

文章编号:0559-9350(2007)03-0282-07

水循环生态效应与区域生态需水类型

陈敏建

(南京水利科学研究院 水文水资源研究所,江苏 南京 210029)

摘要:本文从水循环基础理论出发,通过分析水文循环过程的能量转化规律,揭示水循环生态效应变化机理,提出判断生态系统演变与水循环关系的基本准则,以此区分生态需水类型。降雨分布决定了内陆河干旱区与外流域生态需水的基本格局,降雨径流关系的稳定性决定了半湿润半干旱区与湿润地区生态需水的差异,依附于地表水体的水生态系统随水量发生变化,其临界点取决于径流量的丰沛程度。我国区域生态需水类型可分为:西北内陆河干旱区植被生态系统需水;半湿润半干旱区河湖与地下水连通系统的整体生态需水;北方湿润地区河湖水生态系统需水;南方湿润地区维持河流生态服务功能最大化的流量。

关键词:水循环;驱动能量;生态效应;生态需水类型

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

地球上自然生态与人类生存和发展共同分享有限的水资源。根据水循环,降水到达陆地后,大部分蒸发或入渗土壤后再蒸发,小部分形成地表径流。从广义水资源角度,分解为不可控水资源和可控水资源^[1];从生态角度,也形象地称之为绿色水和蓝色水。降水的直接利用,或者说绿色水支撑了地表大部分植被生态,人类活动难以直接干扰和调控这种形态,通过对可控水资源的开发利用,改变流域生态状态。因此,生态需水研究对象为可调控的水资源支撑的生态,对于降雨支撑的地带性生态不直接研究,通过对降雨径流关系研究,反映生态格局演变。作为水土资源综合管理思想的延伸,生态需水是在流域自然资源,特别是在水土资源开发利用条件下,为了维护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。国外现有的经验与成果主要关注生态系统维持正常状态下的生态需水,以避免危机状态出现。^[2,3]与国外比较,我国生态需水问题的复杂性、严重程度,涉及的深度和要求有所不同。中国生态用水问题突出的流域,河流经常出现断流、干涸等水生态系统深度破坏的情形。因此需要更深入研究生态退化过程、机理及其相应的生态需水定义。中国生态需水问题的复杂性还在于,我国地域辽阔,区域差异大,复杂的自然条件,形成了水循环显著的区域特征。

在人类活动干扰下,水分条件的改变是生态系统状态变化的驱动因素之一,反映在水文循环的各个环节,包括降雨、降雨径流关系、径流分布与运动等关系的改变。研究流域水循环过程中的生态效应,是生态需水理论基础。本文从水循环基础理论出发,分层次分析水文循环过程的水分变化,并且通过分析与之相应的水循环驱动能量转化规律,揭示水循环生态效应变化机理,提出判断生态系统特性与水循环关系的基本准则,从机理上分析我国不同区域生态需水类型,为建立区域生态需水计算模型提供理论依据。

1 水循环生态效应分析理论基础

根据质量守恒定律,用水平衡方程式研究水循环的水分运移与转化关系。根据水循环要素运动的

收稿日期:2006-10-23

基金项目:“十五”国家科技攻关计划重大项目(2001BA610A-01;2004BA610A-01)

作者简介:陈敏建(1957—),男,江西九江人,博士,教授,主要从事水资源规划与管理、生态水文等方面研究。E-mail:mjchen@nhri.cn

动力学特点,分析水循环能量转化特征。根据能量守恒与转化定律,研究水循环的驱动力变化,特别是人类活动作用下,水文循环的能量系统发生变化,导致出现水分运动的再分配,从而引起生态系统的相应改变。

1.1 基本水循环 任一时间内,地球上任一区域的水分平衡关系为

$$\sum I - \sum O = \Delta W \quad (1)$$

式中: $\sum I$ 为进入该区域的总水分; $\sum O$ 为流出该区域的总水分; ΔW 为该区域水分储存量的变化。

水循环发生的范围:全球以及地球的局部不同尺度的区域。在水循环的作用下,陆地表面区域形成径流场。

水循环运动的能量:水循环的能量来自两类,即地球重力场牵引下的动力学和太阳能直接作用下的热力学。

水循环空间的介质:大气、地表、土壤层,包括地表的各种物质,如植被、裸土、裸岩、地表水体、人工建筑设施等。

水循环过程的生态作用:在各种水的收入通量、支出通量、水分条件变化全过程中,包括生态平衡中的无机环境变化(水作为无机环境的要素)和有机物变化,以及整个水循环过程中各类生物的受益情况。

水文循环过程与生态系统的发生、发展和演变关系密切,人类通过对地表、地下径流的开发利用,改变水文循环的天然属性,特别是改变径流形成条件、运动过程、耗散规律,进而造成生态系统的改变。

1.2 流域水循环 根据水量平衡原理,一个区域的水量在一定的时段内满足以下关系

$$P = R + E + U_g + \Delta V \quad (2)$$

式中: R 为河川径流量; E 为总蒸发量; P 为降水量; U_g 为地下潜流量; ΔV 为蓄水变量包括地表、地下、土壤。

多年平均条件下, $\Delta V = 0$, 水平平衡为

$$P = R + E + U_g \quad (3)$$

对于地下水闭合流域,地下潜流量 $U_g = 0$, 则多年平均水平平衡转化为

$$P = R + E \quad (4)$$

由于河川径流量可以表述为 $R = R_s + R_g$, R_s 为地表径流, R_g 为地下径流。因此,水平平衡方程(4)又转化为:

$$P = R_s + R_g + E \quad (5)$$

水循环要素的运动方向:降水、蒸发为垂直运动项,径流为水平运动项。

水循环的能量分析:垂直运动项中,降水能量来自两方面,先是热力学作用形成雨、雪,随后是地球重力产生的自由落体运动;蒸发能量来自热力学;水平运动项(径流)的能量来自于重力作用下沿坡面运动,并且汇集在河槽(由高向低)作下泄运动。因此,水平运动的径流 R 为重力学因子,垂直蒸发运动的 E 为热力学因子,垂直降水运动的 P 为重力学—重力学复合因子。

流域水循环生态效应:降水 P 到达地面后,在形成地表径流 R_s 过程中,对地表植被等生态景观起重要支撑作用。径流汇集到河槽、湖盆之后,维护水生生物繁衍进化,自身形成水生态系统。

对于陆面生态,最主要是植被群落蒸腾发量 E_i , 降水量 P 与 E_i 的关系最为关键。一般情况下,如果降水量 P 能够满足陆面总蒸散发量 E 的要求,植被群落蒸腾发量 E_i 自然能得到满足,此时 E_i 的水分主要包含在陆面总蒸散发 E 。该地区满足蒸散发后多余的降水量将会产生径流 R 。

对于一个封闭的内陆河流域,降水量 P 集中在山区,形成径流。平原地区降水量 P 远小于陆面总蒸散发量 E , 不能满足植被群落蒸腾发量 E_i 的要求。此时平原区 E_i 的水分来源主要是来自山区的径流转化的潜水 R_g , 平原地区些微的降水不能产生径流。

1.3 地表水体的水分运动 径流汇入河道、湖泊等地表水体,地表径流 R_s 与潜水 R_g 进行交换。地表径流 R_s 在河道或湖泊中运动,对水生态系统起到根本保障作用,在不同层次上满足水生态系统的临界

要求,包括水量、水质、水动力学等各方面,水生植物和陆生植物交替变换。洪水期,水生态系统的水量交换、能量流动、物质循环加强,生物迁移通道连通,生存空间得以进一步扩展。枯水期,平原地区潜水 R_g 对地表径流的补给调节是支撑河道生态的主要动力。

某时段在任一河段(湖盆)水量平衡为

$$P + R_i = R_o + E + O_g - I_g \pm \Delta W \quad (6)$$

式中: P 为该时段降水量; R_i 为上游流入水量; R_o 为下游流出水量; E 为蒸发量; O_g 为地表渗漏补给地下水水量; I_g 为地下水补给地表水体量; ΔW 为河槽(湖盆)蓄水变化量。地表渗漏补给地下水水量与地下水补给地表水体量差值($O_g - I_g$)表明了地表水与地下水补排关系。

一般来说,丰水季节地表径流量大,是地表水补给地下水为主,此时地下水补给地表水体量 I_g 近似为零。河槽(湖盆)蓄水变化量 ΔW 与地下水关系密切,可以看成地下水的函数。

枯水季节则是地表水体生态系统接受考验的时期。此时,没有降水补充,天然情况下,河流(湖泊)水分依靠上游注入和地下水的反调节补给,地下水补给地表水量 I_g 大于地表渗漏补给地下水水量 O_g ,对于河流生态而言,下游河道径流与地下水的转化关系至关重要。在大规模开采地下水,导致地下水位下降(低于河底)的情况下,枯水季节地表水-地下水补排关系发生逆转,地下水补给调节消失,河槽调蓄能力基本散失,水平衡方程式(6)变为

$$R_i = R_o + E + O_g \quad (7)$$

上述关系式表明,河道径流来自上游下泄,并且损失于蒸发和渗漏。由取用水造成的径流衰减过程也是水生态系统退化过程,为了防止出现生态灾难,需要保持河道一定的水量。亦即需要考虑生态系统的某种临界状态,寻求对应于这种临界状态的河川径流量 R^* ,作为预防生态“灾变”的一种衡量标志,只有当 $R_i \geq R^*$ 时,河流是正常的,或者说,水生态系统是正常的。

2 水循环的生态效应机理分析

驱动水循环的能量来自于热力学和地球引力,而人类经济活动产生的各种作用力加入后,在自然和人工双重作用下,支撑水循环的能量发生变化,从而导致水循环生态效应的变化。

2.1 尺度生态效应 从发生空间、驱动能量、变化过程看,水循环的生态效应表现在以下 3 个相互联系的层面。

(1)与降水分布密切相关的宏观效应。降水是水循环的基本通量,其丰裕程度和分布特点决定了水循环生态效应的根本属性,决定了区域生态系统需水的总体格局。降水发生在大气和地表之间,连接大气和地表,是一个立体的空间。降水条件受热力学控制,由于需要巨大的能量积蓄,并且受其它因素干扰,其变化是缓慢和不可逆的,通常需要几十年才显现。这在时空尺度上是宏观生态效应。

(2)与降雨-径流关系的稳定性密切相关的中观效应。水土资源开发利用导致降雨-径流关系发生变化时,将随之出现生态与环境的变化。发生在地表面的整个径流场,包括陆地和水域,是一个拓扑的面。降水在地表演化的能量,由热力学(作用于蒸发)和地球重力(作用于渗透)作用控制,其变化则需要几年乃至十几年才显现。这在时空尺度上属于中观生态效应。

(3)与径流运动的空间和方式密切相关的微观效应。包括地表径流活动区域,即水体规模,以及地表径流与地下径流相互转化关系。水资源利用导致地表水体径流量减少、地下水位下降,使得径流的活动空间缩小,地表水、地下水转化关系改变,进而导致依赖于水体的水生态系统的退化,直至水体自身的消亡。发生在地表连通水域,是一个拓扑的线,受地球重力场控制,受人工作用直接力影响,其变化通常在一年内即可显现。这在时空尺度上属于微观生态效应。

2.2 生态效应作用机理 水土资源开发利用引起的生态退化效应,在时间尺度和空间尺度上,总是由微观→中观→宏观的渐进过程。在机理联系上,则是各类水资源开发利用工程措施等人工作用力的能量循序积累传递的过程。根据能量守恒定律,在拓扑空间中,人工对水循环的干扰通过能量积累与传

递,由点、线到面,进而整个空间,从而导致改变水循环,其生态效应也随之改变。

人类对水循环的干扰作用由局部、个别、微观开始,通过水土资源开发等各种经济活动形成的作用力,直接作用于地表水体及其相关的潜流场,使得支撑水文循环的能量,在热力学和地球重力场之外,加入了各种人工作用力,最初,人工能量对水循环直接作用于地表取水、地下水开采,只在局地短期内有限地影响到作用河段,由于水资源的取用与消耗,使得天然径流量减少、地下水位下降。当这些活动的力度持续加强、并且密度增加,河道频繁干涸,地下水位大面积持续下降,引起地表、地下水转化关系的变化,进而导致降雨—径流关系发生改变。其主要特点是包气带增厚,致使增加蒸发,减少径流。蒸发的增加导致水热条件的改变,水循环的热力学因素改变使得水循环宏观生态效应悄然发生渐变,通过几十年长期积累,将导致水循环基本格局的变化。

水资源开发利用导致的宏观生态效应变化远不如中观和微观层次敏感。对水资源规划与管理影响最显著的是微观与中观效应。中观生态效应是水资源规划的重大课题,微观生态效应对取水管理意义重大。认识和重视宏观生态效应,对于正确指导区域水资源开发利用与生态环境保护具有决定性意义。从水循环的能量守恒与转化来讲,研究一系列生态用水标准,是为人类经济活动对自然水循环的作用划定一个合理的限度,以此去规范水资源开发利用行为。

应该指出的是,导致水循环宏观生态效应变化的水热条件改变,还有其它因素,如温室效应等,并且,改变宏观生态效应需要巨大的能量,非短期能显现,需要长期的、持续不断的能量积累。

3 区域生态需水类型分析

3.1 生态效应判定准则

3.1.1 准则之一: 区分内陆河与外流域生态需水 根据降水量是否满足陆地植被需求,判定和区分内陆河流域与外流河流域水循环生态效应。取决于降水量分布、蒸散发等水热条件。

在内陆河干旱区,降雨集中在山区,降雨—径流发生区域与径流运动区域分离,出现显著的径流形成区与径流耗散区。在径流耗散区,径流运动处于一个狭小的地带,其它广阔区域处于无流状态,降水量远小于蒸散发。此时,径流耗散区的植被需水依赖于径流补给,而无流区由于水分不足处于无植被状态。这一准则成为区分内陆河干旱区与外流域水循环生态效应的指示性标志,反映了完全不同的生态需水类型,决定了不同的计算方法和研究方向。

由于内陆河植被生态系统依赖于河川径流,在大规模人类活动条件下,绿洲生存的重要性和紧迫性都远远超过河湖等地表水体自身的水生态系统。在这种胁迫的用水条件下,绿洲生态需水必须无条件满足,水体的水生态系统用水服从于绿洲植被用水需求,即所谓河道外生态需水。

3.1.2 准则之二: 区分半湿润半干旱区与湿润地区生态需水 由降雨—径流关系的稳定程度,判定和区分半湿润半干旱区与湿润地区水循环生态效应。取决于降雨—径流关系的稳定性,表现在两方面:径流生成条件的变化和径流运动条件的变化。

半湿润半干旱区易受经济活动影响,从而产生降雨—径流关系不稳定问题。表现在两个方面:一是水土治理引起的所谓“减水减沙”效应,山区坡面治理水土流失措施改变了产流条件,植树造林、淤地坝等措施增大坡面糙率,延缓坡面流速,使得植被对降水的吸收量增加,导致产流量减少。二是地表水大量取用和地下水大规模超采引起的所谓“准内陆河化”效应,上游拦蓄使下泄水量减少,地下水大规模超采使河流失去河岸调节功能,导致河道补给条件发生变化;枯水季节,河道水量仅依赖于上游下泄,结果使得河道维持水量难以保证,出现大范围断流。地下水位的大幅度下降,降低土壤含水量,使得包气带加厚且变得干燥,最终出现径流系数下降,降雨—径流关系发生变化。

这个准则将外流域生态需水问题区分半湿润半干旱类型和湿润类型。显而易见,半湿润半干旱地区河流比湿润地区河流生态需水问题要复杂得多。这类生态需水问题的核心,是地表水地下水转化关系改变,引发降雨—径流关系的改变,导致生态需水问题复杂化。

3.1.3 准则之三: 区分地表水体生态需水 依附于地表水体如河流湖泊等的水生态系统随水量发生

变化,无论水循环特点如何,水生态系统在低水位情况下都有一个临界的变化特性。

径流量减少,导致水循环连接度退缩、断裂、消失,伴随着水生态系统生物量下降、物种灭绝、生物多样性破坏、直至生态系统消亡。在我国现实情况下,这个问题在半湿润半干旱区最为突出,如何维持河道流量与湿地规模是一个十分敏感且普遍存在的迫切问题。

3.2 生态需水基本类型

3.2.1 降水与植被生态需水 降水、蒸发等水热条件决定了水循环的稳定程度,也决定了植被生态的等级和分布。判定植被生态水分来源是生态需水研究必须首先解决的问题。陆面植被群落蒸腾发量 E_i 、降水量 P 以及它们之间的关系,是影响流域生态需水基本形态的最关键因素。

降水的数量和分布条件决定了生态景观的地带性变化规律,形成了生态总格局。 $(P - E_i)$ 为判定植被生态用水来源的指示性指标。当 $(P - E_i) > 0$,降水满足植被生态用水; $(P - E_i) < 0$,降水不能够满足植被生态用水,需要径流补充,为非地带性植被; $(P - E_i) = 0$,处于脆弱的过渡状态,视具体情况而定。植被群落蒸腾发量 E_i 的分布特点与气候关系密切。为了分析植被群落蒸腾发量 E_i 的基本特点,作者收集和分析了国内外相关观测实验研究资料,参考有关林草需水 E_i 实验分析资料。大量数据表明,即使在干旱地区,维持植被成长的水量必须在 150~250mm 以上^[1]。

以 $E_i = 150 \sim 250\text{mm}$ 作为临界点,全国大致可以划分为两个区域。

(1) 内陆河干旱区非地带性植被生态。干旱的西北内陆河基本上属于 $(P - E_i) < 0$ 的区域,此处为非地带性植被类型,植被生态需要径流补充维持,绿洲为中心的陆面生态保护是最核心的生态需水问题。

(2) 外流域地带性植被生态。在 $(P - E_i) > 0$ 的区域,以 800mm 降水量为界,大体上可以划分为两类,一是淮河干流以北、包括长江上游部分地区,降水量小于 800mm、多数在 600mm 以下,属半干旱、半湿润过渡带,这里植被虽由降水补给维持,但水循环基础较为脆弱,易受水资源开发利用影响,出现显著生态退化效应;二是淮河干流以南、包括长江、珠江流域和东南沿海的广大地区,地处湿润地带,大部分地区降水量高于 1 000mm,植被生态受到丰富降水支持,水体生态系统也较稳定,水循环受水资源开发利用的影响不显著。

此外,在干旱的西北内陆河与上述区域之间,有一个狭长的过渡地带,主要在高寒的青藏高原东部和黄河上游及河套地区。此处降水量较少,偏干旱,植被生态脆弱,且易受降水量波动影响。

3.2.2 降雨径流关系稳定性与河湖生态需水 降雨—径流关系的稳定性直接影响到河湖生态需水的维持。径流系数可以作为描述降雨—径流关系稳定性的指标,通常情况下,径流系数大于 0.3,降雨径流关系稳定性较好。我国西北内陆河由于降雨—径流发生在山区,径流系数一般都大于 0.34,尽管整个流域生态脆弱,但降雨—径流关系受人工影响不大,稳定性较好。淮河干流以南地区,径流系数一般都大于 0.4,且降雨量大,降雨—径流关系非常稳定。东北松花江流域等北方湿润地区,径流系数亦在 0.3~0.4 以上,但降水量较小,降雨—径流关系稳定性较南方湿润地区弱。

降雨—径流关系最不稳定的是淮河干流以北的半湿润半干旱区。此处径流系数基本上在 0.2 以下,最易受外力影响改变降雨—径流关系。该区域也是地表水地下水转化最频繁、最活跃地区。水资源开发利用使得径流量减少、地下水下降,导致地表水、地下水转化关系发生变化,进而改变降雨—径流关系。为了保障水系生态功能,维持河道一定的生态流量是核心问题,但要达到这个目标,需要保持一定的地下水位,以支撑甚至补给河道径流量。

3.2.3 地表水地下水转化关系与生态地下水位 半湿润半干旱区由水资源开发利用引发的生态问题,表现在河道径流的衰减和地表地下水转化关系的逆转。河道径流来自上游下泄,并且损失于蒸发和渗漏。为了防止径流衰减导致生态灾难,需要保持河道足够的水量。要维持这样状态,地下水的支撑条件必不可少。

从地下水位 H_g 与河底高程 M 之间的关系可以分析地下水维持河岸调节作用。当 $H_g > M$ 可以维持地下水正常的调节功能,即使上游不来水,地下水补给河道不至干涸。当 $H_g < M$ 地下水调节功能基

本散失,河道径流渗漏补给地下水;在 H_g 和 M 相差不大时,地下水对河道径流尚有一定维持能力,河道径流渗漏缓慢;随着地下水位持续下降,河道径流迅速渗漏。

3.3 分区域生态需水类型

3.3.1 内陆河干旱区生态需水 内陆河干旱区降雨—径流发生区域与径流运动区域分离,发生在山区的降雨—径流关系很稳定。平原地区降水量不足以维持植被生态,形成由径流支撑的非地带性植被生态。出山口以下无论是地表水还是地下水都来自于上游山区,河道径流与地下水转化关系的变化不影响降雨—径流关系,但是对沿河的植被生态作用巨大。河道径流量下渗形成的潜流场是绿洲植被生态的生命之源,这是内陆河流域生态需水的前提条件。因此,河道径流量必须首先满足绿洲生存,水体的水生态系统用水服从于绿洲植被用水需求。事实上,由于庞大的人口压力,在现实情况下,我国西北地区内陆河大部分河流水生态系统基本上已放弃。

3.3.2 半湿润半干旱区生态需水 半湿润半干旱区河流地表水、地下水转化关系总体模式:上游山区,地下水补给河道为主;山前平原,地表地下水交互,地下水补给地表水为主;下游平原,地表地下水交互,以地表水补给地下水为主,自然状态下,枯水期地下水对河道调节补给。在过度开发利用水资源条件下,地表水地下水转化关系总体模式转变为:上游山区,地下水补给河道为主;山前平原,地表地下水交互;下游平原,地表水补给地下水,枯水期河道径流加速渗漏,河流“准内陆河化”。

分析海河、黄河、淮海、辽河等流域现状地表、水地下水转化关系。发现除淮河下游还保持地下水调节作用,海河、辽河下游地下水超采,已完全失去河岸调节功能。黄河下游为地上河,为地表水渗漏区。以海河流域为例,下游平原全面失去地下水河岸调节补给功能,这是海河流域平原河道普遍干涸的重要原因。

表1 区域生态需水类型分析

区域类型	降水条件	水循环特点	生态效应	生态需水类型	生态需水表达方式
内陆河干旱区	$P < 200 \sim 300\text{mm}$	山区产流、平原耗散;蒸发强烈	$P < E_t$, 非地带性植被;平原陆地植被生态与水体生态用水同源,前者优先后者。	沿河湖以绿洲为核心的植被生态系统需水,包括其水源;部分河湖水量。	类似于灌溉,以生态面积、需水定额、水量(体积)表达。
干湿润半干旱区(黄河、海河、淮河、辽河)	$300\text{mm} < P < 600 \sim 800\text{mm}$	蒸发量大;径流系数小于 0.3;地表-地下水转化频繁	$P > E_t$, 地带性植被; $P \sim R$ 关系不稳定,径流系数下降;地表水地下水转化关系逆转,河道干涸、断流。	河湖与地下水连通系统的整体生态用水问题,包括河道生态流量、相应地下水位。河道生态流量是生态用水标志性特征。	河道生态流量及其相应水位和流速、相应地下水位(埋深),湖泊生态水位,供需平衡时换算成水量。
北方湿润地区(松花江)	$400\text{mm} < P < 900\text{mm}$	蒸发较弱;径流系数大于 0.4	$P > E_t$, 地带性植被;枯水年大范围出现低于径流,地下水补给能力充分;湿地生态消退效应。	维持地表水体水生态系统的生态流量(水位),主要考虑生物和经济需求。湿地生态。	河道生态流量,湖泊、沼泽生态需水。
南方湿润地区(长江以南)	$P > 800\text{mm}$	径流系数大于 0.5	$P \gg E_t$, 地带性植被;枯水期水体生态系统服务功能受限制。	维持河流生态服务功能最大化的流量。	河道生态流量及其相应水位。

半湿润半干旱区生态效应分析表明,此类地区由水资源开发利用引发的生态用水问题非常复杂,存在于水循环各个环节。其核心问题是需要从地表水地下水转化关系入手,完整描述河川径流运动,系统地确定生态需水问题,包括河道生态流量、相应地下水位,成为统一考虑的整体^[4,5]。

3.3.3 湿润地区生态需水 南方湿润区域河网密布,河川径流量丰沛,受土地资源限制,灌溉用水量有限,水资源开发利用对河道径流的影响有限,从水量角度也不足以威胁到水生生物生存与繁衍。即使枯水期河流径流不足,从生物学角度看,对水生生物的生存与繁衍影响不大,只对供水水质、航运等影响明显。因此,南方湿润地区江河生态流量应该从水生态系统服务功能出发,系统考虑河流生态服务功能最大化需求。这和半湿润半干旱区的生态流量内涵显然不同,前者需要研究生态系统自身生存等问题。

4 结论

(1)水循环过程的生态效应分析表明,人类活动对水循环的干扰引起的生态退化效应,在时空尺度上,总是由微观→中观→宏观的渐进过程;在机理联系上,则是各类水资源开发利用等人工作用力的能量积累传递,并且是与水循环的驱动能量相互作用的过程;(2)水循环生态效应分析为区域生态需水研究提供了机理途径。由机理分析得出区域生态需水问题的判定准则,从而可准确界定区域生态需水类型,为建立不同区域生态需水理论和开发相应的关键技术奠定了理论基础;(3)通过对水文循环的深入研究,为生态需水乃至其他区域水问题的系统分析奠定基础。按水循环的生态效应,保持水循环的稳定是生态安全的前提条件。水循环生态效应机理分析表明,保护河流湖泊等地表水体的稳定对区域生态平衡极其重要,因此,河流湖泊的生态需水是流域生态保护的切入点;(4)建立在质量守恒定律和能量守恒与转化定律基础之上的水循环及其驱动能量转化规律的系统研究,引导出一系列创新思路,系统地进行有关这方面的理论研究,具有很大发展前景。

参 考 文 献:

- [1] 王浩,陈敏建,秦大庸.西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [2] FAO. *New Dimensions in Water Security—Water, Society and Ecosystem Services in the 21st Century*; Land and Water Development Division[C]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2000.
- [3] Stanford J A, et al. A general protocol for restoration of regulated rivers[J]. *Research and Management*,1996,(12):391—413.
- [4] 倪晋仁,崔树彬,等.论河流生态环境需水[J].*水利学报*,2002,(9):14—19.
- [5] 陈敏建.流域生态需水研究进展[J].*中国水利*,2004,(20):25—26.

Ecological effect of water cycling and classification of regional ecological water demand

CHEN Min-jian

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The mechanism of ecological effect of water cycling is investigated based on the analysis on the law of energy transfer in the process of hydrological cycling. The criteria for judging the relationship between evolution of ecological system and water cycling is suggested to classify the types of ecological water demand. The distribution of precipitation determines the basic configuration of ecological water demand in arid inland river region and external basin, and the stability of relationship between rainfall and runoff determines the differences of regional ecological water demand among semi-arid, semi-humid and humid region. The water ecosystem depending on surface water changes with the water amount, and its critical point is determined by the rich degree of runoff. The regional ecological water demand in China is classified into three types: water demand of arid area in inland river region, integrated water demand of semi-arid and semi-humid area which connecting with groundwater and water demand in humid region.

Key words: water cycling; driving energy; ecological effect; classification; type of ecological water demand

(责任编辑:王冰伟)