

Overview of Calculation Method for Ecological Water Requirement

Xi Mao, Jiehao Zhang, Ting Luo, Xinlan Liang, Junyu Zhou, Wenjie Ren

College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan
Email: maowhiteknight@163.com

Received: Apr. 25th, 2017; accepted: May 13th, 2017; published: May 16th, 2017

Abstract

Power generated by hydropower stations changes the spatial and temporal distributions of flow. The hydrological regime of river reaches at the downstream of the dam is changed by the operation of power stations, which will bring tremendous negative impact on the aquatic ecology. The research on the method of determining the ecological water requirement of river is the hot spot and difficulty in the research of water conservancy and environmental engineering. After a detailed survey and summary of relevant literatures, this paper gives a detailed description of the current situation of ecological water requirement in China and abroad, and puts forward the prospects for future research.

Keywords

Ecological Water Requirement, Water Resource, Ecological Restoration, Calculation Method

生态需水计算方法综述

毛 熹, 张杰豪, 罗 婷, 梁心蓝, 周俊宇, 任文杰

四川农业大学水利水电学院, 四川 雅安
Email: maowhiteknight@163.com

收稿日期: 2017年4月25日; 录用日期: 2017年5月13日; 发布日期: 2017年5月16日

摘 要

水力发电改变了流量的时空分布规律。电站的运行将使坝下河段水文情势发生变化, 给水生生境带来较大的负面影响。关于河流生态需水量确定方法的研究, 是水利工程、环境工程等学科的研究热点和难点。经过对相关文献进行的翔实调查与总结, 本文对生态需水研究的国内外现状进行了较为详细的阐述, 并提出了对未来研究的展望。

作者简介: 毛熹, 1987年生, 广西富川人, 博士, 讲师, 主要研究方向为水力学及河流动力学。

关键词

生态需水, 水资源, 生态修复, 计算方法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水利工程的建设改变了水量的时空分布规律, 其中以引水式、混合式、以及堤坝式水电站的影响为甚, 引水式、混合式水电站引水发电, 以及堤坝式电站的调峰运行, 都会使电站下游河段的水文情势发生剧烈变化, 进而对河道的综合功能造成不利影响, 尤其在枯水季节, 会使电站下游出现减水河段, 甚至脱水河段, 河道减脱水给水生态环境带来了较大的负面影响[1] [2] [3]。另一方面, 我国存在相当数量建设较早的电站, 这些电站修建时并未对其提出生态基流要求, 导致目前大部分河道出现减脱水河段[4]。随着水电开发的不断深入, 如不对其产生的上述现象采取有效的措施, 此类水生态环境破坏的现象将会大量出现。河道生态需水是针对此开展的生态修复研究的热点。

2. 国内外研究现状

2.1. 国外研究现状

河道生态需水的研究在国外开展得较早, 目前国外广泛应用的河道生态需水的计算方法主要分为三类[5]: 1) 是根据水文资料的部分径流量来确定的人文法, 该类方法是传统的流量计算方法, 比如, 7Q10法[6] [7] [8]、Tennant法[9]; 2) 是基于水力学基础的水力学法, 比如: 河道湿周法[10] [11]、R2-CROSS法[12]; 3) 是基于生物学基础的栖息地计算方法, 比如: IFIM法[13] [14] (Instream Flow Incremental Methodology, 河道内流量增加法)、CASIMIR法[15] (Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements In Diverted Stream)等。以上各种方法对解决河道生态需水问题都比较实用。但水文学和水力学法都存在欠缺的地方, 它们都不能明确地将河道物理特性和河道流量与生物对栖息地的选择特性联系起来, 而栖息地法能预测栖息地质量如何随水流流态变化而变化, 是一种非常灵活的估算河流流量的方法, 也是一种国外应用比较广泛的生态需水评价方法, 栖息地法中的代表方法是美国渔业及野生动物署(USFWS)在20世纪70年代末开发的河道内流量增量法(IFIM) [16]。该法主要针对某些特定的河流生物物种的保护, 将大量的水文水力学现场数据, 如水深、流速、河流底质类型等, 与选定的水生生物物种在不同生长阶段的生物行为选择信息相结合, 采用模拟手段进行流量增加变化对栖息地质量变化的影响进行评价, 其核心是将水力学模型与生物栖息地偏好特性相结合, 模拟流量与栖息地之间定量关系, 模拟的水生生物主要是鱼类, 也可以模拟其它生物。通过对 IFIM 法的不断深入研究, 又相继出现了许多与之有关的模型, 如 PHABSIM 模型[17] [18] (Physical Habitat Simulation System)和 River2D 模型[19] [20]。

生态需水的下泄, 逐渐成为流域开发、生态环境保护的重要措施。例如在美国, 对生态需水的重视程度使得其对水资源进行评价时采用了多维指标体系, 这些指标体系包括: 河流的水环境生态用水、水陆过渡带的生态用水、旅游景观用水、水力发电及航运用水等多个方面[21]。随着生态环境恶化日益严重, 生态系统对水量的需求问题成为世界研究的热点, 并开展了大量的研究工作: Covich 提出了水资源管理和分配必须重视生态最小流量的下泄问题[22]; Gleick 认为人类的活动应尽可能的减小对河流生态系统的扰动, 并提出了生态系统保护中的基本生态需水的概念[23]; 一种称为 green water 的概念认为在水资源只有在满足人类生存和发展, 满足生态

环境稳定的基础上，才是健康的水资源[24]。

世界上越来越多的国家开始重视生态环境的保护，其中关于生态流量的保护积累了较为丰富的经验，并已经开始进行司法实践。一些国家和地区已经将河流的生态基本流量的计算、下泄方案、实施保障等列入国家法律保证范围内：在澳大利亚和南非，已经有专门的法律对生态用水进行规定；美国的地方法律体系中，已经有多个州将生态用水列入法律强制执行，科罗拉多州甚至将生态水量视为该州的公共财产，政府将生态水量作为公共财产进行管理；在加拿大，已经对所有的河流制定了生态下泄流量，并通过法律强制执行[25]。

2.2. 国内研究现状

2000年以前，国内主要以生态基本流量、环境用水的研究为主。方子云等人首先明确提出生态用水的概念和理论[26]；这一时期，我国的水资源运行与管理主要是以处理人类社会系统与水资源系统之间的矛盾为主，将水资源在人类生产活动为基础上进行优化配置，实现流域内、流域之间的需求平衡，但并没有将水资源与生态系统联系起来，忽略了人类社会以外的生态环境对水资源的需求[27]。

2000年之后，国内研究者开始关注生态系统的水资源需求问题。并且随着国内学界对生态需水的理解深入，将过去主要注重于水资源缺乏区的生态用水以及水质状况的研究，逐渐向普遍型河流转变[28]。主要计算生态需水的方法基本上是借鉴外国相对成熟的理论方法，但是由于我国地域广，各流域的经济、自然、生态状况迥异，因此很难形成一套公认的、标准的、具有普遍适用性的生态需水计算公式[29]。

在中国，生态需水的研究可以划分为以下几个重要阶段：

1) 20世纪的70年代末期，国内学者开始研究最小生态需水的问题，在这一时期，研究内容主要集中在参考、引用和借鉴国外对河流和湖泊等的生态需水最小值的计算方法，这些方法理论包括[30]：7Q10法、增量法、Tennant法、湿周法等水文学或水力学方法。在当时，7Q10生态需水计算法是较早从国外引入国内的方法之一，从7Q10生态需水计算法的研究内容来说，该方法也可称为“维持水生生物最小流量标准法”，但是，在使用过程中发现，这种方法有相当大的缺憾，那就是在其确定生态需水时，采用“最小标准”，所产生的后果会引起水生生物、滨水动植物群落严重退化，这一后果说明，采用这种方法需要谨慎使用[31]；由于增量法在国外是一种常用的生态需水确定方法，因此国内有学者将其借鉴引用到我国的河流研究中，该方法的主要原理是[32]：随着河流流量的递增，水生生物的生境会因此面发生改变，如果以观察指示生物的生境变化为研究手段，就可以得出生境发生变化的河道水量拐点值，这个拐点值就可视为生态需水[33]，增量法的研究“需要考虑水量、流速、水质、底质、水温等多个影响因子”[34]。

2) 随着我国出现全国性的水质危机，生态需水在国内的研究得到进一步的发展，在此期间，国务院环境保护委员会出台了《关于防治水污染技术政策的规定》[35]，《规定》指出：“在水资源规划时，要保证为改善水质所需的环境用水”。在这一阶段，国内生态需水相关的研究工作主要集中在宏观战略方面的研究，对如何实施生态下泄流量、如何保证生态流量、如何管理生态需水等相关问题尚处于探索阶段[36]。

3) 20世纪末，随着水污染进一步加剧，我国各大流域的生态环境问题日益突出，针对流域尺度下的水资源分配，水利部明确规定水资源流域间的分配必须将环境、生态用水量加以考虑。例如，在进行全国水功能区划时，将环境与生态用水作为重要条件加以考虑；刘昌明提出了我国21世纪水资源供需的“生态水利”问题[37]。在这一阶段，国内相关研究领域的专家学者针对生态环境用水、水电开发的生态流量下泄等问题的研究工作也全面展开，一般采用的方法有10年最枯月平均流量法[38]，即采用近10年最枯月平均流量或90%保证率河流最枯月平均流量作为河流环境用水，最初用于水利工程建设的环评影响评价[39]。另外，还有以水质目标为约束的生态需水计算方法，主要计算污染水质得以稀释自净的需水量，将其作为满足环境质量目标约束的城市河段最小流量[40]。

4) 2000年以后，我国对生态环境保护工作更加重视，环保总局曾发文规定：“为维护河段水生生态系统稳

定,水利水电工程必须下泄一定的生态流量,将其纳入工程水资源综合配置中统筹考虑”,该文同时指出:“生态流量需要考虑以下因素:工农业生产及生活需水量,维持水生生态系统稳定所需水量,维持河道水质的最小稀释净化水量,维持河口泥沙冲淤平衡和防止咸潮上溯所需水量,水面蒸散量、维持地下水动态平衡补给需水,航运、景观和水上娱乐环境需水量和河道外生态需水”[41]。在这种背景下,针对国内对河道生态环境需水量的确定大多数时候都仅限于水文学法及水力学法,而这些方法对于确定规模较大、社会地位较重要的河流内维持水生生物生态系统稳定所需要的生态基本水量问题都具有不足之处,李嘉等人首次提出生态水力学法的概念,将生境比拟法应用于生态下泄基流量的研究,这种方法能预测水力生境参数如何随流量变化而变化,通过水力生境指标体系及其标准值估算最小流量[42]。但就目前而言,针对这种方法的探究并没有太深入,还有待进一步完善。

另一方面,针对生态需水,国内有学者从一些不同的角度,进行了相应的综述研究。例如:严登华等人的综述研究从生态系统平衡和生物水分生理的角度,对我国生态需水研究体系进行了初步探究[43];张丽等人的综述研究通过分析河流、湿地湖泊等水域生态系统的生态需水,认为不同生态系统目标下生态需水量的分析还需进一步探讨[44];孙涛等人的综述研究探讨了河口这一特殊生态系统在生态需水研究中面临的一些问题[45]。

3. 建议与展望

生态需水研究是进行生态用水控制的基础。上述研究现状分析表明,国内外对生态需水的研究在概念、内涵以及研究体系等方面的观点并不统一,理论上尚不完善,计算上也还没有形成普遍适用的方法,生态需水的研究处于理论与计算方法逐步完善的阶段。而在洪水灾害、江河湖泊水污染、河道断流等一系列生态环境问题加剧后,各国对生态需水的研究进一步重视。

目前,国内外的研究主要集中在河流生态需水的涵义及计算方法方面,对于水利工程的生态影响也有所涉及,但由于其研究对象、研究思路和技术手段各不相同,许多关于河流生态系统的概念有很多表达方式,派生了许多相关的理论框架和理念。尤其对于中国而言,从生态需水计算方法的发展过程来看,我国的各种生态需水计算方法研究主要表现出深度不够、研究理论不封闭、定性分析多于定量分析,即使是定量分析也主要集中在宏观大尺度方面。因此,翔实、系统的生态需水定量研究体系还需要进一步研究。

基金项目

国家自然科学基金青年科学基金项目(41601292);四川省教育厅自然科学基金项目(035Z1994);四川农业大学(04070066)。

参考文献 (References)

- [1] 王树人. 水电站建筑物[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
WANG Shuren. Structure of hydropower station. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese)
- [2] 赵文谦. 环境水力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1986.
ZHAO Wenqian. Environmental hydraulics. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1986. (in Chinese)
- [3] 王玉蓉, 李嘉, 李克锋, 等. 雅砻江锦屏二级水电站减水河段生态需水量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 81-85.
WANG Yurong, LI Jia, LI Kefeng, et al. Ecological water demand of reducing reach of Yalong River downstream of Jinping waterpower station stage II. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 81-85. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[R]. 中华人民共和国水利部, 2013.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of soil and water conservation for the first National Water Conservancy Survey. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2013. (in Chinese)
- [5] ERSKINE, W. D., BEGG, G., JOLLY, P., et al. Recommended environmental water requirements for the Daly River, Northern

- Territory, based on ecological, hydrological and biological principles. 2003.
- [6] TELIS, P. A. Techniques for estimating 7-day, 10-year low-flow characteristics for ungaged sites on streams in Mississippi. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 1992.
- [7] ZABET, S. A comparison of 7Q10 low flow between rural and urban watersheds in eastern United States. 2012.
- [8] AMES, D. P. Estimating 7Q10 confidence limits from data: A bootstrap approach. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2006, 132(3): 204-208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(204\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(204))
- [9] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- [10] THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research & Applications*, 2003, 19(5-6): 397-441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>
- [11] JHA, R., SHARMA, K. D. and SINGH, V. P. Critical appraisal of methods for the assessment of environmental flows and their application in two river systems of India. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2008, 12(3): 213-219. <https://doi.org/10.1007/s12205-008-0213-y>
- [12] WEATHERRED, J. D., SILVEY, H. L. and PFANKUCH, D. J. Program documentation for R2-CROSS-81. 1981.
- [13] STALNAKER, C., LAMB, B. L., HENRIKSEN, J., et al. The instream flow incremental methodology: A primer for IFIM. 1995: 29.
- [14] NAVARRO, J. E., MCCAULEY, D. J. and BLYSTRA, A. R. Instream flow incremental methodology (IFIM) for modelling fish habitat. 1994.
- [15] SMITH, S. D., SALA, A., DEVITT, D. A., et al. Evapotranspiration from a saltcedar-dominated desert floodplain: A scaling approach. *Proceedings Shrubland Ecosystem Dynamics in a Changing Environment*, 1996, 338(1): 199-204.
- [16] THEILING, C. H., NESTLER, J. M. River stage response to alteration of Upper Mississippi River channels, floodplains, and watersheds. *Hydrobiologia*, 2010, 640(1): 17-47. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-0066-5>
- [17] MILHOUS, R., MA, U. and SCHNEIDER, D. Physical habitat simulation system reference manual. School of Computer Science Technical University of Madrid, 1989.
- [18] MILHOUS, R. T., WEGNER, D. L. and Waddle, T. User's guide to the physical habitat simulation system (PHABISM). Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 1984.
- [19] KATOPODIS, C. Ecohydraulic modeling with RIVER2D a Canadian contribution to worldwide E-Flow regimes. American Fisheries Society 1 Meeting. 2014.
- [20] GLAWDEL, J., KWAN, S., NAGHIBI, A., et al. Using river 2D morphology to predict salmon redd survival during high flow events from hydroelectric dam operations. *World Environmental and Water Resources Congress*. 2011: 2562-2571.
- [21] HENRY, C. P., AMOROS, C. and GIULIANI, Y. Restoration ecology of riverine wetlands: II. An example in a former channel of the Rhône River. *Environmental Management*, 1995, 19(6): 903-913. <https://doi.org/10.1007/BF02471941>
- [22] COVICH, A. P. The ecology of tropical lakes and rivers, by A. I. Payne. *Freshwater Science*, 1989. <https://doi.org/10.2307/1467410>
- [23] GLEICK, P. H. Environmental consequences of hydroelectric development: The role of facility size and type. *Energy*, 1992, 17(8): 735-747.
- [24] KRISHNANI, K. K., KATHIRAVAN, V., NATARAJAN, M., et al. Diversity of sulfur-oxidizing bacteria in greenwater system of coastal aquaculture. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 162(5): 1225-1237. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8886-3>
- [25] HENRY, C. P., AMOROS, C. Restoration ecology of riverine wetlands: I. A scientific base. *Environmental Management*, 1995, 19(6): 891-902. <https://doi.org/10.1007/BF02471940>
- [26] 方子云. 环境水力学导论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
FANG Ziyun. Introduction to environmental hydraulics. Beijing: China Environmental Science Press, 1994. (in Chinese)
- [27] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 1-6.
WANG Hao, QIN Dayong and WANG Jianhua. Concept of system and methodology for river basin water resources programming. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(8): 1-6. (in Chinese)
- [28] 马绍休, 王涛, 张建民, 等. 民勤地区供水和生态需水量分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 58-61.
MA Shaoxiu, WANG Tao, ZHANG Jianmin, et al. The theory of ecological water requirement for vegetation and its application to minqin basin. *Research of Soil & Water Conservation*, 2006, 13(6): 58-61. (in Chinese)
- [29] 张志国. 生态需水概念与计算方法[J]. 资源开发与市场, 2010, 26(9):799-802.
ZHANG Zhiguo. Concept and calculation method of ecological water requirement. *Journal of Resource Development and*

- Marketing, 2010, 26(9): 799-802. (in Chinese)
- [30] 王光谦. 流域水量调控模型与应用[M]. 武汉: 科学出版社, 2006.
WANG Guangqian. Regulation model and application of basin water. Wuhan: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [31] ARMSTRONG, J. D., KEMP, P. S., KENNEDY, G. J. A., et al. Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research*, 2003, 62(2): 143-170.
- [32] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证[J]. 中国科学:地球科学, 2004, 34(11): 1072-1082.
YANG Zhifeng, CUI Baoshan and LIU Jingling. Methods and examples of ecological environmental water demand assessment. *Chinese Science: Earth Science*, 2004, 34(11): 1072-1082. (in Chinese)
- [33] 王玉. 生态调度中生态环境需水量确定与水库富营养化控制[D]: [硕士学位论文]. 贵阳市: 贵州大学, 2008.
WANG Yu. Determination of ecological water demand and ecological eutrophication control in ecological scheduling. Guiyang: Guizhou University, 2008. (in Chinese)
- [34] 宋兰兰. 南方地区生态环境需水研究[D]: [博士学位论文]. 南京市: 河海大学, 2005.
SONG Lanlan. Study on ecological and environmental water demand in south China. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [35] 国务院环境保护委员会. 关于防治水污染技术政策的规定[J]. 水资源保护, 1987(1): 16-21.
Environmental Protection Committee of the State Council. Regulations on the prevention and control of water pollution. *Water Resources Protection*, 1987(1): 16-21. (in Chinese)
- [36] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 海河水利, 2003, 55(1): 6-8.
LI Lijuan, ZHENG Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in haihe-luanhe basins. *Haihe Water Resources*, 2003, 55(1): 6-8. (in Chinese)
- [37] 刘昌明. 我国西部大开发中有关水资源的若干问题[J]. 中国水利, 2000(8): 23-25.
LIU Changmin. Some problems of water resources in the western development of China. *China Water Resources*, 2000(8): 23-25. (in Chinese)
- [38] 石伟, 王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 595-602.
SHI Wei, WANG Guangqian. Estimation of ecological water requirement for the lower Yellow River. *Geography Journal*, 2002, 57(5): 595-602. (in Chinese)
- [39] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究(2)——基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 129-137.
WANG Fang, WANG Hao, CHEN Minjian, et al. A study of ecological water requirements in Northwest China Part II: Application of remote sensing and GIS. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 129-137. (in Chinese)
- [40] 姜德娟, 王会肖, 李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 369-378.
JIANG Dejuan, WANG Huixiao and LI Lijuan. A review on the classification and calculating methods of ecological and environmental water requirements. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 369-378. (in Chinese)
- [41] 国家环境保护总局. 水电水利建设项目水环境与水生生态保护技术政策研讨会会议纪要[R]. 国家环境保护总局办公厅, 2006-1-10.
State Environmental Protection Administration. Summary of the symposium on water environment and aquatic ecological protection technology policy for hydropower and water conservancy projects. State Environmental Protection Administration, 2006-1-10. (in Chinese)
- [42] 李嘉, 王玉蓉, 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. Eco-hydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1169-1174. (in Chinese)
- [43] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 267-273.
YAN Denghua, WANG Hao, WANG Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 267-273. (in Chinese)
- [44] 张丽, 李丽娟, 梁丽乔, 等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.
ZHANG Li, LI Lijuan, LIANG Liqiao, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 307-312. (in Chinese)
- [45] 孙涛, 徐静, 刘方方, 等. 河口生态需水研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 282-288.
SUN Tao, XU Jing, LIU Fangfang, et al. Advances in the assessment of ecological water requirements in estuaries. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 282-288. (in Chinese)