

DOI: 10.5846/stxb201411052181

全元, 刘昕, 王辰星, 单鹏, 董孟婷, 唐明方, 吴钢. 生态需水在输水工程生态影响评价中的应用. 生态学报, 2016, 36(19): 6012-6018.

Quan Y, Liu X, Wang C X, Shan P, Dong M T, Tang M F, Wu G. The application of ecological water requirements in the ecological impact assessment of a water conveyance project. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6012-6018.

## 生态需水在输水工程生态影响评价中的应用

全元<sup>1,2,3</sup>, 刘昕<sup>1</sup>, 王辰星<sup>1,3</sup>, 单鹏<sup>1,3</sup>, 董孟婷<sup>1,3</sup>, 唐明方<sup>1</sup>, 吴钢<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**以南水北调工程为例的输水管道工程在解决我国水资源供需矛盾和地域分配不均的问题中发挥着重要作用, 输水管道工程的建设在产生巨大社会、经济、生态效益的同时, 也给工程建设区域、调水相关区域脆弱的生态环境带来新的问题。工程建设的环境影响评价往往关心工程建设、运行时期对相关区域内主要环境要素的影响、响应及评价, 而对工程建设相关的关键生态系统的影响关注较小。而南水北调等输水管道工程是与水密切相关的国家级大型工程, 对工程建设区域、影响区域的水生生态系统产生较大的影响, 如何科学、定量地评价输水工程对关键生态系统的影响是输水工程建设管理人员关注的热点之一。基于对生态需水评价理论与方法的总结及输水工程生态影响定量评价难点的分析, 对生态需水与水生生态系统健康之间相辅相成的关系进行研究, 提出了将生态需水引入输水工程生态影响评价的技术路径与评价模型。以南水北调中线工程为例, 对其影响范围内的生态需水量进行评价, 进而判断工程建设运行对相关区域关键生态系统的影响。

**关键词:**生态需水; 生态影响评价; 南水北调中线工程

## The application of ecological water requirements in the ecological impact assessment of a water conveyance project

QUAN Yuan<sup>1,2,3</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, WANG Chenxing<sup>1,3</sup>, SHAN Peng<sup>1,3</sup>, DONG Mengting<sup>1,3</sup>, TANG Mingfang<sup>1</sup>, WU Gang<sup>1,\*</sup>

1 State Key of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The water conveyance pipeline project plays an important role in solving the supply and demand contradictions and uneven geographic distribution of water in China. Considering the water conveyance pipeline project from a socially beneficial perspective, water supply would increase after the project completion in northern China, where there is heavy water scarcity; water environmental carrying capacity in these regions would be enhanced as well. From an economically beneficial perspective, construction of the pipeline for the water conveyance project would help to increase the regional output values of industry and agriculture, as well as create more jobs for the local residents and others. From an eco-environmentally beneficial perspective, the water conveyance pipeline would provide new solutions to problems such as groundwater overdraft and water pollution in the water-recipient regions. However, even with the aforementioned social, economic, and eco-environmental benefits to relevant regions, the construction of the water conveyance project also creates new problems for the fragile ecosystem and environment such as disruption of the ecosystem balance in the water source

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201209029-3)

收稿日期: 2014-11-05; 网络出版日期: 2016-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wug@cees.ac.cn

area, damage of the phreatic aquifer along the pipeline project, and so on. Therefore, we need to invest more funds, technology, and personnel into the construction and management of the water conveyance project because of this duality. At the same time, there are many obstacles to an ecological impact assessment of water conveyance projects, one of the most important being the lack of quantitative assessment methods. The determination of assessment scope, lack of ecological monitoring and feedback activities are also significant issues to consider in ecological impact assessments. How to assess the eco-environmental impact of water conveyance projects scientifically and quantitatively is a key decision to project construction and management. Initially, when the concepts of ecological water requirements were proposed in 1998, many researchers from various limnological disciplines of study, such as rivers, lakes, and wetlands, paid close attention to these concepts and relevant methods. Researchers interpreted and analyzed the concepts of ecological water requirements from hydrology, hydraulics, and ecosystem perspectives. The assessment methods and calculation models of ecological water requirement were enriched gradually, and the typical methods, such as Tennant, R2CROSS, and IFIM, among others, were widely applied in the assessment of ecological water requirement of rivers, lakes, and wetlands. In this study, based on the assessment theory, methods of ecological water requirement, and the quantitative analysis of ecological impact assessment, further reinforcing the relationship between ecological water requirement and ecosystem health, we established a technological roadmap and an estimation model for the eco-environmental impacts of the water conveyance project, which lie within the ecological water requirements. Using the Middle Route of the South-to-North Water Division Project as a case study, we assess the ecological water requirements of the relevant influenced regions. The results show that water transfer during the first phase of the South-to-North Water Division Project would not have a serious impact on water resources and the ecosystem in the region and would not result in the obvious ecosystem degradation. Additionally, the results prove that methods of ecological water requirement assessment are helpful to ecological impacts assessment.

**Key Words:** ecological water requirement; ecological impact assessment; the Middle Route of the SNWD (South-to-North Water Division Project)

水资源短缺与地域分配不均是我国社会经济发展过程中在水资源配置方面不可忽视的双重难题,以跨区域调水工程为主的大型输水工程是解决这一难题的重要途径之一。南水北调中线工程的建设目标是解决北京、天津、山东等省份 700 万人长期饮用高氟水和苦咸水的问题,并增强受水区水资源承载能力;在社会经济方面,实现北方地区工农业产值每年增加 500 亿元和就业人口每年增加 50 万至 60 万人;并且有效缓解受水区地下水超采等区域水环境问题,为地区社会经济的可持续发展提供保障<sup>[1]</sup>。然而,由于跨区域调水工程规模巨大,涉及生态系统复杂,影响范围与程度不易确定,给输水工程的生态环境影响评价尤其是对关键生态系统的影响评价工作带来了很大挑战。通过定量、科学评价跨区域调水工程对生态系统造成的影响,不仅可以直观反映工程的可行性与综合效益,也能为大型输水工程的建设管理提供决策支持。

生态需水量理论是近年来水资源利用领域广泛关注的热点问题,生态需水量的内涵涉及生态学、水文学、环境科学等多个领域,并且与生态系统健康(尤其是水生生态系统)密不可分,是生态保护的有效评价工具之一。生态需水量的理论与方法近年来得到了迅速发展<sup>[2-5]</sup>,然而由于生态需水量概念复杂内涵广泛,至今国内外对其仍没有形成一个明确统一的定义。随着生境法、生态系统分析法等生态需水量计算方法的完善,将生态需水评价引入生态影响评价中逐渐变成现实,尤其在涉及水资源的建设项目中得到了广泛的应用。

目前输水工程所引起的生态环境问题主要有:调水区下游水资源平衡被打破,沿线施工带潜水层被破坏等。输水工程生态影响评价在整体生态环境影响评价中存在着定量评价水平低、评价结果可信度低等问题,极大地影响了环境影响评价报告书的科学性降低了评价结果的可信度<sup>[6]</sup>。

本研究针对当前输水管道工程生态影响定量评价过程中出现的评价范围、定量评价方法、评价阈值等方面存在的问题,通过对现有生态需水理论与评价方法的比较分析,提出将生态需水评价理论与方法应用于输

水管道工程生态影响评价的理论、方法与注意事项。以南水北调中线工程为研究案例,对流域内不同区域生态需水量做出了定量评价,评价结果为南水北调输水工程生态影响评价提供了数据支持,也相应地验证了评价模型的现实可用性和实际操作性。

## 1 材料与方法

### 1.1 生态需水量及其评价方法

#### 1.1.1 生态需水理论及内涵

生态需水量是基于源于对水资源管理中保证恢复和维持生态系统服务功能所需水量而提出概念。Gleick 对基本生态需水的描述是,提供一定质量和一定数量的水给自然生境,以求最少改变自然生态系统的过程,并保证物种多样性和生态完整性<sup>[7]</sup>。钱正英等认为,从广义上讲,生态需水是指维持全球生态系统水分平衡包括水热平衡,水盐平衡,水沙平衡,生物平衡所需用的水;从狭义上讲,生态环境需水是指为维护生态环境不再恶化,并逐渐改善所需要消耗的水资源总量<sup>[8]</sup>。

国内外众多学者基于不同的研究背景、研究对象和研究目标对生态需水量的概念做了多方面的解读。刘昌明等基于河流生态系统的基本内涵定义河流生态系统的生态需水量是为了维护生态系统的天然结构与功能<sup>[9]</sup>。李丽娟等认为生态环境需水量是指为维持地表水体特定的生态环境功能,天然水体必须蓄存和消耗的最小水量<sup>[10]</sup>。陈敏建从流域生态系统的角度出发,认为生态需水是在流域自然资源,特别是在水上资源开发利用的条件下,为维护以河流为核心的流域生态系统平衡,避免生态系统发生不可逆的退化所需要的临界水分条件<sup>[11]</sup>。马乐宽等基于对不同生态系统的生态需水的辨析,认为生态需水是指“维持生态系统健康所需的水”,并提出了相应的概念体系<sup>[12]</sup>。阳蓉指出生态需水量应该是特定区域内生态系统需水量的总称,包括生物体自身的需水量和生物体赖以生存的环境需水量,生态需水量实质上是维持生态系统生物群落和栖息环境动态稳定所需的用水量<sup>[13]</sup>。

本研究中认为生态需水量是衡量与水资源相关的自然、人工或复合生态系统达到其预定的生态保护目标的度量工具。生态需水量是生态系统的内在属性变量,由生态系统的健康程度决定。生态需水量内涵的关键要素包括生态系统的水资源特性、生态保护目标与生态条件。生态保护目标主要包括阻止生态系统的不再恶化与已破坏的生态系统的持续恢复。不同生态保护目标确定最小的或者适宜的生态需水量。

生态需水的概念与生态缺水、生态环境需水、生态用水、生态耗水等相互重叠,很多研究人员并未对这些概念进行区分,而是等同使用。但从生态影响评价的角度出发,生态需水是由生态系统自身本所确定的维持系统健康水平的固有水量;生态用水则是水资源开发利用过程中,实际供给生态系统的水量;而国家统计局统计年鉴中的生态用水是除生产生活用水之外的水资源消耗。

#### 1.1.2 河道内生态需水量的计算方法

生态需水的评价方法主要有水力学法、水文学法、栖息地定额法、整体分析法、生态系统综合分析法等。生态需水量概念复杂,计算方法多样。基于不同的关注热点,不同的研究人员在实际评价过程中秉承的生态需水量概念也不尽相同。如,关注水质污染的研究者侧重于维持水生生物所需的生态需水量,关注洪涝灾害的研究者侧重于水文学分析等<sup>[14]</sup>。

水力学方法主要包括湿周法、R2CROSS 法、生态水力模拟法、径流与河床形态分析法、生态水力半径法等。水力学方法通过考虑水生生态系统的健康水平确定相关的水力学参数,进而确定其生态流量。其中湿周法利用湿周作为栖息地质量的评价指标,建立临界栖息地湿周与流量的关系曲线,根据湿周流量关系图中的拐点确定河流生态流量。刘昌明等提出的生态水力半径法是通过给予水力半径生态学的意义,确定生态水力半径,然后根据生态水力半径推求过水断面的流量,并将其记为满足一定生态功能的所需要的生态流量<sup>[15]</sup>。

常见的水文学方法有蒙大拿法(Tennant 法)、流量历史曲线法、7Q10 法、Texas 法、NGPRP 法、基本流量法等,其中蒙大拿法是水文学方法中最常用的方法。水文学方法的优势在于使用简单、方便,计算结果和水资源

规划易于结合,可以在生态资料缺乏的地区使用,具有宏观的指导意义。但其不足之处在于作为核心方法为单一的经验公式,没有直接考虑生物需求和生物之间的相互影响,评价过程和结果过于粗略<sup>[16]</sup>。

栖息地定额法主要包括有效宽度法、加权有效宽度法及河道内流量增加法(IFIM, Instream Flow Incremental Methodology),河道内流量增加法的应用最为广泛。河道内流量增加法综合考虑栖息地相关的流速、最小水深、水温及水质参数等,但其存在的问题是实际评价过程中所要求输入的信息缺失过多<sup>[17]</sup>。

整体分析法以尽量维持河流水生态系统原始功能为主要原则,评价相应的完整生态系统的水需求量,包括发源地、河道、河岸地带、洪积平原、地下水、沼泽和河口等。在整体分析法的评价过程中,河流的天然状态是河流生态系统最基本的指导标准。常用的整体分析法有南非的建筑堆块法和澳大利亚的整体评价法等<sup>[18]</sup>。

生态系统分析法从生态需水理论的内涵出发,通过对生态保护目标进行分解并逐一梳理目标之间的关系,最终确定生态需水量。生态系统分析法的一般性分析框架包括河流基本生态需水、保持河流水质的生态需水、维持水生生物栖息地生态系统平衡需水、渗漏和蒸发生态需水、维持河流景观及娱乐需水等<sup>[19-21]</sup>。

基于生态需水量概念三要素(生态系统水资源特性、生态保护目标和生态条件),各类生态需水量的计算方法存在的主要问题是成熟的生态需水量评价方法往往容易忽略生态保护目标与生态条件,以生态系统为主的生态需水量计算模型又由于设计大量估算结果可信度不高。

## 1.2 输水工程生态影响评价存在的问题

输水工程生态影响评价中存在的主要问题有 3 个方面。

第一,确定生态影响评价的评价要素及范围存在困难。主要的问题包括:(1)一般的生态影响评价均包括陆生生态系统、水生生态系统、水土流失 3 个方面,并没有针对具体的工程内容和工程特性对生态要素进行逐一确定,评价重点不明显;(2)评价要素的时空范围与生态影响不匹配,因而,如何准确评价工程的影响范围、影响的时间长短需要更加精确的规定与说明。

第二,评价方法存在的问题。主要问题包括:(1)定性描述的方法居多,定量分析的方法应用较少;(2)定量评价方法存在的精度与可行性不匹配的问题,即要求评价结果精度越高,评价所缺乏的资料越多,存在的不确定性程度越高,评价工作的可行性越低;(3)现有的比较成熟的评价方法不能应用于重要且敏感的生态问题的评价。(4)技术导则中提到的方法(如列表清单法、类比分析法等)没有明确统一的评价规范,对评价结果产生较大影响从而导致误差过高。

第三,监测与反馈的缺乏。主要的问题包括:(1)一般来讲,评价中的生态监测只是“状态监测”而非“过程监测”,评价结果并不能真实反映生态环境的变化趋势与规律;(2)对评价结果缺乏相应的反馈机制,缺乏对评价结果的定量验证,评价的纠错能力不高。

## 1.3 生态需水在输水工程生态影响评价中应用的评价方法

### 1.3.1 评价技术路径

生态需水理论与评价方法在近 10 年得到了长远的发展,概念内涵明晰、边界凸显、评价方法多样,生态需水的评价具有较高的可操作性。将生态需水评价引入到生态影响评价的必要条件已经满足。随着影响评价学科的进一步成熟,对生态影响评价有效性的思考逐渐成为建设项目利益相关者、环境影响评价人员与公众所关注的焦点问题,由此也引发了生态影响评价领域的诸多挑战,生态影响评价与生态学领域的专家学者也提出了一些应对办法,如实施生态累积影响评价,加强生态监测与生态影响后评价等,但是这些方法均存在可操作性不强、定性分析成分居多的问题。对于生态影响评价定量、操作性高的评价内容与方法的需求增高,将生态需水评价引入到生态影响评价中的充分条件也得到了满足。

### 1.3.2 评价原则与评价流程

输水工程的生态需水评价应与生态影响评价同时展开,遵循重点与全面相结合、预防与恢复相结合、定量与定性相结合的、注重吸纳已有成果的原则。

具体评价流程如图 1 所示, (1) 确定评价工作等级, 以《环境影响评价技术导则生态影响》为参考, 若工程建设明显改变水文情势, 则评价等级应上调一级; (2) 确定评价范围, 一般情况下, 输水工程的生态影响评价的评价范围应包括输水区及其下游区域、输水沿线、受水区以及移民安置区; (3) 生态现状评价, 主要任务包括选择生态敏感因子与评价因子, 对数据进行预处理以及确定生态需水的评价方法; (4) 生态影响预测评价, 以完成生态需水评价结果的计算及分析为主要工作内容; (5) 生态防护与补偿措施分析, 主要任务是将防护、补偿措施纳入生态需水评价分析后, 综合得出生态需水的评价结果。

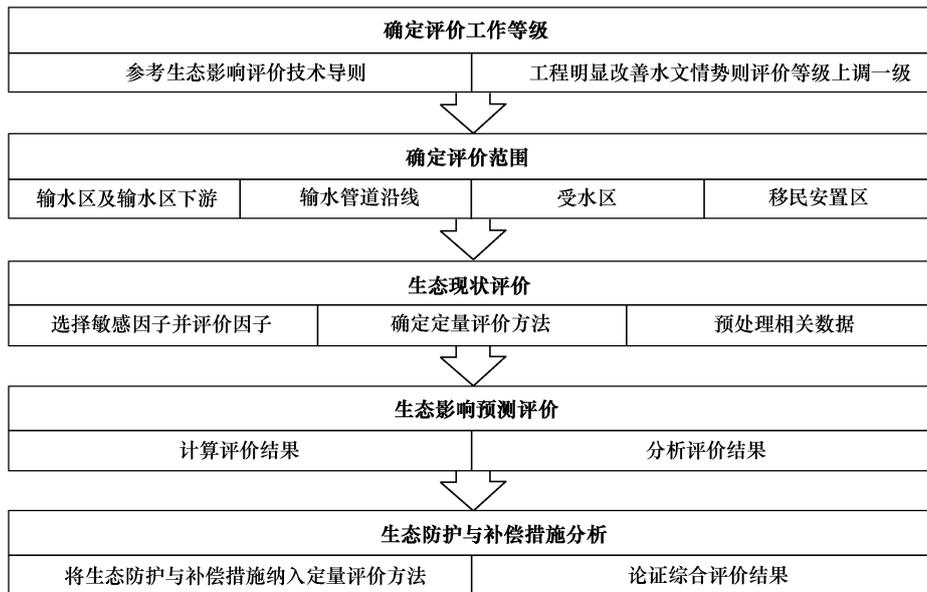


图 1 生态需水评价路线图

Fig.1 The assessment process of EcWR

### 1.3.3 评价模型

根据当前已有的众多研究成果、水利部发布的《河湖生态需水评估导则》中的结论<sup>[22]</sup>, 结合多个输水工程的生态影响评价报告书中的数据测算结果: 当生态需水量低至 10% 的平均年径流量时, 河槽宽度、水深及流速显著地减少, 水生栖息地已经退化, 河流底质或湿周有近一半暴露, 旁支河道将严重地或全部脱水, 对水生生态系统带来了严重的威胁。因此, 本研究提出蒙大拿法确定输水工程生态需水评价的评价模型。最小生态需水量标准为调水前多年平均径流量  $R_t$  的 10%, 记为  $EcWR_0$ ; 参考值选取调水后多年平均径流量  $R_h$  的 20%, 记为  $EcWR$ 。

若  $EcWR_0 < EcWR$ , 则输水工程对河道生态需水的结果可接受。

若  $EcWR_0 > EcWR$ , 则输水工程对河道生态需水的结果不可接受, 需要对工程对生态需水的影响做进一步论证。

## 2 评价案例概况及数据来源

南水北调中线工程从丹江口水库河南淅川陶岔渠引水, 沿线建设明渠、暗渠等管道工程, 输水干线全长 1431.9km。工程规划分两期实施, 一期年均调水规模为 95 亿  $m^3$ , 主要解决京、津、冀、豫四省(市)的水资源短缺问题。

南水北调中线工程对汉江中下游的不利影响表现在水资源、水质、地下水等多方面, 如汉江下游枯水流量增大、河势河床变化导致沿江农田崩失、工农业和生活缺水量增加、水污染加剧、水生生物种群数量减少、渔业捕捞量降低、航运和电力受损等。

根据蒙大拿法,评价案例主要数据来源为收集了汉江流域中下游各段多年平均径流量,如图 2 所示。

### 3 结果与分析

本研究以南水北调中线工程对汉江中下游的影响为重点案例,通过蒙大拿法的生态需水的评价模型,证明调水工程对其生态需水的影响。基于评价模型的计算结果如表 1 所示,汉江中下游各段生态需水评价结果均可接受,从生态需水评价的角度,南水北调一期工程应当不会造成汉江中下游明显的生态系统退化。

从汉江中下游各段最小生态需水量与参考值的评价结果来看,流域内最小生态需水量随着与取水点距离呈现先增后减的趋势,但生态需水参考值不断增加,生态需水参考值与最小生态需水量的差额逐渐增加(图 3)。

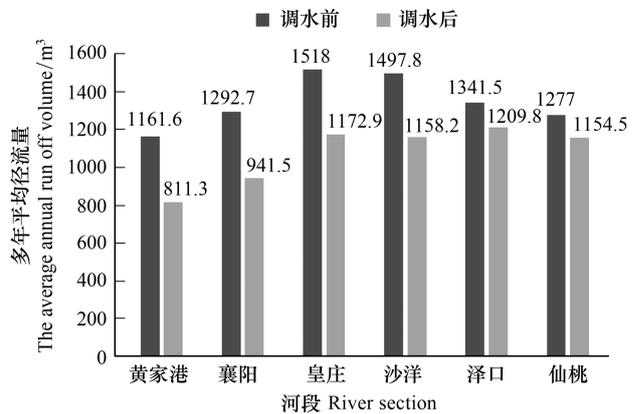


图 2 汉江中下游各段多年平均径流量

Fig.2 The average annual run off volume of midstream and downstream of the Han River

表 1 生态需水评价结果

Table 1 The assessment results of EcWR

河段 River section	调水前 $R_f/m^3$	调水后 $R_h/m^3$	最小生态需水量 $EcWR_0/m^3$	参考值 $EcWR/m^3$	参考值与最小生态需水量之差 $EcWR-EcWR_0/m^3$	结论 Result
黄家港	1161.6	811.3	116.2	162.3	46.1	<接受
襄阳	1292.7	941.5	129.3	188.3	59.0	<接受
皇庄	1518.0	1172.9	151.8	234.6	82.8	<接受
沙洋	1497.8	1158.2	149.8	231.6	81.8	<接受
泽口	1341.5	1209.8	134.2	242.0	107.8	<接受
仙桃	1277.0	1154.5	127.7	230.9	103.2	<接受

### 4 讨论与结论

输水工程通常涉及跨流域调水、穿越复杂多样的生态系统等客观问题,不可避免会对调水区及其下游、调水沿线、受水区的生态环境造成不同程度的影响。目前,虽然《环境影响评价技术导则生态影响》中提出了列表清单法、综合指数法、类比工程法等评价方法,但这些方法在实际应用中,仍然存在诸多限制,如类比工程法的使用中如何选择类比工程、综合指数法如何构建综合指标体系等,因而在项目建设的生态影响评价中鲜有使用上述评价方法。本研究从输水工程的工程特点及其生态影响评价中存在的现实问题出发,结合生态需水评价理论和方法,提出了将生态需水评价引入输水工程生态影响评价的技术路径与评价模型。

研究结果表明,从生态需水评价的角度,南水北调中线一期工程不会影响汉江中下游各段生态需水的评价结果,映证了南水北调中线一期工程生态影响的评价结果。同时也进一步说明,本研究提出的将生态需水评价应用于输水工程的生态影响评价的技术路径与评价模型能够有效评价输水建设工程对生态系统健康水平的影响,为输水工程生态影响定量评价提供了新的思路与方法。

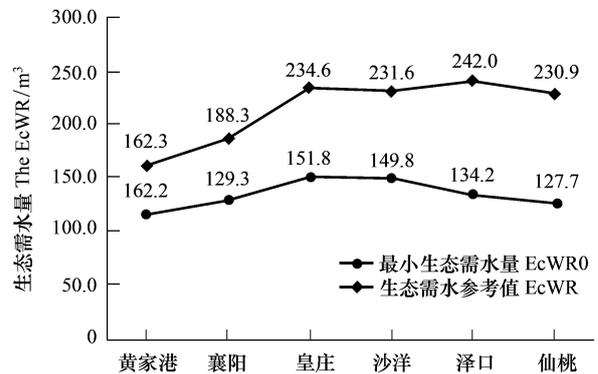


图 3 南水北调中线工程下游汉江流域各段生态需水量

Fig.3 The EcWR of midstream and downstream of the Han river

输水工程生态需水评价是定量评价方法,摆脱了人为因素对生态影响评价结果和预测的限制。由于输水工程生态需水评价是基于多年水文、生态信息做出的过程评价,其结果相对其他根据特定时间节点状态所做的状态评价可信程度更高。然而本研究只提出了水文学方法的输水工程生态需水评价模型,未来的研究可以尝试提出其他生态需水计算方法的评价模型,并且搜集更多的输水工程案例,进行生态需水评价,验证改进和优化现有模型,以期实现更客观更准确的生态需水评价。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 中国南水北调. 南水北调工程的预期效益. [ 2003-12-28 ]. [http://www.nsb.gov.cn/zx/gczs/200308/t20030826\\_188119.html](http://www.nsb.gov.cn/zx/gczs/200308/t20030826_188119.html).
- [ 2 ] Han M, Yang X Y, Liu Y, Du H. The research progress of ecological water requirement in China and abroad. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1904-1911.
- [ 3 ] 汤洁, 余孝云, 林年丰, 麻素挺. 生态环境需水的理论和方法研究进展. *地理科学*, 2005, 25(3): 367-373.
- [ 4 ] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 冯浩. 生态环境需水研究进展. *水科学进展*, 2005, 16(4): 144-149.
- [ 5 ] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨. *水科学进展*, 2004, 15(5): 626-633.
- [ 6 ] 汪林, 甘泓, 赵世新, 王芳, 游进军, 王琳. 南水北调东、中线一期工程对受水区生态环境影响分析. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 4-7.
- [ 7 ] Gleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
- [ 8 ] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [ 9 ] 刘昌明. 关于生态需水量的概念和重要性. *科学对社会的影响*, 2002, 1(2): 25-29.
- [ 10 ] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. *地理学报*, 2000, 55(4): 495-500.
- [ 11 ] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 陈清勇. 适宜生态流量计算方法研究. *水科学进展*, 2007, 18(5): 745-750.
- [ 12 ] 马乐宽, 李天宏. 关于生态环境需水概念与定义的探讨. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(5): 168-173.
- [ 13 ] 阳蓉. 北江中下游河道生态需水分析. *广东水利电力职业技术学院学报*, 2011, 9(3): 16-19.
- [ 14 ] 李荣昉, 丁永生, 程丽俊, 李昌彦. 基于水量分配方案的抚河流域最小控制需水量研究. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(1): 58-63.
- [ 15 ] 门宝辉, 刘昌明. 河道内生态需水量计算生态水力半径模型及其应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [ 16 ] 张代青, 高军省. 河道内生态环境需水量计算方法的研究现状及其改进探讨. *水资源与水工程学报*, 2006, 17(4): 68-73.
- [ 17 ] 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. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1828-1837.
- [ 18 ] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 河流生态需水计算方法评述. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 5-9.
- [ 19 ] 中华人民共和国水利部. 河湖生态需水评估导则. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [ 20 ] Cui B S, Tang N, Zhao X S, Bai J G. A management-oriented valuation method to determine ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta of China. *Journal for Nature Conservation*, 2009, 17(3): 129-141.
- [ 21 ] 余炯, 孙毛明, 曹颖, 林炳尧, 严齐斌. 基于生态功能的河流等级划分及应用——以浙江省河流为例. *地理研究*, 2009, 28(4): 1115-1127.
- [ 22 ] 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. *环境科学学报*, 2010, 30(7): 1466-1471.