

生态标准河流和调度管理研究

陈敏建, 丰华丽, 王立群, 王高旭, 黄昌硕

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 河流生态用水安全是维持河流系统健康的基本条件。本文首先从河流生态系统特性入手, 提出生态水文季节, 构建了多参数生态需水(最小生态需水、适宜生态需水、洪水期生态需水)体系并分析其内涵, 组成了能反映河流生态系统健康的流量等级。生态需水按生态水文季节形成具有时间特征的生态标准河流。在此基础上, 提出生态用水预警制度和危机管理机制, 探讨保障生态用水安全的调度和管理模式。以黄河流域中下游为例, 开展实践应用研究, 为黄河中下游的生态用水安全调度和管理提供科学依据。

关键词: 生态水文季节; 生态需水; 生态标准河流; 调度管理

中图分类号: P343.1; TV212.52; XI71.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)05-0631-06

流域水资源规划管理的本质是在流域水土资源综合管理的统一理念下, 协调资源合理利用、生态安全、环境保护关系。在水资源开发利用中高度重视经济发展与生态环境的用水协调, 建立人与自然和谐的关系, 是我国面临的亟待解决的问题。

生态需水即是为了维护以河流为核心的流域生态系统的动态平衡, 避免生态系统发生不可逆的退化所需要的临界水分条件。在中国多使用生态需水一词, 国外与生态需水相近的概念有河道最小流量、生态可接受流量等。对于河流来说, 生态需水和生态流量同义。国外生态需水研究可追溯到 20 世纪 40 年代, 从满足航运流量到保护水生生物流量, 逐步发展到维持河流生态系统完整性的流量管理, 相继研发了生态需水计算的历史流量法、水力学法、生境法等^[1]。

与国外比较, 我国生态需水问题的严重程度、涉及的深度和要求有所不同, 国外的研究方式不能直接移用于中国。国外现有的经验与成果主要关注生态系统维持正常状态的临界条件下的生态需水, 以避免危机状态出现。中国生态用水问题突出的流域, 河流经常出现断流、干涸等水生态系统破坏的情形。因此需要更深入研究生态退化过程及其相应的生态需水定义、需要研究生态危机管理的问题^[2~4]。本文从我国河流生态系统的实际情况出发, 根据河流生态水文特性, 以河流生存、水生生物的生存繁衍、河流造床输沙分级管理为目标, 提出河流多参数生态需水(最小生态流量、适宜生态流量)、洪水期生态流量, 依据不同生态流量的时间特征形成生态标准河流, 建立河流生态用水预警机制, 探讨生态危机管理问题。

1 河流生态水文特征

1.1 河流生态系统

地表水体生态系统结构复杂, 无论是河流, 还是湖泊湿地, 生态系统的结构和功能由水文、生物、地形、水质和连通性五部分组成。各个部分相互发生着作用, 其中, 水文是主动的、起决定性作用。在河道中流动的水和岩土发生作用, 形成了各种各样的河床地貌。水流与河床构成水生生物赖以生存的空间, 是生物生存的

收稿日期: 2006-01-05; 修订日期: 2006-04-29

基金项目: 国家十五科技攻关项目 (2004BA610A - 01)

作者简介: 陈敏建(1957 -), 男, 江西九江人, 南京水利科学研究院教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源规划与管理、生态水文等研究。E-mail: mjchen@nhri.cn

基本的条件。

从源头到河口, 河流生态系统包括河岸带、河道和河岸相关的地下水、洪泛区、湿地、河口以及依靠淡水输入的近海环境等。河流生态系统具有完整性、协调性和自组织性的特点, 有其相对的稳定性、绝对的波动性、变异性和对环境的有限适应性和自我调节能力。

1.2 生态水文季节

河流水情在一年中的变化基本分为两类: 汛期和非汛期。汛期河道水系集中了 60%~80% 或更多的年径流量, 但时间很短促, 常常是三个月左右或者更短。非汛期持续时间长、径流量小。中国北方地区大部分河流一般 8 个月的非汛期径流量占年径流量的 15%~35% 甚至更少。

生态系统随河流水情变化, 表现出显著的季节性特点。河流春夏间的涨水时段是水生生物的繁殖期, 生长期一般是河流丰水期, 并且对下游湿地、河岸生态进行补水, 而对水量要求最低的冬季休眠期是河流较枯的季节。对于一个流域, 完整的河流生态系统由汛前期、汛期、汛后枯水期构成, 可称之为生态水文季节。

2 生态需水概念及内涵

生态需水属于多参数问题。河流生态需水至少应该涵盖两个方面的内容, 一是反映河川径流衰减过程中生态系统出现危机状态的临界条件, 二是应该反映河流生态水文季节特征。

2.1 生态需水之内涵

(1) 最小生态需水 以目标水体(河流、湖泊)处于生存危机临界状态的水分条件定义为维持地表水体生存的最小生态需水。在低于最小生态需水情况下, 目标水体处在消亡的威胁之中, 当流量持续小于这个数值时, 河流将迅速消退直至干涸。

(2) 适宜生态需水 水生态系统的生物完整性随水量减少而发生演变, 以生态系统衰退临界状态的水分条件定义为维持水体生物完整性的适宜需水。适宜生态流量考虑目标水体水生生物生存繁衍对水域水文、水力特性的要求, 当流量持续小于这个数值时, 将导致生物繁殖条件的破坏, 减少生物量, 进而降低生物完整性。

(3) 洪水期生态需水 维持河流系统(包括湿地、湖泊)的整体动态平衡, 河流需要的周期性的大流量水分条件。洪水通过影响河流造床输沙、水文连通性、河流生境等多个方面, 影响河流生态系统的健康。洪水是河流生态系统的固有特征, 如果洪水长期受到遏制, 河床淤积抬高, 河流、湿地、洪泛区之间将成为孤立的、脆弱的生态斑块, 生态系统将发生退化。

河川径流量持续减少, 将导致水文连接度与水生态系统的变化。当河流水文连接度完全破坏, 河流长期断流后, 即使通过补水等措施使水文连接度恢复, 水生态系统也不会恢复到原来的水平, 需要经过相当长时间的生长发育后, 形成新的水生态系统, 但是这个新的水生态系统是非常脆弱的。因此, 从生态保护角度, 要避免出现水文连接度消失、物种灭绝、生态系统消亡的事态。本文定义的最小生态需水和适宜生态需水, 反映了出现上述问题的临界条件, 对保护水生态系统至关重要, 是河流水资源管理的重要标准和依据。

2.2 生态需水定量分析

生态流量计算方法内容丰富, 详细分析另撰专文阐述, 此处给出结论性成果。

“平均河流”的定义: 以多年平均流量对应的河流规模, 假定此时河流生态系统对应的生物量也是多年平均值, 作为“平均河流”。因此, 流量在小于多年平均的情景下, 河流规模也小于平均河流。汛前期、汛后季节的生态需水, 显然小于多年平均流量, 因此对应于生态需水的河流规模, 包括流量流速、河床水力参数、生物量, 应该小于平均河流。洪水期生态需水对应的河流规模应该大于平均河流。

平均河流计算模型, 建立无量纲的相对流量(低水流量占多年平均流量比重)和河流相对规模(低水流量时的河流规模占平均河流规模比重)的变化关系, 分析最小生态需水。最小生态需水是以最少的水量保持河流尽可能大的规模。这是一种临界状态: 当流量大于最小生态流量时, 河流规模没有显著变化, 当流量小于最小生态流量时, 河流规模迅速衰减几近消失。平均河流计算模型可以准确表达上述含义, 其最小流量同时包括对应

的河流规模。

适宜生态需水是以最经济的水量维持水生生物的繁衍条件，以保障生物完整性。以两个途径定量分析。一是建立无量纲的生物量与流量之间的对应关系，依据生态恢复学的理论，分析连续枯水年组流量与生物量的关系，确定适宜生态流量。此法算出的适宜生态流量，同时包含生物量。二是将水生生物生境指标与水流条件建立联系，分析水生生物生境指标对水流条件的需求，如鱼类繁衍对水流条件的关键需求，选用鱼类产卵期(汛前期)的河道水文信息，根据鱼类产卵繁殖需要的水流条件，确定适宜生态流量。

洪水期生态需水主要功能是输沙造床、保持水体连通、保障营养输送，以河流漫滩流量作为洪水期生态流量。

最小生态流量、适宜生态流量、洪水期生态流量和多年平均流量存在着一定的关系，见图 1。按生态水文季节提出的河流生态流量，能够系统、完整地刻画水文情势和生态系统的变化特征。

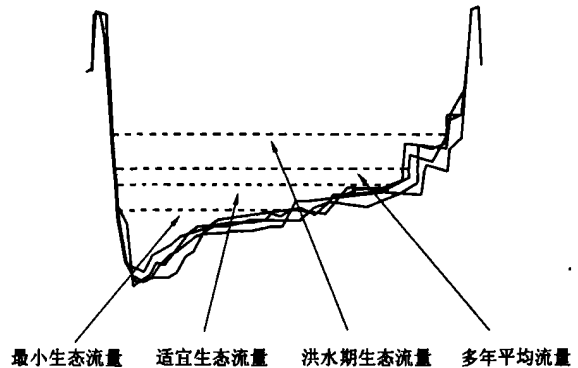


图 1 黄河利津站不同生态流量间的关系示意

Fig. 1 Relationship between different ecological flow of Lijin station in Yellow River

3 生态标准河流及预警调度

3.1 生态标准河流

自然河流生态系统始终处于动态平衡状态，在年内表现为汛期和非汛期的交替变化，在年际间表现为丰水年、平水年和枯水年的周期变化。按生态水文季节原理，本文提出的最小生态需水和适宜生态需水是针对非汛期即枯水季节的生态需求。在水资源实际分配中，并非在一年的所有时段都以非洪水期生态需水为准，而是根据河流生态系统的水文学和生物学等自然特征，以维持河流生态系统的整体健康为目标，进行生态流量的时间特征分析，见表 1。

表 1 生态需水的时间特征

Table 1 Temporal characters of ecological water requirement

生态水文季节	生态需水类型	功能分析	时 期
汛前期	适宜生态需水	鱼类产卵、繁殖	4~6 月份
汛期	洪水期生态需水	造床输沙、水体连通、生物生长	7~8 或 7~9 月份
汛后枯水期	最小生态需水	水体生存、生物蛰伏	9~3 或 10~3 月份

生态水文季节的汛前期、汛期和汛后枯水期，分别与适宜生态需水、洪水期生态需水和最小生态需水相对应。将汛期和非洪水期生态需水耦合，形成具有时间特征的年内生态需水标准过程线，形象化地称之为“生态标准河流”，可作为河流生态管理水量调度图，见图 2。

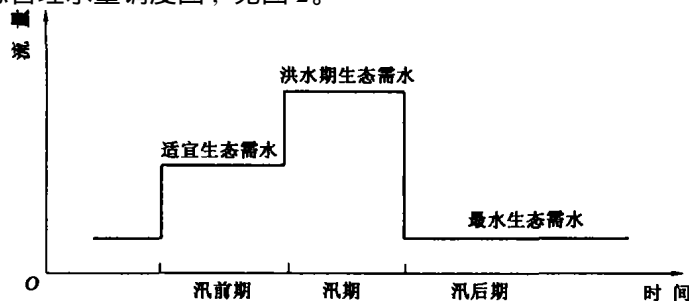


图 2 生态需水组合：“生态标准河流”

Fig. 2 Ecological water requirement combination: ecological flow regime

从生态标准河流及天然来水过程看,洪水期的生态需水量大、历时短,枯水期生态需水量小、历时长且复杂。这是一种“大”和“小”的辩证关系,从水量上看,洪水期生态需水占了全年生态需水量绝大多数,枯水期生态需水量小占据少数;但从时间上看,枯水期最小生态需水、适宜生态需水对河流生态健康具有决定性意义,要力求保证安全无恙。因此,做好河流水量调度,保证最小生态需水意义重大。

3.2 河流预警和调度管理

以生态标准河流指导河流预警和调度管理。

(1) 根据不同流域的水资源状况和经济社会发展水平设定生态用水管理目标。比如在水资源短缺严重的海河流域,最小生态需水对应的时段可适度延长,而在松花江流域,水资源短缺情势相对缓和,应严格按照生态标准河流进行调度和管理。不同水平年设定动态的生态用水管理目标。比如在枯水年可适度压缩生态用水,而平水年尽可能地满足河流生态需水。

(2) 设立河流生态水情调度预警流量。对应于最小生态流量、适宜生态流量的满足程度,进行不同等级的预警,以适宜生态流量设定为黄色预警流量,以最小生态流量设定为红色预警。在水资源短缺的情况下,以最小生态需水设立为河流生态危机预警流量(水位),是为断流或干涸警戒线,河流在此线以下存在很大断流风险。这如同洪水警戒水位,当水位高于洪水警戒线,虽不一定发生洪灾,但在管理中将采取非常规的应对措施。

(3) 建立河流生态用水危机管理机制。最小生态需水是维持河流生态系统健康的底线,任何情况下,河流都要力争维持这个河流生存的临界点。最小生态需水在枯水季节易受威胁,低于最小生态流量,河流将处于危机状态。当枯水期河流流量低于警戒线(最小生态流量)时,取水管理进入非常状态。在警戒线以下设立断流(干涸)风险防线,生态用水指标适度下调,在防线与警戒线之间保持脉动,以杜绝断流。为了解决此时经济用水(枯水期一般也是用水高峰期)与生态需水的冲突,要制定河流危机的管理制度,限制取水量。从价值观角度,红色预警线以下河川径流为河流的生命之水,其价值要远远高于常规状态的水量,应该采取“高价”限制。

4 实例研究——以黄河下游为例

黄河流域水资源供需矛盾日益突出,由于生态用水被挤占,断流、河床抬高、河槽萎缩的压力始终不减。如何平衡经济社会用水和生态系统用水,是黄河流域规划和管理中需要解决的根本性问题。黄河下游的生态状态集中反映了全流域用水状况,因此以黄河下游为对象进行分析研究。

4.1 黄河生态标准河流

(1) 采用平均河流模型,计算最小生态流量 通过对河流断面、水位流量关系等多年实测水文资料分析,点绘无量纲相对流量~河道规模关系图。相对流量~河道规模关系出现明显转折点处即为最小生态相对流量。

(2) 采用鱼类产卵繁殖的适宜流速-流量法计算河流适宜生态流量(见表2)利用汛前期水文资料,分析流量~流速关系,根据鱼类产卵繁殖需要的流速,确定适宜生态流量。根据有关研究成果,鱼类产卵要求的流速采用 $0.3 \sim 1.5 \text{ m/s}$ ^[5,6]。根据断面流速分布,取水面至相对水深为0.6处的流速大于 0.3 m/s 的情景,计算适宜生态流量。

(3) 利用漫滩水位~流量关系,计算洪水期生态流量 黄河是多沙的河流,输沙用水对于维持水沙平衡至关重要,洪水期生态流量主要服务于输沙功能。建立漫滩水位-流量关系,参考黄河水利科学研究院《黄河输沙水量研究》研究成果,花园口和利津站的洪水期生态流量分别为 $3320 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(4) 分析最小生态流量、适宜生态流量和洪水期生态流量的时间特征,建立黄河下游生态标准河流 黄河汛后枯水期一般为11~3月,因此以枯水季节11~3月作为最小生态流量对应的时段。

表2 黄河最小生态流量和适宜生态流量计算成果

Table 2 Results of the minimum ecological flow and appropriate ecological flow of the Yellow River

河段	断面	平均流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小生态流量			适宜生态流量		
			流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对流量 / %	取值范围 / %	流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对流量 / %	取值范围 / %
黄河 中游	河口镇	1070	123	11.5	10 ~ 12	244	22.8	22 ~ 23
	龙门	1230	128	10.4		276	22.4	
黄河 下游	花园口	1790	172	9.6	9 ~ 10	327	18.3	18 ~ 20
	高村	1780	174	9.8		357	20.1	
	利津	1840	166	9.0		371	20.2	
黄河 支流	华县	264	27.7	10.5	11 ~ 15	75.2	28.5	21 ~ 29
	河津	64.6	7.82	12.1		15.0	23.2	
	黑石关	100	11.0	11.0		21.1	21.1	
	武陟	36.3	5.52	15.2		8.57	23.6	

黄河的特有鱼种或土著鱼种为铜鱼和鲚鱼,最具经济价值的物种则是鲤鱼。它们一般活动在黄河中下游,生殖期为4~6月,5月上、中旬为最盛期。为了维持鱼类产卵繁殖条件,综合确定4~6月份为适宜生态流量对应的时段。

黄河汛期为7~10月份,输沙需水主要发生在这一时段。考虑输沙用水效率,以主汛期7~8月作为洪水期生态流量对应的时段。见表3,其中,相对流量为各生态流量与该断面多年平均流量的比值。

根据生态标准河流计算,黄河下游年生态需水总量占多年平均径流量的35%~42%。

4.2 黄河下游河流调度和管理

利津站是黄河口控制站,选取利津站讨论河流生态用水预警和调度管理策略。

汛前期,当利津站实测流量小于适宜生态流量(350~371 m^3/s 之间)时,要在流域内发布黄色预警,限制取水,尽量遏制流量的继续减少。在枯水年份,汛前期难以确保适宜生态流量,可部分甚至全部放弃适宜生态流量,退守到最小生态流量。

汛后枯水期,以最小生态流量(150~166 m^3/s 之间)设定为红色预警警戒线,此时河流规模为平均河流的60%~65%之间。当利津站实测流量小于最小生态流量,即启动生态危机管理机制,取水管理进入非常状态。为了应对经济用水与生态用水冲突,在警戒线以下设立若干风险防线,作为生态用水的危机管理最低目标。目前,利津站实际控制的最小流量分别为50 m^3/s 、100 m^3/s ,可认为是断流风险防线。根据研究和观测,此时河流规模相当于平均河流的20%~30%,显见河流生态系统安全程度已经降至最低。如果流量长时间处于该值,河流生态系统可能会发生不可逆转的退化。因此,在最小生态流量无法完全保证的情况下,应设法使生态用水在风险防线与警戒线之间保持脉动,避免断流发生。

5 结 论

(1) 河流生态用水安全是维持河流健康的基本条件。生态系统随河流水情变化,表现出显著的季节性特点。根据生态系统天然特性,提出生态水文季节的概念。在此基础上定义不同季节的生态需水,具有明确生态学意义,反映了河流生态系统整体特性。

(2) 由最小生态流量、适宜生态流量、洪水期生态流量组成一个完整的年内生态需水过程,视为生态标准河流,可作为河流生态用水管理“调度图”。相对于洪水期生态需水,非洪水期生态需水量微不足道,但枯水期历时长,最小生态需水、适宜生态需水对河流生态健康具有决定性意义。

(3) 根据生态标准河流,进行河流生态水情调度,建立河流生态用水危机管理机制。各季节的生态流量都

表3 黄河下游生态标准河流(相对流量) %

Table 3 Ecological flow regime of the lower reach of Yellow River (relative discharge)

区 域	汛前期 (4~6月)	汛 期 (7~8月)	汛后枯水期 (9~3月)
黄河下游	18~20	156~187	9~10

是生态系统健康必不可少的组成部分,但历时最长、最敏感、最易受危害的是非汛期,尤其是枯水期最小生态流量,是维持河流生态系统健康的底线。以最小生态流量设为危机状态警戒线,在警戒线以下设立断流风险防线。在警戒线与风险防线之间,采取非常管理措施,大幅提高水价,限制取水量。

(4) 黄河调度改进。根据研究和实地考察,黄河利津最小生态流量在 $150 \sim 166 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,此时河流规模为平均河流的 $60\% \sim 65\%$ 。如果以此为红色预警警戒线,当利津站来水小于最小生态流量,即启动生态危机管理机制。目前,利津站实际控制的最小流量分别为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,可认为是断流风险防线。根据研究和观测,此时河流规模相当于平均河流的 $20\% \sim 30\%$,处于“准断流”状态。应该采取措施,提高危机状态下的水价,以限制取水量,并且控制取水、加强水库调度,设法使生态用水在风险防线与警戒线之间保持脉动,避免断流发生。

参考文献:

- [1] Khalid K, Maureen E G, Ian C G. Review of Determination Instream Flow Requirements with Special Application to Australia[J]. *Water resources Bulletin*. 1995, 31(6):1063 - 1077.
- [2] 陈敏建,丰华丽,王立群,等. 国家十五科技攻关计划项目研究报告[R]. 中国分区域生态用水标准研究, 2005. 12.
- [3] 陈敏建. 流域生态需水研究进展[J]. *中国水利*, 2004(20):25 - 26.
- [4] 陈敏建,王浩,王芳. 内陆干旱区水分驱动生态演变机理[J]. *生态学报*, 2004(10):2108 - 2114.
- [5] 刘建康,何碧梧. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [6] 刘建康主编. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社. 1999.

Scientific regulation and management based on ecological flow regime^{*}

CHEN Min-jian, FENG Hua-li, WANG Li-qun, WANG Gao-xu, HUANG Chang-shuo

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ecological water use safety is the primary condition for maintain river health. In this paper, according to the characters of river ecosystem, the concept of ecohydrological regime is proposed, and the multi-parameter system of the ecological water requirements (minimum and appropriated ecological water demand, ecological water requirement in flood season) are established, which are regarded as flow requirement for river health. According to the ecohydrological regime the integration of ecological water requirements can be referred to ecological with temporal characters. Based on the ecological flow regime, therefore, the warning mechanism as well as the regulation and management rules of ecological water use are discussed. The results of the case study in the mid-lower reaches of the Yellow River can be scientific supports to maintain security of the ecological water used in that region.

Key words: ecohydrological regime; ecological water requirement; ecological flow regime; scientific regulation

^{*} The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 10th Five-year Plan Period (2004BA610A - 01).