

河流生态系统合理生态用水比例的确定^{*}

占车生^{1,2}, 夏 军¹, 丰华丽³, 朱一中^{1,2}, 刘苏峡¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 通过构建生态需水和生态用水比例模型, 遵循生态需水比例和生态用水比例的相关关系, 以生态需水比例为标准, 确定生态用水比例, 然后综合考虑社会经济用水的实际情况, 确定适合当地水资源配置和社会经济发展水平的合理生态用水比例。以海河河流生态系统为例, 视其河道内生态系统恢复到 20 世纪 70 年代初的水平为生态修复目标, 计算河流系统生态需水, 得到其生态需水的阈值区间为 $[16\% \sim 66\%]$ 。然后计算了 1999—2002 年海河实际生态用水比例, 表明生态用水一直没有得到满足。最后通过与海河社会经济发展的协调, 确定海河河流生态系统的合理生态用水比例应维持在 $(16\% \sim 46\%)$ 的阈值区间内。

关键词: 生态用水; 生态需水; 河流; 生态系统; 海河

中图分类号: P963 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 02-0121-04

随着社会经济的发展, 水资源开发利用范围及其强度的不断地扩大和加深已经影响到了生态系统的安全。特别是在干旱半干旱地区, 人类活动对生态系统需水的挤占已成为生态环境退化的一个主要原因之一。从生态环境保护以及水资源可持续利用的角度出发, 生态需水的研究已成为国内外地球科学领域普遍关注的一个热点问题^[1,2]。为了保证水资源的可持续利用, 首先应满足河流、湖泊和湿地生态系统对水量的需求^[3,4]。Glick^[5]提出了基本生态需水量的概念, 即提供一定质量和数量的水给自然生境, 以求最大程度地保护物种多样性和生态系统的完整性。截止目前, 对生态需水的研究大多集中在河流生态系统, 大部分使用最小或最佳流量的术语。随着对生态系统整体性功能的认识, Petts^[6]提出了在确定河流最小流量或最适宜流量时, 应以河流生态系统的完整性为目标。目前, 生态需水的研究主要着眼于生态系统本身的特点, 较少考虑生态用水分配问题。事实上, 社会—经济—自然系统是一个复杂的巨系统, 它们之间互相影响, 相互制约。在水资源的管理中, 应考虑生态用水的分配。因此, 如何结合当地水资源的特点以及社会经济用水的实际情况, 合理地确定生态用水比例, 是有待深入研究的课题。

1 河流生态系统合理生态用水比例的确定方法

不同的生态保护目标, 对应着不同的生态用水比例。因此, 在确定生态用水比例之前, 首先要确定生态系统保护的目标, 其次是计算这一保护目标下的生态需水阈值及其比例, 最后是在生态需水比例的基础上, 兼顾社会经济发展的用水需求, 合理地确定生态用水比例, 以实现社会经济发展和生态环境保护的双赢。

1.1 河流生态系统需水比例的确定

这里所说的河流生态系统是指包括河流、及其与河流有水力连通的湿地和湖泊系统。一般地, 河流生态系统需水可以理解为在特定的生态保护目标下, 维持特定时空范围内的河流生态系统水分平衡所需要的总水量。而其需水比例是指在特定的生态目标下, 河流生态系统需水量与其多年平均径流量的比值。对于某一确定的河流生态系统而言, 生态需水量不是在某一个特定的点上, 而是在一定的阈值区间内变化。若以其基本健康的水平来衡量, 在临界和良好状态之间波动, 对应着特定的需水阈值区间 $[W_{\min}, W_{\text{opt}}, W_{\max}]$, 如图 1 所示。

这里, 我们把用以维持生态系统物质、能量输

* 收稿日期: 2004—07—19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279049); 国际科技合作重点资助项目 (2001DFDF0004); 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX2-SW-317/KZCX1-09-02)

作者简介: 占车生 (1975 年生), 男, 博士研究生; E-mail: zhancs@igsrr.ac.cn

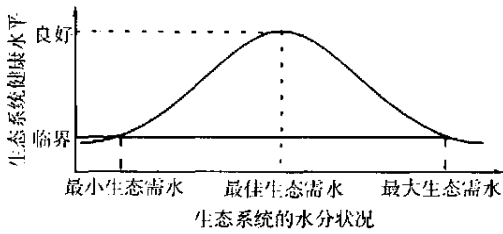


图 1 生态需水变化的阈值区间示意图

Fig. 1 Sketch map of threshold value change of the ecological water requirement

入输出平衡的最小水分状况称为最小生态需水量 ($W_{\min}$)，它是生态系统维持现状结构和功能的最小水量，若生态系统水量低于最小生态需水量，原有生态系统结构丧失，生态系统服务功能退化；随着水量条件进一步得到满足达到最佳生态需水量 (W_{opti}) 时，生态系统的生产潜力将得以最大限度的发挥；当水分条件超过生态需水的上界 ($W_{\max}$) 时，过多的水分条件可能反过来抑制生态系统的健康发展。目前，中国的水资源处在紧缺状态，大部分生态系统的用水得不到满足，在干旱半干旱地区基本不存在生态系统水资源过剩的情况，所以这里不考虑最大生态需水问题。从而定义生态需水比例为：

$$\left[\frac{W_{\min}}{W_m}, \frac{W_{\text{opti}}}{W_m} \right] = [P_{\min}, P_{\text{opti}}] \tag{1}$$

式中， $W_{\min}$ 、 W_{opti} 分别为河流生态系统的最佳和最小生态需水量； W_m 为河流多年平均径流量； $P_{\min}$ 、 P_{opti} 为最小和最佳生态需水比例。对于某一个特定的生态保护目标，存在着最小和最佳生态需水所构成的阈值区间。

1.2 河流生态系统用水比例的合理确定

河流生态系统用水是从水资源配置的角度提出的概念，其意义等同于水资源配置中通常考虑的生活和生产用水。本文认为河流生态用水是指为实现特定生态保护目标，人为补充到河流生态系统中或者预留给河流生态系统的水量。其用水比例则指生态用水量与当年河流径流量的比值。河流生态用水受水资源配置的影响，它的大小往往取决于人类社会对生态环境保护的认知和重视程度。

河流生态系统用水与生活和生产用水共享一个水源，即河川径流。鉴于河流生态系统用水与社会经济供水（地表供水）的消长关系，可以建立河流生态系统用水量和社会经济供水量（取自河流）之间的关系。河流生态系统的水量平衡关系可以表示为：

$$W = W_l + W_i + W_a + W_e \tag{2}$$

其中， W 为天然河川径流量， W_l 为生活供水量， W_i 为工业供水量， W_a 为农业供水量， W_e 为生态用水量。农业供水量 (W_a) 仅指取自河川径流部分，不包括来自地下水资源量；生态用水量 (W_e) 是指扣除社会经济取水，在河流生态系统中可利用的水资源量，即为河流的实际生态用水量。那么相应的实际生态用水比例为：

$$P_u = \frac{W - W_l - W_i - W_a}{W} \tag{3}$$

式中， P_u 为河流生态用水比例。

为了合理地确定河流生态用水比例，主要遵循两个原则。首先，要以生态需水为基础，通过实际生态用水比例与生态需水比例评判标准的对比，获悉实际生态用水是否能够满足河流生态系统的需求。为了保护某一个特定的生态目标，合理的生态用水比例应处在生态需水比例的阈值区间内，即 $P_{\min} < P_u < P_{\text{opti}}$ 。其次，应遵循“三生”用水（生活、生产和生态用水）共享的原则，生态需水只有与社会经济发展需水相协调，才能得到有效保障；生态系统对水的需求有一定的弹性，所以，在生态系统需水阈值区间内，结合区域社会经济发展的实际情况，兼顾生态需水和社会经济需水，合理地确定生态用水比例。

2 实例分析

2.1 海河河流生态系统需水比例的确定

2.1.1 设定生态需水目标 海河流域东临渤海，南界黄河，西靠云中、太岳山，北依蒙古高原，总面积 31.8 万 km^2 ；其主要特点是水资源总量少、降水时空分布不均、经常出现连续枯水年，总体上属于资源型缺水地区。研究表明，20 世纪 60 年代是海河生态环境从良好转为恶化的转折点。因此，确定海河生态环境修复的最终目标为 20 世纪 60 年代末、70 年代初的生态环境状况。这里以 70 年代末的生态环境恶化的临界状态为最小生态需水对应的修复目标，70 年代中期较好的生态状态作为最佳生态需水对应的修复目标，分别计算最小生态需水和最佳生态需水，构成生态需水阈值区间。

2.1.2 海河生态需水比例的确定 首先，针对海河河流系统生态环境退化的实际情况，以及河流与湿地湖泊的水文互动关系，确定海河生态需水的阈值区间，其研究包括：①河流基本生态需水，即保持河流具有一定的流态、流量，水生生物需水基本能够得到满足；②流域内自然湿地洼淀的生态需水；③维持河口生态平衡的入海需水量。河流基本

生态需水、自然湿地洼淀需水和入海水量三部分不是简单地加和关系，具有重叠的部分，因此需要根据河流生态系统需水关系的互补性、关联性，确定整个河流生态系统需水量，进而确定其生态需水比例。

(1) 河流基本生态需水量

依据蒙大纳法，本文以多年平均流量的 10% 作为最小的生态需水量，同时考虑海河实际水资源状况和社会经济发展水平，以多年平均径流量的 40% 作为最佳生态需水量。海河的多年平均径流量为 220 亿 m³ (1956—1990 年系列)，计算得到海河的河流最小生态需水量为 22 亿 m³，最佳生态需水量为 88 亿 m³，阈值区间为 22 亿~88 亿 m³。

(2) 湿地生态需水量

根据海河的水资源规划，确定海河流域湿地最小生态需水对应的生态目标是：重点做好白洋淀的保护，改善团泊洼、大浪淀、千顷洼等 3 个湿地的生态环境，满足其生态需水的要求。最佳的湿地生态需水量对应的生态目标是使湿地基本恢复到 20 世纪 70 年代初的水平。湿地总的生态环境需水量为湿地生态垫水量加上湿地蒸发量和渗漏损失水量。经计算得到，湿地的最小生态需水量为 9.66 亿 m³，最佳生态需水量为 29.56 亿 m³，阈值区间为 9.66 亿~29.56 亿 m³。

(3) 维持河口生态平衡的入海水量

从历史上看，70 年代初海河河口生态并未出现大的生态问题。以 70 年代枯水期的入海最小生态水量作为入海生态水量的下限，70 年代的平均入海水量作为入海水量的上限。根据历史资料，入海生态需水量的上下限分别为 116 亿 m³ 和 25 亿 m³。即维持河口生态平衡的入海水量的阈值区间为 25 亿~116 亿 m³。

由于河流基本生态需水量、湖炒湿地生态需水量和入海水量之间不是简单地累加关系。一般地，在入海水量保证的情况下，河流基本生态需水量也能够得到满足。计算表明，海河的河流基本生态需水量包含在入海水量的阈值区间内，选择二者中的最大者（入海水量）作为维持河流平衡的需水量。在此基础上，加上湖泊湿地的生态需水量 9.66 亿，29.56 亿 m³，得到整个河流生态系统总的生态需水量为 34.7 亿，145.6 亿 m³，占多年平均水资源总量（220 亿 m³）的 16%~66%，即生态需水比例的阈值区间为 16%~66%。

2.2 海河生态用水比例分析

根据 1.2 节，计算了海河河流 1998—2002 年的生态用水量（见表 1）。1998 年为平水年，地表水

资源量（河川径流）比较丰富，生态用水比例为 42%，基本能够满足河流生态系统的水分需求。1999—2002 年为枯水年，地表水资源量明显减少，但地表水供水量却没有减少，基本维持在 100 亿 m³ 左右，开发利用率分别为 1.17% 和 1.27%，生态需水不能得到满足，河流生态系统遭受到严重破坏。2000 年和 2001 年虽然也是枯水年，但由于地表供水量相对较少，所以生态用水占有一定的比例，分别为 16% 和 6%，其中 2000 年的生态用水比例处于生态需水比例的临界处，最小生态需水基本能够得到满足。但 2001 年的生态用水比例仅为 6%，连最小生态需水比例也难以满足。从 1999—2002 年，河流生态用水量很少，连续 4 年生态需水都不能得到保证，这是导致海河河流生态系统服务功能降低或河流生态系统恶化的主要原因之一。

表 1 海河生态用水比例

Tab 1 The proportions of ecological water used of Haihe River				
年份	地表供水量 (亿 m ³)	地表水资源量 (亿 m ³)	生态用水量 (亿 m ³)	生态用水比例
1998	109.75	189.7	79.95	0.42
1999	107.91	92	—	—
2000	105.02	125.18	20.16	0.16
2001	84.11	89.7	5.59	0.06
2002	81.55	64.08	—	—

2.3 合理生态用水比例的确定

目前，海河流域处在经济高速增长的阶段。按 2030 年海河规划目标计算，2030 年的生活、生产用水将达到 521.06 亿 m³，其中地表水供水量为 118.0 亿 m³（按多年平均地表水可供水量计算），占多年地表水资源总量（220 亿 m³）的 54%，则生态用水比例为 46%。单纯从河流生态系统的角度考虑，生态用水比例应该和生态需水比例重合，阈值区间为 [16%~66%]，但从社会经济发展的角度考虑，生态需水的比例很难得到完全满足。确定合理的生态用水比例，一方面允许生态用水比例在生态需水比例的阈值区间内波动，但其最小值不应低于生态需水比例的最小值，所以海河生态用水比例的最小值为 16%；另一方面，又要与快速发展的社会经济相协调，以实现社会—经济—生态复合系统的共同发展。根据海河流域 2030 年的社会经济发展目标，合理生态用水比例最大值不应超过 46%。因此，在河流生态系统需水计算的基础上，综合分析海河水资源的情况，结合当地社会经济的发展水平，确定海河河流生态系统的合理生态用水比例阈值区间为 [16%~46%]。

3 结 论

本文基于生态需水、生态用水及其比例的概念，构建了生态需水和生态用水比例模型。以生态需水比例为参考标准，确定生态用水比例，然后综合考虑当地水资源情况和社会经济发展水平，确定合理的生态用水比例。以海河河流生态系统为例，得到海河的合理生态用水比例为 16%~46%。

生态用水比例是一个很好的工具，它可以衡量一个流域或区域地表水资源的开发利用程度，可作为水资源可持续管理的一个指标。当务之急是建立生态需水比例评判标准：即在不同的生态系统保护目标下，建立生态系统需水比例指标与生物多样性、生境多样性和生态系统健康状况的关系。在此指标体系的指导下，确定生态用水比例，从而为水资源的可持续发展和生态系统乃至人类社会的可持

续发展提供技术支持。

参考文献:

[1] 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.
[2] 夏军, 孙雪涛, 丰华丽. 西部地区生态需水问题研究面临的挑战[J]. 中国水利, 2003, 5(A 刊): 57—60.
[3] RASKIN P D, HANSEN E, MARGOLIS R M. Water and Sustainability: Global Patterns and Long-range Problems[A]. Natural Researchs Forum[C], 1996, 20(1): 1—15.
[4] WHIPPLE W, DuBOIS J D, GRIGG N, et al. A proposed approach to coordination of water resource development and environmental regulations[J]. J American Water Resources Association, 1999, 35(4): 713—716.
[5] GLEICK P H. Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571—579.
[6] PETTS G E. Water allocation to protect river ecosystems[J]. Regulated Rivers: Res Manage, 1996(12): 353—365.

Determination of the Reasonable Proportion of Ecological Water Used of River Ecological System

ZHAN Che sheng^{1, 2}, XIA Jun¹, FENG Hua li³, ZHU Yi zhong¹, LIU Su xia¹

(1. Key Lab of Water Cycle and Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Models of the proportion of ecological water requirement (EWR) and ecological water used (EWU) were put forward. Using the models, the EWU proportion based on EWR, and reasonable proportion of EWU suitable for the local situation of water resources and social economic development were calculated with overall consideration of actual social economical water use. Then, EWR of river ecological system was calculated with an objective renewing the ecological system of the Haihe river to the level in the 1970s. The thresholds of the EWR were 16%~66%. The proportion of actual EWR of the Haihe River during 1999—2002 revealed that the EWU has not been satisfied. Considering the coordination with the social economic development of the Haihe area, the reasonable proportion of Haihe EWU should be maintained within threshold value of 16%~46%.

Key words: ecological water used; ecological water requirement; river; ecological system; Haihe river