位对中华鲟产卵有支配性影响。宋波澜等^[10]发现一定流速的水流能促进红鳍银鲫的生长,但流速过高会导致鱼类代谢强度过高,能量消耗大,反而抑制其生长,降低其生产效率。韩京成等^[11]发现流速的升高有助于雅砻江裂腹鱼幼鱼体质量和体长的增长,但高流速可能会因显著提高裂腹鱼的呼吸代谢而对裂腹鱼产生胁迫影响。郭文献等^[12]认为三峡水库蓄水引发的水流情势变化使得中华鲟产卵推迟约10d,产卵受精率平均下降65%,产卵规模降低。可见,河流生物(特别是指标性鱼类)栖息地的生态水文学研究一直备受关注,但我国河流生物栖息地的研究起步较晚,多数研究成果出现于2000年以后。笔者就河流生物栖息地的生态水文过程及相关研究展开探讨,旨在为进一步开展河流生物栖息地管理与保护奠定基础。

1 河流生物栖息地的定义和分类

栖息地通常指某种生物或某个生态群体生存繁衍的地区或环境^[13],包含物种的生存空间以及空间中所有环境因子。河流生物栖息地是指为河流生物提供生活环境的相关物理、化学、生物条件的组合。总的来说,河流生物栖息地可按如下标准划分。

a. 按研究对象划分。包括功能性栖息地和物理栖息地两类^[14]。以河流介质为研究对象,功能性栖息地可归纳为无机类(岩石、卵石、沙砾等)和植物类(蔓生植物、木头碎屑、浮叶植物等)两类^[1]。以水流的形态为研究对象,常见物理栖息地有浅滩、缓流、水潭、急流、岸边缓流和回流等类型^[14]。

b. 按空间尺度划分。尺度问题是开展河流栖息地研究首先要明确的关键问题,不同尺度栖息地对应不同的评估参数和指标体系^[15]。2001年,文献[16]在河流栖息地评价地形框架中分出了流域、景观单元、河流类型、地貌单元和水动力单元5个相互联系的河流栖息地尺度。欧盟等将栖息地分为微观、微观、中观、宏观、景观生态尺度等5个尺度。目前普遍将栖息地分为宏观(流域、河流廊道和整体河段)、中观(局部河段和潭-滩系列)、微观(流态、河床结构、岸边覆盖物等局部状况)3个尺度^[15]。

c. 按生态群体划分。按栖息在水域中的生物群体,河流生物栖息地可划分为鱼类的栖息地、鸟类的栖息地、植物栖息地、底栖动物栖息地等。鱼类栖息地通常是指“三场一通道”,即适合产卵的产卵场、为鱼类提供食物的索饵场、适于越冬的越冬场以及

连接不同生活史阶段的洄游通道^[17]。产卵场因关系到鱼类的繁衍生息,并且对环境条件要求相对较严苛,被认为是鱼类关键栖息地之一。

2 河流生物栖息地的生态水文过程

河流生物经过长期的进化和演变,会适应并选择适宜的生存场所,且在不同生活史阶段对生境的要求有所差别。以鱼类为例,繁殖期要求产卵场能提供合适的水深和水流速度,并且能确保没有障碍物,使鱼类顺利到达产卵场;产卵期要求有适宜且稳定的便于鱼卵孵化的底质,并提供适当的水温、溶氧和水流条件;摄食场需要提供适合生长所需的底质和有机质;同时为了尽量减小搜寻食物所耗的能量,要求有保护所、避难所、多样性水流类型、潭-滩系列等。也可以说,长期的天然水文情势影响甚至决定了河流生物的生长过程。水文情势不仅能改变河流栖息地的特性,包括河道的形状大小、支流和三角洲的形成、浅滩、激流、深潭和净水区域的分布,河流廊道的多样性和稳定性,水体营养物的类型和数量,以及主河道与漫滩的相互作用特征;还能影响物种的分布和丰度,影响水生群落的组成和多样性,甚至能导致土著物种多样性的丧失。

2.1 水文情势对河流生物的影响

2.1.1 流量

流量是表征河流整体特征的基本参数,其5要素(幅度、时间、频率、历时、变化率)对应特定的生态过程和特征,如流量的幅度过大易冲走作为鱼类饵料的底栖无脊椎动物,但也促进水系连通,便于营养物质交换,流量的幅度过小则易出现河段脱水现象,破坏物种的生存环境;峰值流量出现时间点的不同会扰乱鱼类的产卵行为,影响植物的繁衍生长;流量频率的不同会造成不同的生态系统,导致不同的物种生态演替等;某流量条件下特定水文过程持续时间的长短会影响物种的多样性、生长速度等;而流量变化率的快慢会影响物种的生命史行为、存活状况等。流量是影响河流生态系统完整性、系统结构和功能的重要因素。目前很多国家明确划定了河流最低流量标准,提出了生态流量的规定、原则等。

2.1.2 流速

流速是流量与河道断面特征的重要表现。大多生物对流速非常敏感。流速改变不仅会影响河道的淤积情况,还决定了生物在河流中所能接受的流体的能量,对物种生物过程(如呼吸、养分吸收和利用等)非常关键,能强烈影响生物的结构和行为适应性。鱼类对流速及其方向的行为反应称为趋流性。鱼类的趋流性,一般以感觉流速、喜爱流速和极限流

速为指标。感觉流速是鱼类对流速可能产生反应的最小流速值;喜爱流速是鱼类所能适应的多种流速值中最为适宜的流速范围;极限流速是鱼类所能适应的最大流速值,又称之为临界流速。

2.1.3 水位/水深

水位/水深是重要的水文条件,某些情况下也是物种不同生态过程(如鱼类产卵繁殖、鸟类迁徙)的触发信号,其值的大小受流量、断面形态和河床糙率等的综合影响。不同物种不同生命阶段对水位/水深的需求也不同。水位/水深变化会直接改变物种生活空间,改变水体光线穿透度和水体水温,影响河段内植物种群的类型、规模和分布等,形成不同的栖息环境,导致物种生物特征的改变。水位暴涨暴落会引起河道的强烈冲刷或突然干涸,对生物幼苗影响很大。对洄游性鱼类来说,过小的水位/水深则会破坏其洄游通道,阻碍鱼类生命周期的完成。

2.1.4 水温

鱼的体温随周围环境温度的改变而改变。根据对温度的适应性,可将鱼类分为暖水性鱼类、温水性鱼类和冷水性鱼类。根据对温度变化的耐受力,可将鱼类分为广温性鱼类(大部分温水性鱼类)和狭温性鱼类(大部分暖水和冷水性鱼类)。水温对鱼类的影响主要现在:①直接影响鱼类新陈代谢,使鱼类的摄食强度呈季节性的变化,并影响饵料的生长;②影响鱼类性腺发育,决定其产卵日期;③影响水中DO的质量浓度,加剧毒素毒性和致病细菌生长繁殖,导致鱼类患病。

2.1.5 水质

影响河流生物的水质指标主要包括 DO、营养盐溶度、pH 值、水体透明度等。DO 过低,易引起鱼类浮头,甚至窒息死亡;DO 过高,则易诱发鱼类气泡病。营养盐是浮游植物和水生植物的营养素,是鱼类天然饵料,部分可供鱼类等水生动物及细菌直接吸收;但对鱼类和水环境(如 pH 值、硬度、碱度等)都有一定影响。如水体中的硝酸盐最易被绿色浮游植物利用,其含量过高则易造成水体缺氧而导致鱼类死亡。透明度既反映了水体的能见度(水质特征),也描述了太阳光在水中的投射深度(光学参数)。水质恶化,水体透明度过低,会抑制水中植物进行光合作用和氧气释放,影响其生长繁殖的同时导致水中溶解氧不足,也对鱼类造成不利影响。

2.2 生态水文响应关系

建立河流生物栖息地的生态水文响应关系,即建立生态指标(如物种多样性、物种数量、物种质量、栖息地空间大小等)与水文要素特征(包括要素的幅度、时间、频率、历时、变化率)间的量化关系曲

线。目前,生态指标与水文要素间主要存在 4 种关系:直线型、单调曲线型、峰值型、阈值型(图 1)^[18]。

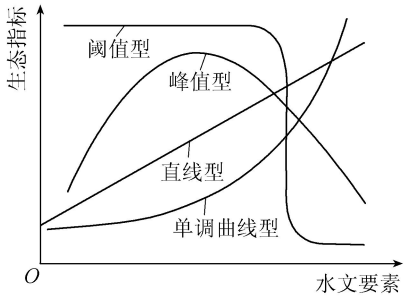


图 1 生态指标与水文水力要素间的关系曲线类型^[18]

2.2.1 直线型

示例见图 2(a)^[19]。以巢湖为例,在一定的水位内,其他影响鱼类生境的因素不变或变化较小时,淡水湖鱼年产量与水位是线性相关的。1996—2010 年 15 年间,巢湖鱼产量随着水位的变化整体呈逐年增加趋势,2000 年开始产量梯度先增大,后逐渐减小,最终趋于恒定。但鱼产量并不是随着水位的升高而绝对增大,如 2007—2010 年间巢湖的水位波动很小,但鱼产量仍然逐年增加,这是因为鱼产量不仅受水体空间范围的影响,还受其他因素如鱼苗投放规模、鱼类捕捞规模等的影响。通过对巢湖 15 年间丰、平、枯 3 种时期下的鱼产量与水位的相关性分析,可知巢湖水位与鱼类产量的相关性较为显著,枯水期尤甚,水位成为鱼类产量的主要制约因子。从丰、平水期的曲线图可见,产量曲线出现了凹凸,凹线处产量梯度明显变大,凸线处产量梯度变小,产量值也逐渐趋于恒定,不随水位的升高而增大。这是因为鱼类本身存在一个适宜水位范围,且当鱼类数量达到一定量级时,生存环境空间也有限。

2.2.2 单调曲线型

示例见图 2(b)^[20]。在 4 大家鱼繁殖期间,随着涨水时间的持续,家鱼卵苗径流量的大小会相应正向改变。4 大家鱼产卵行为普遍发生在水位涨水期间,水位下降,产卵行为则立即停止^[21-22]。即使在平水或退水时有少量产卵行为发生,也必然是在家鱼先受到了涨水刺激的前提下。

2.2.3 峰值型曲线

从图 2(c)^[23]可知,栖息地可利用面积随着流量的增加呈先增大后减小的趋势。对虎牙滩家鱼产卵场来说,曲线顶点,即最大栖息地可利用面积对应的流量,是其最适宜生态流量。曲线上第一个明显的转折点,是家鱼产卵所需最小的生态流量。

2.2.4 阈值型曲线

示例见图 2(d)^[24],低流量持续时间的减少不会对鱼产量造成影响;而低流量持续时间的增加会

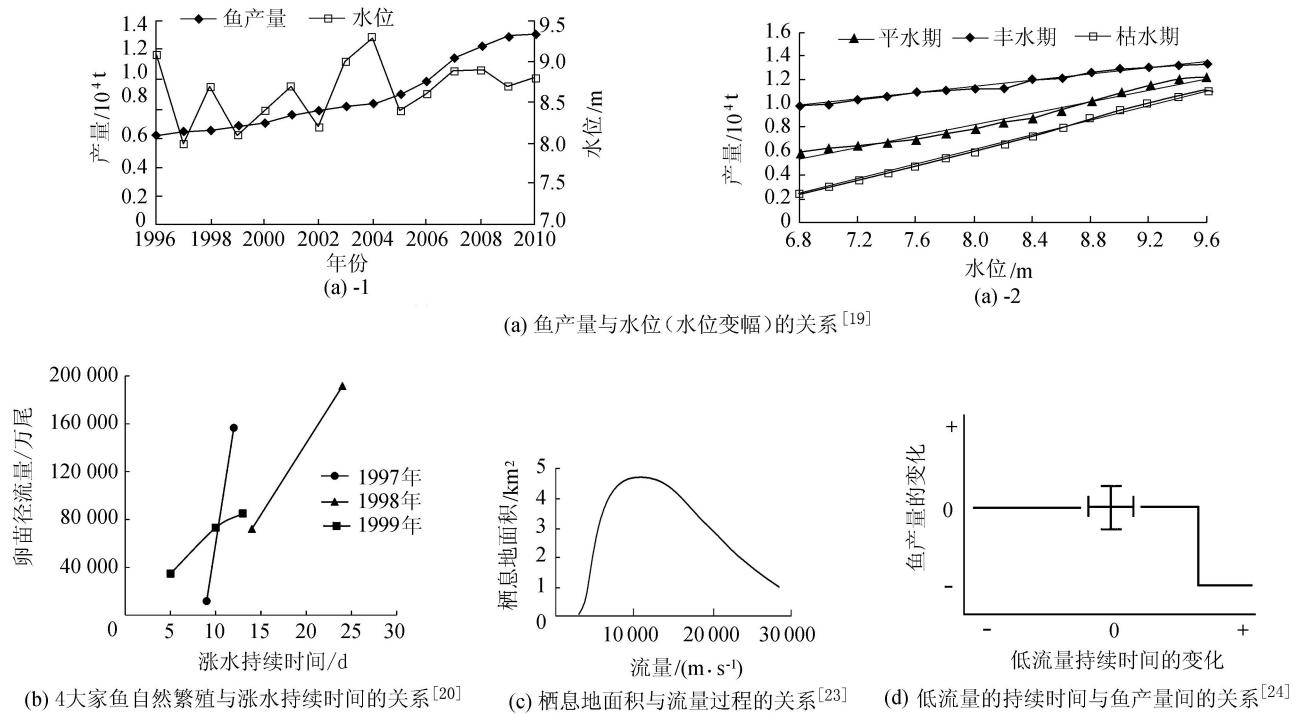


图2 生态指标与水文水力要素间的4种类型曲线

导致物种破坏,鱼类产量可能会突然骤减,并维持一定的鱼低产量基本不变。

3 栖息地的水文水力学表征指标和适宜性评估方法

3.1 鱼类栖息地的水文水力学表征指标

鱼类是河流生物的重要组成部分。常见表征鱼类栖息地的水文水力学指标可分为4类:①描述水流运动的,如:水量、水位、流速、含沙量等;②描述物理生境的,如:底质类型、河床形态特征、栖息地面积、植被多样性等;③描述水质的,如:水温、化学指标(pH值、营养物等)等;④流体力学中的无量纲量和特征量,如:弗劳德数、雷诺数、动能梯度、涡强等^[13]。

3.2 栖息地适宜性评估方法

河流生物栖息地适宜性评估,即是评估河流的水文条件、物理化学条件和河流地貌学特征对于生物群落的适宜程度^[15]。目前普遍采用的方法有2类:

a. 参数评价法。主要通过水文、水力学、地貌、化学等参数间接反映河流栖息地状况,如通过流量、水位、水面宽度等水文参数的评价方法有河道湿周法、R2CROSS法、河道内流量增加法(IFIM)、有效宽度法(UW)等;通过河流地貌特征的评价方法有Rosgen地貌分类模型、河流形态框架法、Thorne现场踏勘法、Downs栖息地评估法、河流栖息地调查法等。还有如美国环境保护局提出的《快速生物评估草案》(RBP)、USFWS栖息地评估法、河流条件指数法、生物完整性指数法(IBM)、河流状态调查法等从

河流生物栖息地的整体出发的综合评价法。

b. 栖息地模拟法。主要包括栖息地适宜度模型,以及模拟生物种群、种群生理机能或生物能的过程模型等。栖息地适宜度模型,如多变量统计模型、PHABSIM等,用来描述某一环境对某一特定物种生存和繁殖的适合程度,并通过栖息地适合度方程对影响某一物种生存、繁殖的关键生态因子进行综合评价。生物生理机能或生物能模型,如BIORIV、NORSALMOD、ENERGI、个体模型IBM等,从微观栖息地尺度模拟生物生长死亡过程,计算生物进行生命活动所需能量,以判断栖息地的适宜性。

4 结 语

我国河流生物栖息地的研究正处于起步阶段,栖息地资料稀缺,调查范围有限,水文过程的生态效应认识有限、理化过程与生物的适宜性研究较少,栖息地模拟进展较小等问题普遍存在。亟须从以下几方面进一步开展全面深入研究:①河流栖息地的勘测和调查;②河流生物行为与水文水力学之间的交互关系,特别是理化过程、地貌过程对生物的影响;③栖息地评估和模拟技术;④河流生物栖息地管理、河流生态修复的理论与实践。

参考文献:

- [1] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展,2010(4):550-559.
(DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. An

- holistic concept model for the structure and function of river ecosystems [J]. *Advances in Water Science*, 2010 (4):550-559. (in Chinese))
- [2] PETTS G, AMOROS C. Fluvial hydrosystem [M]. london: Chapman & Hall Ltd, 1998.
- [3] RICHTER B D. How much water does a river need [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37:231-249.
- [4] PECK M, BUCKLEY L, BENGTSON D. Energy losses due to routine and feeding metabolism in young-of-the-year juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2003, 60:929-937.
- [5] LEON K A. Effect of exercise on feed consumption, growth, food conversion and stamina of brook trout [J]. *Progressive Fish-Culturist*, 1986, 48:43-46.
- [6] TOTLAND G, KRYVI H, JØDESTØL K, et al. Growth and composition of the swimming muscle of adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during long-term sustained swimming [J]. *Aquaculture*, 1987, 66:299-313.
- [7] 李大鹏, 庄平, 严安生, 等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响 [J]. *水产学报*, 2004 (1):54-61. (LI Dapeng, ZHUANG Ping, YAN Ansheng, et al. The influences of illumination, water current and stocking density on feeding, behavior and growth in juveniles *Acipenser schrenckii* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004 (1):54-61. (in Chinese))
- [8] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006 (3):170-176. (LI Chong, PENG Jing, LIAO Wengen. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006 (3):170-176. (in Chinese))
- [9] 班璇, 李大美. 葛洲坝枢纽工程对中华鲟产卵场的生态水文学影响研究 [C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 昆明:中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2006.
- [10] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化 [J]. *动物学报*, 2008, 54 (4):686-694. (SONG Bolan, LING Xiaotao, WANG Weijun, et al. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tinfoil barbs *Barbodes schwanenfeldi* [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54 (4):686-694. (in Chinese))
- [11] 韩京成, 刘国勇, 诸葛亦斯, 等. 水电开发背景下雅砻江鱼类资源的生态保护 [J]. *三峡大学学报:自然科学版*, 2009 (5):15-19. (HAN Jingcheng LIU Guoyong, ZHUGE Yisi, et al. Ecological protection of fishery resources based on development of hydropower in Yalona River [J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2009 (5):15-19. (in Chinese))
- [12] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究 [J]. *水力发电学报*, 2011 (3):22-26. (GUO Wenxian, WANG Hongxiang, XU Jianxin, et al. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes [J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2011 (3):22-26. (in Chinese))
- [13] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述 [J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2007, 35 (2):125-130. (YANG Yu, YAN Zhongmin, QIAO Ye. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats [J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2007, 35 (2):125-130. (in Chinese))
- [14] 石瑞花, 许士国. 河流生物栖息地调查及评估方法 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19 (9):2081-2086. (SHI Ruihua, XU Shiguo. Methods for river habitat survey and evaluation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (9):2081-2086. (in Chinese))
- [15] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展 [J]. *科技导报*, 2008 (17):82-88. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment [J]. *Science and Technology Review*, 2008 (17):82-88. (in Chinese))
- [16] 李倩. 长江上游保护区干流鱼类栖息地地貌及水文特征研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
- [17] 王成友. 长江中华鲟生殖洄游和栖息地选择 [D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [18] WANG J N, DONG Z R, LIAO W G, 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*, 2013, 43 (6):715-726.
- [19] 陈文江, 谭炳卿, 吕友保. 巢湖生态调水对鱼类资源的影响分析 [J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2012 (12):1681-1685. (CHEN Wenjiang, TAN Bingqing, LYU Youbao. Analysis of the effect of ecological water transfer on fish resources of Chaohu Lake [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2012 (12):1681-1685. (in Chinese))
- [20] 邱顺林, 刘绍平, 黄木桂, 等. 长江中游江段四大家鱼资源调查 [J]. *水生生物学报*, 2002 (6):716-718. (QIU Shunlin, LIU Shaoping, HUANG Mugui, et al. Monitoring of spawning sites of four major Chinese carps in the middle section of Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002 (6):716-718. (in Chinese))

(下转第 75 页)

efficiency of water use and its determinants, study at small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa [EB/OL]. [2015-06-22]. <http://www.doc88.com/p-254258076105.html>.

[18] 孙才志,李红新. 辽宁省水资源利用相对效率的时空分异[J]. 资源科学,2008,30(10): 1442-1448. (SUN Caizhi,LI Hongxin. Spatio-temporal differences in relative efficiency of water resource utilization in Liaoning Province [J]. Resources Science,2008,30(10): 1442-1448. (in Chinese))

[19] 孙才志,王妍,李红新. 辽宁省用水效率影响因素分析[J]. 水利经济,2009,27(2): 1-5. (SUN Caizhi,WANG Yan,LI Hongxin. Influencing factors of water utilization efficiency in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Resources,2009,27(2): 1-5. (in Chinese))

[20] 雷贵荣,胡震云,韩刚. 基于 SFA 的农业用水技术效率和节水潜力研究[J]. 水利经济,2010,28(1): 55-58. (LEI Guirong, HU Zhenyun, HAN Gang. Technical efficiency and water saving potential in agriculture water based on SFA [J]. Journal of Economics of Water Resources,2010,28(1): 55-58. (in Chinese))

[21] 刘玉海,武鹏. 能源消耗、二氧化碳排放与 APEC 地区经济增长:基于 SBM-Undesirable 和 Meta-frontier 模型的实证研究[J]. 经济评论,2011(6): 109-120. (LIU Yuhai, WU Peng. Energy consumption, carbon dioxide emission and regional economic growth in the APEC economies[J]. Economic Review,2011(6): 109-120. (in Chinese))

[22] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2001,13(2): 498-509.

[23] BATTESE G E, RAO D S P. Technology gap, efficiency and a stochastic metafrontier function [J]. International Journal of Business and Economics,2002,1(2): 87-93.

[24] RAO D S P, O' DONNELL C J, BATTESE G E. Meta-frontier functions for the study of inter-regional productivity differences [D]. Queensland: Queensland University,2003.

[25] BATTESE G E, O' DONNELL C J, RAO D S P. A metafrontier frameworks production function for estimation of technical efficiency and technology gap for firms operating under different technology [J]. Journal of Productivity Analysis,2004,21(1): 91-103.

[26] 闵锐,李谷成. 环境约束条件下的中国粮食全要素生产率增长与分解:基于省域面板数据与序列 Malmquist-Luenberger 指数的观察[J]. 经济评论,2012(5): 34-42. (MIN Rui, LI Gucheng. A study on growth and decomposition of China's grain TFP growth under environmental constrains: empirical analysis based on provincial panel data and sequential Malmquist-Luenberger index [J]. Economic Review,2012(5): 34-42. (in Chinese))

[27] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命:1978—2008 年 [J]. 经济学,2014,13(2): 537-558. (LI Gucheng. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008 [J]. China Economic,2014,13(2): 537-558. (in Chinese))

[28] 赖斯芸,杜鹏飞,陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(9): 1184-1187. (LAI Siyun, DU Pengfei, CHEN Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2004,44(9): 1184-1187. (in Chinese))

[29] 李静,马潇臻. 资源与环境约束下的产粮区粮食生产用水效率与影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2015,36(2): 252-258. (LI Jing, MA Xiaocan. Study on water utilization efficiency and its influencing factors of grain production under the constraints of resource and environment in grain-producing regions [J]. Research of Agricultural Modernization,2015,36(2): 252-258. (in Chinese))

[30] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等. 中国农业全要素用水效率及其影响因素分析[J]. 经济问题,2014(6): 101-106. (TONG Jinping, MA Jianfeng, WANG Huimin, et al. Research on agricultural total-factor water use efficiency and its influencing factors in China [J]. Economic Issues,2014(6): 101-106. (in Chinese))

[31] 张力小,梁竞. 区域资源禀赋对资源利用效率影响研究 [J]. 自然资源学报,2010,25(8): 1237-1247. (ZHANG Lixiao, LIANG Jing. Effect of the regional resource endowment on resource utilization efficiency [J]. Journal of Natural Resources,2010,25(8): 1237-1247. (in Chinese))

(收稿日期:2015-08-15 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第 56 页)

[21] 余志堂,邓中彝,许蕴珩,等. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流四大家鱼产卵场的现状及工程对家鱼繁殖影响的评价[C]//葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉:湖北科学技术出版社,1988.

[22] 常剑波,陈永柏,高勇,等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策[C]//中国水利学会 2008 学术年会论文集. 北京:中国水利学会,2008.

[23] 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(6):678-684. (LI Jian, XIA Ziqiang. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(6): 678-684. (in Chinese))

[24] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biol,2010,55: 147-170.

(收稿日期:2015-08-09 编辑:彭桃英)