

基于二元水循环的河流生态需水 水量与水质综合评价方法 ——以辽河流域为例

王西琴¹, 刘昌明^{2,3}, 张 远⁴

- (1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;
4. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境创新基地, 北京 100012)

摘要: 通过考虑水的自然循环与水在人类活动影响下的循环(二元水循环), 后者包括水资源开发利用率、耗水率、污水排放浓度影响, 探讨了二元水循环下河流生态需水“质”与“量”的综合评价, 以区别以往仅从自然水循环(一元)出发评价河流生态需水的缺陷。建立了二元水循环下的河流生态需水的水量与水质计算方法, 并确定了河流生态需水的“质”与“量”的评价标准, 实现了河流生态需水水量与水质的综合评价。以辽河流域为例进行实证分析, 计算了一元水循环下西辽河、东辽河、辽河干流、浑太河、东北沿黄渤海诸河等水资源分区的河流生态需水, 分别占径流的 39.3%、63.0%、43.9%、43.3%、43.5%, 采用 Tennant 推荐流量及等级进行评价, 结果是: 除西辽河属于“中”等级外, 东辽河、浑太河、辽河干流、东北沿黄诸河等均在“好”等级以上, 东辽河达到“极好”等级。与之对应的二元水循环下的河流生态需水比例分别是 57.5%、74.1%、60.8%、60.3%、60.4%, 综合评价结果显示: 从水量角度评价, 西辽河不能达到生态需水“量”的标准, 其余能够达标, 从水质角度评价, 西辽河、浑太河、辽河干流、东北沿黄诸河等均不能够达到“质”的标准, 东辽河可以达标。从“量”与“质”相结合的角度评价, 仅有东辽河可以达标。因此, 水质状况是决定辽河流域河流生态需水是否满足生态系统需求的主要问题。

关键词: 二元水循环; 生态需水; 水量; 水质; 辽河

生态需水是在生态问题日益严重的背景下提出的, 研究生态需水的目的是为水资源的合理配置提供科学依据, 最终实现水资源的可持续利用以及流域(区域)生态与环境的保护。随着我国生态需水研究的不断深入, 相关的理论逐渐趋于成熟, 生态需水成为水资源规划、水资源配置、水利工程项目中环境影响评价所必须考虑的重要内容, 同时成为水生态系统修复、湿地与生物多样性保护等的关键内容。因此, 如何确定和评价生态需水, 也成为各级有关政府部门和众多学者关心的热点问题。

1 研究现状

长期以来, 人们对于生态需水内涵的探讨, 大多是从保护生态系统健康的角度出发, 主要是基于自然水循环进行论述和考虑的, 很少从自然与社会水循环相结合的角度来综合考虑生态需水的形成和特点。如从全球生态系统水平平衡角度出发定义的生态需水^[1]。

收稿日期: 2006-05-18; 修订日期: 2006-07-23

基金项目: 中国工程院重大咨询项目; 教育部重点科技项目(105042); “973”项目(G1999043601) [Foundation: Major Consultation Programs of Chinese Academy of Engineering; Ministry of Education Key Scientific and Technological Programs, No.105042; “973” Project, No.G1999043601]

作者简介: 王西琴(1965-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事生态需水、环境与经济关系的研究,

从生态系统本身的结构与功能, 以及维持生态系统健康与稳定角度定义的生态需水^[2, 4]等。此外, 针对我国严重的水生态、水环境问题, 从保护、恢复和改善生态系统角度定义的生态需水^[1, 5, 6]等。尽管也有学者开始从水循环角度探讨生态需水^[7], 但未考虑社会经济系统水循环及其对自然系统水循环的影响。这时的生态需水仅强调了量的内涵, 忽视了质的属性, 虽然有学者认识到河流系统生态环境需水应该包括对水质和水量两个方面的要求^[8, 9]。但如何将两者统一起来, 没有进行深入的研究。

目前, 多数研究集中在生态需水计算方法的确定及对生态需水的精确计算方面^[10-15], 涉及生态需水计算结果合理性分析和评价的研究较少。一般仅从量的角度对生态需水进行评价, 大多采用 Tennant 推荐的流量百分比作为评价的标准, 采用比照法进行评价^[16, 17], 并以此作为水资源配置的依据, 确定允许被社会系统利用的水资源比例。然而, 这种评价是基于在水质达到一定标准的假设前提下进行的, 缺乏对水质状况的考虑, 实际是一种理想水质状况下的生态需水评价。生态需水是在特定时间和空间满足生态系统某种生态功能和保护目标所需保持的一定水质目标下的水量^[8, 9]。因此, 如果单纯从水量角度进行评价, 难以反映实际的生态需水所面临的水质性匮乏状况, 评价结果往往与现实状况不相符合。如果以此作为水资源配置的依据, 很可能出现实际存在于生态系统的生态水的水量达标而水质不达标的情况。

当前, 国际上越来越重视水资源水质水量相结合的研究^[18], 我国在这方面的的工作也逐渐展开。夏星辉^[19]等以黄河为例建立了流域水资源数量与质量联合评价的方法, 提出只有当水体的水质达到了水资源功能要求的水质标准时, 这部分水才称得上是水资源, 从而具备水资源的功能。这种评价是从社会经济系统对水资源的需求角度出发, 评价水资源总量中有多少是可被社会系统利用的水量, 难以反映一个流域的河道生态需水是否能够满足生态系统需求的状况。为此, 本文基于水资源循环理论, 以自然水循环、社会水循环及其两者的关系分析为基础, 提出水量与水质相结合的河流生态需水评价方法, 以丰富生态需水理论体系, 同时也为流域水资源配置及其生态系统管理提供决策依据。

2 二元水循环下生态需水的计算与评价方法

2.1 “二元”水循环及其生态需水内涵

由于人类活动的影响, 实际存在的水循环包括自然系统水循环与社会系统水循环两部分(图 1)。社会经济系统水循环主要有农业水循环、工业水循环、生活水循环等, 包括取水、供水、用水、耗水、中水回用、排水(回归水)等几个环节。自然水循环与社会水循环相互联系, 相互影响, 构成了矛盾着的统一体—水循环的整体^[20]。其中取水、排水是社会经济系统水循环与自然生态系统水循环之间联系的纽带, 也是社会经济系统水循环对自然生态系统水循环影响最敏感、最重要的形式。

自然水循环与社会水循环的同时存在及其两者之间的相互联系, 使实际存在于自然

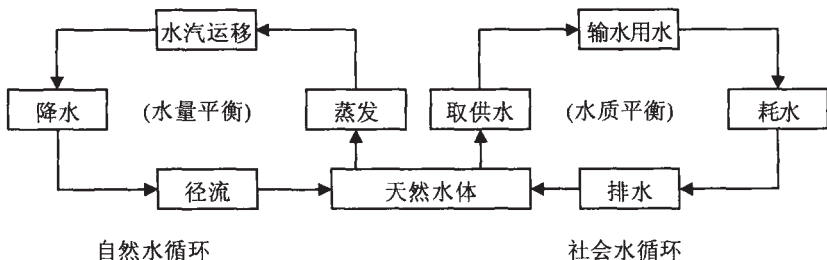


Fig. 1 The natural water circulation and social water circulation

生态系统中的水是未被人类利用的干净水与回归水的混合物。正是由于社会经济系统水循环,改变了自然系统的水的数量与质量,并由此引发了一系列的生态与环境问题。因此,质与量的统一构成了生态需水的本质。仅满足量的要求而达不到质的需求,或者仅满足质的要求而达不到量的需求,均不能达到生态需水保护生态系统的意义。

在“一元”水循环下,生态需水来自于天然降水,其大小主要取决于生态系统本身对水资源需求的影响,如生态系统结构、功能与价值,以及外界环境因子变化等,其水质反映了天然水化学特征;在“二元”水循环下,生态需水量不仅来自于天然降水,而且受到社会系统排水的补充,其水量大小与水质状况还受到人类利用水资源程度、利用效率、污水排放量等的影响。意味着二元水循环下的生态需水无论是水量,还是水质,已经完全不等同于一元水循环下的生态需水。下文主要讨论二元水循环下生态需水的水量、水质计算及其评价。

2.2 生态需水的水量与水质计算公式

2.2.1 水量计算 在水资源总量不变的情况下,如果将某流域的地表水资源总量当作一个整体(本文设定为小数=1或100%),按照水量平衡原理,有以下平衡关系:

$$Q_{ee} = Q - (Q_R - Q_I) \quad (1)$$

式中: Q_{ee} 为二元水循环下的生态需水量 (m^3); Q 为地表径流量 (m^3); Q_R 为取水量 (m^3); Q_I 为河道回归水量 (m^3)。

公式(1)等式右端括号内表示用水消耗:

$$Q_R - Q_I = Q_R \times (1 - \frac{Q_I}{Q_R}) \quad (2)$$

式中: $(1 - \frac{Q_I}{Q_R})$ 为水资源消耗系数 K (3)

$$\text{回归系数: } r = \frac{Q_I}{Q_R} \quad (4)$$

$$\text{水资源开发利用率: } u = \frac{Q_R}{Q} \quad (5)$$

如果生态需水比例用 (E_a) 表示,则公式(1)的相对值(比例)为:

$$E_a = 1 - (u - ur) = 1 - u(1 - r) \quad (6)$$

2.2.2 水质计算

(1) 生态需水污染物负荷 水资源通过社会经济系统使用与消耗后携带了一定浓度的污染物,最终回归河流。若河流水体的背景值为 C_1 , 回归水的污染物浓度为 C_2 , 则生态需水的污染物负荷量 (W) 为:

$$W = C_1 \times (Q - Q_R) + C_2 \times Q_R \quad (7)$$

$$\text{或: } W = C_1 \times (Q - Q_R) + C_2 \times rQ_R \quad (8)$$

C_1 是水资源的本底质量,主要是水体在自然界水循环过程中所形成的。 C_1 实质上也与人类对土地开发利用的影响密切相关,在土地开发程度较小的区域, C_1 相当于天然水的化学特征;在土地开发程度较大的地区,暴雨径流将携带更多的农田、城市非点源污染物进入水体,有可能使得河流的背景浓度 C_1 显著提高。对于我国大部分流域而言,暴雨径流具有一定的季节性,往往集中在洪水期,这时地表水资源更多情况下是作为弃水,由暴雨所带来的非点源污染成分在河道内停留的时间不长。而我国流域生态需水的矛盾问题主要集中在枯水期,由自然水循环过程带来的非点源污染物对 C_1 的贡献很小, C_1 更多的是保持着天然水的本底水平,因而,生态需水的水质主要取决于社会经济系统的废污水量及其浓度 C_2 。鉴于以上分析,为了使问题简化,也便于在实际中操作,本文仅考虑社会系统水资源利用方式对于水质的影响。公式(8)简化为:

$$W = C_2 \times rQ_R \tag{9}$$

(2) 水质计算公式 在已知点源与农业退水污染负荷的条件下, 污水排放回归到天然水系统后的混合水质除与排放回归污水的浓度有关外, 还与天然水系统的容量密切相关。因此, 生态需水的水质 (C_{ae}) 应为:

$$C_{\text{ae}} = \frac{W}{Q_{\text{ae}}} = \frac{C_2 \times rQ_R}{Q_{\text{ae}}} \tag{10}$$

或:

$$C_{\text{ae}} = \frac{C_2 \times ru}{1 - u(1 - r)} \tag{11}$$

很显然, 生态需水不仅与水资源开发利用、水消耗率有关, 而且与污水排放浓度、地表水水质标准有关, 是质量与数量的统一体, 是随污水排放浓度、水资源消耗率、水资源开发利用变化而变化的函数。如果 C_2 为实测已知, 则可计算 (C_{ae})。

当给定生态需水的水质标准 (C_{ae}) 时, 则可调节水资源的开发利用 (u) 或污水排放回归系数 (r), 用以求得 C_{ae} , 确定生态需水的水质标准, 实现水资源的优化配置。

2.3 生态需水“量”的评价

分析式 (6), 可以看出, 随着水资源开发利用率的提高, 生态需水的比例逐渐下降, 且与耗水率有着密切的关系, 即在相同的水资源开发利用率下, 耗水率越大, 生态需水的比例越小, 反之亦然。能够使生态需水在“量”上得以满足的条件是: 在水资源开发利用率一定的情况下, 要求耗水率必须低于某一阈值, 或者在耗水率一定的情况下, 水资源开发利用率不能超出一定的限度。

在水资源开发利用率与耗水率已知的情况下, 通过式 (6) 可评价生态需水量状况。如假设某流域水资源开发利用率是 60%, 耗水率是 50%, 则根据上式可知生态需水的比例是 70%, 中国工程院西北水资源咨询项目曾得出, 在水资源开发率与耗水率均为 70% 的情况下, 河流生态需水比例为 51% 的结论, 与该公式所得结论一致^[21]。

2.4 生态需水“质”的评价

2.4.1 “质”的评价指标 采用污径比 (b_w) 作为平均状况下生态水质的评价指标。根据污径比的定义, 即一定污水排放量与径流量的比值 (污径比), 可用下式表示为:

$$b_w = \frac{Q_T}{Q_{\text{ae}}} = \frac{rQ_R}{Q_{\text{ae}}} = \frac{ur}{E_{\text{ae}}} = \frac{ur}{1 - u(1 - r)} \tag{12}$$

根据公式 (12) 可绘制出水资源开发利用率 u、消耗系数 k、污径比 b_w 之间的关系 (图 2)。从图 2 看出, 在耗水率一定的情况下, b_w 随着水资源开发利用率的增大而变大; 在开发利用率一定的情况下, b_w 随着耗水率的增大而减小。因此, 要使 b_w 减小到某一阈值, 就必须降低水资源开发利用率以及提高水资源的消耗率。

2.4.2 “质”的评价标准

如果要使生态需水达到保护生态系统的要求, 就必须使生态需水的水质 (C_{ae}) 达到一定级别的水质标准 (C_0), 即 $C_{\text{ae}} \leq C_0$

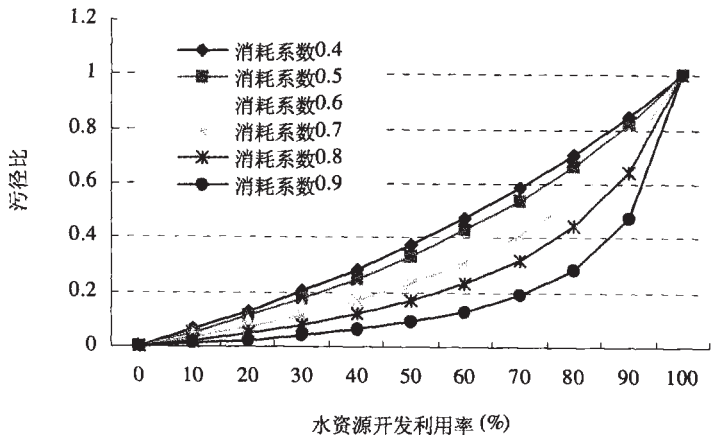


图 2 不同耗水率下水资源开发利用率与污径比的关系

由公式 (10) 知:

$$C_{ae} = \frac{C_2 \times rQ_R}{Q_{ae}} \quad C_0 \quad (13)$$

本文假定生态需水的污染物均来自排放的回归水, 对于回归水而言, 其浓度应低于国家污水排放标准 (C_{20}), 则, 公式 (13) 变为:

$$C_{ae} \leq \frac{C_{20} \times rQ_R}{Q_{ae}} \leq C_0 \quad (14)$$

则有:

$$\frac{rQ_R}{Q_{ae}} \leq \frac{C_0}{C_{20}} \quad (15)$$

或:

$$\frac{ru}{E_a} \leq \frac{C_0}{C_{20}} \quad (16)$$

公式 (15) 右端实质是地表水水质标准与回归水排放标准的比值, 本文定义为二元水循环下生态需水的“质”的评价标准 (C_{ae0}):

$$C_{ae0} = \frac{C_0}{C_{20}} \quad (17)$$

公式 (15) 左端实质就是污径比 (b_w), 由公式 (12) 和公式 (16) 得:

$$b_w = \frac{ru}{1 - u(1 - r)} \leq C_{ae0} \quad (18)$$

公式 (18) 可作为定量评价生态需水水质的公式。

步骤如下: (1) 计算污径比 (b_w); (2) 确定主要污染物 (如 i 类); (3) 确定生态需水所要达到的水质标准 (C_i , 如 II 类或 III 类); (4) 计算 i 类污染物地表水水质与排放标准的比值 (C_0 / C_{20}), 确定生态水水质标准 (C_{ae0}); (5) 将 b_w 与 C_{ae0} 进行比较, 若 $b_w \leq C_{ae0}$, 说明, 生态需水的“质”能达到规定的水质标准, 若 $b_w > C_{ae0}$, 说明生态需水的“质”不能满足规定的水质要求。

2.5 生态需水“量”与“质”的综合评价

对于生态需水的“量”与“质”的评价, 必须同时满足以下 2 个条件:

(1) 生态需水的比例高于规定的标准, 依据国际地表水资源开发利用的极限, 并参考 Tennant 推荐的满足鱼类及生物栖息地的流量百分比及其等级^[2], 本文设定 $E_{ae} = 60\%$;

(2) 污径比必须低于某类污染物规定的地表水水质标准与排放标准的比值 - 生态水水质标准, 即 $b_w \leq C_{ae0}$ 。一般情况下, 回归水的污染物浓度应达到国家一级排放标准, 地表水水质标准一般要求达到 III 类水质标准, 才能满足水体的生态功能。鉴于我国大部分地区以 COD 指标作为水环境的主要指标, 本文以 COD 为指标, 且假定废污水达到一级排放标准 (100 mg/L), 地表水水质为 III 类 (20 mg/L), 则 $C_{ae0} = \frac{C_0}{C_{20}} = \frac{20}{100} = \frac{1}{5}$ 。本文

设定 $b_w \leq 1:5$ 。

联合公式 (6) 和公式 (18) 进行综合评价。在具体评价过程中, 应根据流域的河流水文特点、主要污染物以及河流保护目标, 对生态需水量比例的标准、生态需水水质标准等进行适时调整。需要指出的是, 本文未考虑自然水循环过程对水质的影响, 将污染物全部当作来自社会系统回归水, 且假定污水排放达到一定的排放标准, 由此可能会出现生态需水的水质评价结果比实际值“好”的情况。此外, 假定回归水全部进入河道, 而自然生态系统如湿地生态系统、河岸带植被等, 对排污水 (农业退水) 具有一定程度的净化作用, 会使得回归水中的污染物浓度在进入河道之前会有所降低。本文对上述情况也未予以考虑, 从而可能会出现生态需水的水质评价结果比实际值“差”的情况。

3 实例分析

辽河流域位于我国东北地区西南部, 全流域面积为 $21.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国七大流域之一, 由辽河和大辽河两大干流及其支流组成。辽河流域水资源短缺, 水资源开发利用率高, 长期以来经济的发展靠挤占生态用水。由此引发的水生态问题十分严重。目前, 辽河流域河流系统的主要问题是河道断流、地表水污染、泥沙淤积。因此, 应该以解决河道断流、水体污染、河道冲淤平衡作为近期的重要目标。由此诊断辽河流域河流生态需水应以枯季生态流量、汛期输沙需水为主。

3.1 一元水循环下的生态需水计算与评价

为避免生态需水之间的重复, 按照水资源分区进行各单元河流生态需水的计算。依据汇水面积, 将辽河流域片分为 6 个 2 级水资源区, 分别是西辽河、东辽河、辽河干流、浑太河、东北沿黄渤海诸河、鸭绿江水资源区。由于鸭绿江属于国际河流, 地表水开发利用很低, 本文未计算鸭绿江水资源区的生态需水。

针对辽河流域河流季节性、干河、断流等特点, 本文提出枯水季节最小流量法计算河道枯季生态流量。枯水季节最小流量法就是指采用多年枯水季节径流量中的最小值作为河道枯季生态需水量。计算公式为:

$$W = \min\{Q\} \tag{19}$$

式中: W 为枯季河道生态需水量 (10^8 m^3); Q 为第 i 年枯水季节径流量 (10^8 m^3); i 为统计年数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。对于辽河流域, 第 1 年的 10、11、12 月和第 2 年 1、2、3、4、5 月份为枯水季节。

汛期 (6~9 月) 输沙需水量采用汛期最小输沙量方法^[23]进行计算。

水文站点选取集水面积大、靠近下游的站点。共选择 15 条河流的 15 个水文断面, 依据 1956~2000 年系列水文统计数据, 计算各水资源分区的生态需水, 结果是: 西辽河、东辽河、辽河干流、浑太河、东北沿黄渤海诸河、辽河流域片的河流生态需水分别占径流的比例是: 39.3%、63.0%、43.9%、43.3%、43.5%、43.2% (表 1 第 5 列)。

按照 Tennant 方法^[22]推荐的流量等级和标准对计算出的生态需水进行评价, 结果是: 除西辽河属于“中”等级外, 东辽河、浑太河、辽河干流、东北沿黄诸河等均在“好”等级以上, 东辽河达到“极好”等级。(表 1 第 6 列)。意味着一元水循环下生态需水能够满足河流生态系统保护目标要求。

3.2 二元水循环下的生态需水计算与评价

根据公式 (6), 计算二元水循环下的生态需水 (表 1), 其中地表水资源开发利用 (u) 是与一元水循环下生态需水相对应的值, 水资源耗水率采用当前辽河流域各水资源分区的实际耗水率。由此计算得西辽河、东辽河、辽河干流、浑太河、东北沿黄渤海诸河、

表 1 辽河流域生态需水评价结果

Tab. 1 The evaluation results of instream environmental flow in Liaohe River basin

水资源分区	一元水循环下生态需水					利用 率 (%)	消耗 率 (%)	二元水循环下生态需水				
	枯季生态需水 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	汛期输沙需水 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	生态需水总量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	生态需水比例 (%)	评价结果			比例 (%)	污径比 (bw)	水量评价结果	水质评价结果	水量水质综合评价结果
西辽河	3.89	4.31	8.20	39.3	中	60.7	78	57.5	1:2.9	不达标	不达标	不达标
东辽河	0.32	4.62	4.94	63.0	极好	37.0	78	74.1	1:7.7	达标	达标	达标
辽河干流	2.88	17.15	20.03	43.9	好	56.1	55	60.8	1:1.7	达标	不达标	不达标
浑太河	4.91	18.71	23.62	43.3	好	56.7	58	60.3	1:1.8	达标	不达标	不达标
东北沿黄渤海诸河	17.06	45.49	62.55	43.5	好	56.5	65	60.4	1:2.2	达标	不达标	不达标
辽河流域片	28.74	85.66	114.4	43.2	好	56.8	64	60.2	1:2.1	达标	不达标	不达标

注: (1) 综合耗水率 (K) 数据来源于: 辽宁省水文水资源勘测局, 辽宁省水资源评价, 2004;

(2) 地表水资源开发利用 (u) 指与一元水循环下生态需水相对应的值。

辽河流域片的生态需水的比例分别是：57.5%、74.1%、60.8%、60.3%、60.4%、60.2%。

根据公式 (12) 得，西辽河、东辽河、辽河干流、浑太河、东北沿黄渤海诸河、辽河流域片的生态需水的污径比分别是：1:2.9、1:7.7、1:1.7、1:1.8、1:2.2、1:2.1 (表 1 第 10 列)，以 COD 作为水质评价指标。

根据本文的“量”与“质”综合评价方法与标准，对辽河流域二元水循环下的生态需水进行评价(表 1)，结果为：从水量角度评价，西辽河不能达到生态需水“量”的标准，其余能够达标，从水质角度评价，西辽河、浑太河、辽河干流、东北沿黄诸河等均不能够达到“质”的标准，东辽河可以达标。因此，从“量”与“质”相结合的角度评价，仅有东辽河可以达标。说明水质是影响生态需水是否满足生态系统需求的主要因素。

3.3 两种水循环下生态需水的比较分析

从以上两种水循环下的生态需水评价结果看出，两者存在很大的差异。辽河流域一元水循环的生态需水评价结果，大部分在“好”等级以上，只有西辽河是“中”等级，二元水循环下生态需水的水量与水质的评价结果，只有东辽河可以达标，其余河流均不达标。而且说明水质是决定生态需水是否能够满足生态系统需求的主要因素。

如果以一元水循环下计算的生态需水作为水资源配置的依据，很可能出现表面上看起来生态需水满足了生态系统的需要，但实际上达不到保护生态系统的目的的情况。因为在二元水循环下，实际存在于河道内的水量已经不等同一元水循环下的量，由于回归水的存在，往往是前者大于后者，从表面看起来，水量增多了，但由于回归水及其污染物的影响，常常导致实际存在于河道内的水体的水质低于一元水循环下生态需水的水质，并使水质成为影响生态需水是否达标的键，对辽河流域二元水循环下生态需水的评价显示，从水量角度评价，只有西辽河不达标，其余均能达标，从水量与水质角度评价，只有东辽河达标，其余均不达标。因此，涉及生态需水的水资源配置，应该以二元水循环下生态需水的评价结果作为依据。

4 结论与讨论

(1) 基于自然水循环的生态需水的概念，仅强调了生态系统对于水量的需求，忽略了社会水循环的影响，其实质是一种理想状态下的生态需水。“二元”水循环下的生态需水，考虑了两种水循环的相互联系与影响，强调了“质”与“量”的内涵，是实际存在于自然系统的水量与水质的统一体。本文暂且将前者称为理论生态需水，后者称为现实生态需水。理论生态需水的量的大小取决于生态系统的结构与功能，现实生态需水量的多少与质的高低不仅受生态系统本身对水资源需求的影响，同时还与开发利用率、回归水的量的多少、污染物浓度有直接的关系。

(2) 在流域水资源总量不变的情况下，可以通过以下两种途径提高现实生态需水的质与量：降低水资源开发利用率。通过提高水资源的利用效率、水的重复利用率、污水处理回用率等措施实现。实施废水、污染物总量控制，采用更为严格的废水排放制度，使污染物浓度降低。对于废水排放已经达标的流域，如果能够实施总量控制，相当于河流接纳的是排放标准更加严格的废污水，意味着进入河道污染物的减少，实质上降低了污径比，提高了生态需水的质量。

(3) 辽河流域各水资源分区理论生态需水的比例分别是：西辽河 39.3%、东辽河 63.0%、辽河干流 43.9%、浑太河 43.3%、沿黄渤海诸河 43.5%，除西辽河属于“中”等级外，其余均在“好”等级以上。现实生态需水的比例分别是：西辽河 57.5%、东辽河 74.1%、辽河干流 60.8%、浑太河 60.3%、沿黄渤海诸河 60.4%。从水量与水质角度综合评价，只有东辽河可以同时满足生态需水的“量”与“质”的标准，其余河流均不达标。

充分说明,以理论生态需水的评价结果作为水资源配置依据的不足,以及以现实生态需水评价结果作为水资源配置依据的重要性。同时也说明,必须从水量与水质相结合的角度评价生态需水,否则难以反映现实生态需水所面临的水质性匮乏状况。

参考文献 (References)

- [1] Qian Zhengying, Zhang Guangdou. General Report and Special Subject Reports on Strategic Research of Water Resources in the Sustainable Development of China. Beijing: China Water Power Press, 2001. 132-138. [钱正英, 张光斗主编. 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. 132-138.]
- [2] Covich A. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. In: Gleick P H (ed.), *Water and Ecosystems*. New York: Oxford University Press, 1993. 40-55.
- [3] Wang Xiqin, Zhang Yuan, Liu Changming. A theoretical discussion of ecological and environmental water requirements of river course. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 240-246. [王西琴, 张远, 刘昌明. 河道生态及环境需水理论探讨. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 240-246.]
- [4] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth. Conference of SADC Minsters, Pretoria. 1995. 23-24.
- [5] Whipple W, DuBois J D, Grig N et al. A proposed approach to coordination of water resources development and environmental regulations. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(4): 713-716.
- [6] Tang Qicheng. The development in oases and rational use of water resources. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1995, 9(3): 107-112. [汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用. *干旱区资源和环境*, 1995, 9(3): 107-112.]
- [7] Zheng Hongxing, Liu Changming, Feng Huali. On concepts of ecological water demand. *Advances in Water Science* 2004, 15(5): 626-634. [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): 626-634.]
- [8] Yan Denghua, He Yan, Deng Wei et al. Ecological water demand by river system in East Liaohe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 46-49. [严登华, 何岩, 邓伟等. 东辽河流域河流系统生态需水研究. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 46-49.]
- [9] Feng Huanli, Wang Chao, Zhu Guangcan. Effect of land use on ecological water requirement of river basin. *Advances in Water Science*, 2002, 13(6): 757-763. [丰华丽, 王超, 朱光灿. 土地利用变化对流域生态需水的影响分析. *水科学进展*, 2002, 13(6): 757-763.]
- [10] Shi Wei, Wang Guangqian. Estimation of ecological water requirement for the lower Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 595-601. [石伟, 王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算. *地理学报*, 2002, 57(5): 595-601.]
- [11] Ni Jinren, Jin Ling, Zhao Ye'an et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the lower Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (10): 1-7. [倪晋仁, 金玲, 赵业安等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究. *水利学报*, 2002, (10): 1-7.]
- [12] Liu Jingling, Yang Zhifeng, Xiao Fang et al. Conformity calculation models on river ecological basic flows. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 436-441. [刘静玲, 杨志峰, 肖芳等. 河流生态基流量整合计算模型. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 436-441.]
- [13] Xu Zhixia, Wang Hao, Chen Minjian. Research on methods of minimum ecological water requirements in river based on analysis of ecosystem (1). *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005, 35(12): 31-34. [徐志侠, 王浩, 陈敏建. 基于生态系统分析的河道最小生态需水计算方法研究(1). *水利水电技术*, 2005, 35(12): 31-34.]
- [14] Song Jinxi, Liu Changming, Xu Zongxue. Estimation of instream flow requirements for transporting sediment in the lower reach of the Weihe River. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 717-724. [宋进喜, 刘昌明, 徐宗学等. 渭河下游河流输沙输水量计算. *地理学报*, 2005, 60(5): 717-724.]
- [15] Liu Suxia, Mo Xingguo, Xia Jun et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique or slope technique. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 273-281. [刘苏峡, 莫兴国, 夏军. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较. *地理学报*, 2006, 61(3): 273-281.]
- [16] Wang Xiqin, Liu Changming, Zhang Yuan. Study of the basic environmental water requirement of the rivers in Huang-Huai-Hai plain. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 169-176. [王西琴, 刘昌明, 张远. 黄淮海平原河道基本环境需水研究. *地理研究*, 2003, 22(2): 169-176.]
- [17] Men Baohui, Liu Changming, Xia Jun et al. Estimating and evaluating on minimum ecological flow of Western Route Project of China's South-to-North Water Transfer Scheme for water exporting rivers. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 135-139. [门宝辉, 刘昌明, 夏军等. 南水北调西线一期工程河道最小生态径流的估算与评价. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 135-139.]
- [18] Dai T, Labadie J W. River basin network model for integrated water quantity/quality management. *Journal of Water*

Resources Planning and Management, 2001, 127(5): 295-305.

- [19] Xia Xinghui, Yang Zhifeng, Shen Zhenyao. Integrated evaluation of water quality and quantity of Yellow River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(5): 595-600. [夏星辉, 杨志峰, 沈珍瑶. 从水质水量相结合的角度再论黄河的水资源. *环境科学学报*, 2005, 25(5): 595-600.]
- [20] Shao Yisheng. Control and Plan of City Water System. *City Planning Review*, 2004, (10): 63-67. [邵益生. 城市水系统控制与规划原理. *城市规划*, 2004, (10): 63-67.]
- [21] Liu Changming, Wang Lixian, Xia Jun. Research on Regional Allocation of Ecological Construction and Ecological Water Requirement in Northwest China. Beijing: Science Press, 2004. 120-123. [刘昌明, 王礼先, 夏军. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2004. 120-123.]
- [22] Tennat D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. In: Orsborn J F, Allman C H (eds.), *Proceedings of Symposium and Specility Conference on Instream Flow Needs: II*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 1976. 359-373.
- [23] Li Lijuan, Zheng Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 496-500. [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): 496-500.]

Water Quantity/Quality Combined Evaluation Method for Rivers' Water Requirements of the Instream Environmental Flow in Dualistic Water Cycle: A Case Study of Liaohe River Basin

WANG Xiqin¹, LIU Changming^{2,3}, ZHANG Yuan⁴

(1. School of Natural Resources and Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the analysis of the relationship among environmental flows of river requirements, the efficiency of water resource utilization and the consumption coefficient, and discharge concentration of waste water, the water quantity and water quality calculation method of environmental flows of river requirements in dualistic water cycle is developed, and the criteria for environmental flows of river requirements are established. Taking Liaohe River as demonstration, the environmental flows of river requirements for Xiliao River, Dongliao River, Liaohe River artery, Huntai River and northeast rivers along Huangbohai (Huanghai and Bohai seas) in unitary water cycle make up 39.3%, 63.0%, 43.9%, 43.3% and 43.5% of runoff, respectively. Evaluated according to Tennant recommended flow and grade, the results show that: except Xiliao River which is "median", the rest are all above "good", and even the Dongliao River is "very good". The corresponding proportion of environmental flows for each river in dualistic water cycle is 57.5%, 74.1%, 60.8%, 60.3% and 60.4%, respectively. The combined evaluation results show that evaluated from the angle of "quantity", except Xiliao River, the rest rivers can all achieve the "quantity" criterion of environmental flows requirements, but if evaluated from the angle of "quality", only Dongliao River can meet the "quality" standard, and by water quantity/quality combined evaluation method, only Dongliao River can achieve the criterion.

Key words: dualistic water cycle; environmental flows of river requirements; water quantity; water quality; Liaohe River