

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.001

自然和社会水循环的能量驱动机制及其综合评价

王庆明,赵 勇,王 浩,姜 珊,朱永楠,何国华,马梦阳

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为揭示流域自然水循环和社会水循环演变动力机制,基于自然水循环和社会水循环能耗过程解析,研究了能量输入与水循环通量的定量关系。在剖析能量驱动水循环的物理基础、科学内涵和驱动过程的基础上,提出了自然水循环驱动能量和社会水循环驱动能量的评价方法,并在包括海河流域在内的 10 个全国一级流域应用。结果表明:相变和位移是水循环运动的本质,不同能量对水循环驱动方式具有一致性,单位面积社会水循环与自然水循环的驱动能量比能够反映人类对流域水循环的干扰程度;2020 年 10 个一级流域中海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比最高(0.19),西南诸河流域最低(0.02),1980—2020 年海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比平均为 0.21;人工能量过度输入导致水循环加速是引发社会水系统失衡的主要原因,调控社会水循环输入能量是维系健康水循环的关键。

关键词:水循环;能量驱动;自然能量;人工能量;海河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0001-07

Energy driving mechanism of natural and social hydrology cycle and its comprehensive evaluation//WANG Qingming, ZHAO Yong, WANG Hao, JIANG Shan, ZHU Yongnan, HE Guohua, MA Mengyang(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: In order to reveal the dynamic mechanism of the evolution of natural and social hydrology cycle, the quantitative relationship between energy input and hydrology circulation flux was studied based on the analysis of energy consumption process of natural and social hydrology cycle. On the basis of analyzing the physical foundation, scientific connotation and driving process of energy-driven hydrology cycle, an evaluation method for natural hydrology cycle driving energy and social hydrology cycle driving energy was proposed, and applied in 10 first-level basins nationwide in China, including the Haihe River Basin. The research results indicate that phase change and displacement are the essence of hydrology cycle movement, and different energies have consistency in the driving mode of water cycle. The driving energy ratio of social hydrology cycle to natural hydrology cycle can reflect the degree of human interference to the hydrology cycle in the watershed. The average driving energy ratio of social hydrology cycle to natural hydrology cycle in the Haihe River Basin from 1980 to 2020 was 0.21. In 2020, the driving energy ratio of social hydrology cycle to natural hydrology cycle in the Haihe River Basin was the highest at 0.19, while the ratio of southwest river basin was the lowest at 0.02. Excessive input of artificial energy accelerates the hydrology cycle, which is the main reason for the imbalance of social water system, and regulating the input energy of social hydrology cycle is the key to maintain a healthy hydrology cycle.

Key words: hydrology cycle; energy drive; natural energy; artificial energy; the Haihe River Basin

水量平衡和能量守恒是地表水循环遵循的两大基本规律^[1-2]。能量是驱动水循环的根本动力,到达地表的太阳辐射能量伴随水循环过程的吸收、转化和传输,调节全球热量平衡^[3],据统计,2000—

2010 年全球地表平均接受的太阳辐射为 $(340.2 \pm 0.1) \text{ W/m}^2$,其中有 $(88 \pm 10) \text{ W/m}^2$ 的地表剩余能量转化为潜热通量,以蒸发形式耗散^[4]。蒸发是地表能量守恒和水量平衡的纽带,同时也是水循环的

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200204);国家自然科学基金项目(52025093)

作者简介:王庆明(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水循环演变解析研究。E-mail:wangqm@iwhr.com

通信作者:赵勇(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhaoyong@iwhr.com

关键环节。研究表明,1987—2016 年全球每 10 a 蒸发潜热增加 1 W/m^2 , 导致降水量每 10a 增加 $(13.2 \pm 4.8) \text{ mm}^{[5]}$ 。Ohmura 等^[6]将蒸发量大小作为表征水循环速率的指标,被学界所接受,但蒸发是水循环速率变化的表现,无法解释水循环驱动问题。蒸发由地表接收的辐射能量和供给水量所决定^[7],故存在能量驱动蒸发、蒸发表征水循环强度的影响链条,但如何定量表达能量输入及其影响是当前研究的薄弱环节^[8],缺乏深入的探讨。

伴随人类社会对水循环系统干扰程度的增加,衍生出自然-社会二元水循环结构^[9]。与二元水循环过程对应的是输入能量的二元化,一方面自然水循环依靠太阳能、重力势能等自然能量驱动,另一方面社会水循环始于人类对化石能源、电能等人工能量的利用^[10],水可以摆脱重力束缚从自然界进入人类社会,被人类利用消耗,从而改变了地表水循环过程。人工能量对水循环的影响表现在两方面:一是延长了水循环路径,在自然水循环(降水、蒸发、径流)基础上,延伸出社会水循环路径,即供水、用水、耗水、排水等过程^[11];二是增加了水循环速率,如利用人工能量开采地下水,加快地下水体的更新速率,或对水体加热,增加蒸发速率等。可见人工能量的输入是影响二元水循环强度的主要原因^[12],也是衡量二元水循环强度变化的关键指标。相较于地表自然能量输入,人工能量具有输入强度高、空间不均匀等特点,对水循环过程的影响更集中。基于此,本文拟探讨水循环演变能量驱动机制的内涵和评价方法,以海河流域为典型区,分析 20 世纪 80 年代以来水循环过程中自然能量和人工能量驱动规律,并推广到 10 个全国一级流域(长江流域、黄河流域、淮河流域、海河流域、松花江流域、辽河流域、西北诸河流域、西南诸河流域、珠江流域、东南诸河流域),以期揭示流域水循环演变动力机制和破解流域水循环失衡问题提供参考。

1 水循环的能量驱动机制

1.1 能量驱动水循环的物理基础

无论是自然能量还是人工能量,对水循环的驱动方式是统一的。自然水循环包括蒸发、入渗、产汇流等过程,社会水循环包括引水、用水、耗水、排水等过程^[13],但从物理运动视角,水只发生了两种变化,一种是相变(液态转化为气态,如蒸发),另一种是位移(由高处向低处流动,如径流)。人类活动对水循环的影响是通过额外输入人工能量,将水从自然界引入社会中实现反向位移和加速相变的过程。反向位移指在人工能量作用下,水克服重力实现从低

处向高处流动,进入经济社会并流转,如取水过程。加速相变指水在经济社会中流转,一方面在人工能量的影响下加速蒸发^[14],如水体加热蒸发等;另一方面延长循环位移路径,导致比自然界更多的蒸发量。不同能量对水循环驱动方式是统一的,无论在自然水循环还是社会水循环中,相变和位移消耗能量是等价的,这也是自然能量和人工能量可以叠加分析的物理基础。

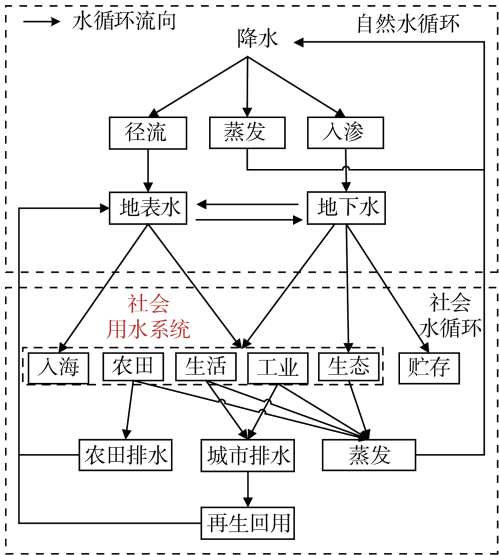
1.2 能量驱动水循环的科学内涵

传统水文学以研究水量过程为主,大部分水文学方法都以更精确地获取水量信息为目标,而社会水循环是一项人-水深度耦合互馈的过程,人类活动是社会水循环的内在动力^[15-16]。自然水循环和社会水循环中水的运动都以能量驱动,在自然能量和人工能量共同作用下,形成了二元水循环模式^[17]。首先,能量是人-水交互作用的中间媒介。在社会水循环中,人类通过能量影响水循环过程,利用各种能量将自然界的水引入经济社会,在各个生产部门中不断输入能量发挥水的各项功能,故经济社会取水过程本质上是“以能源换水源”。其次,能量反映水循环驱动力大小。自然水循环受自然能量驱动,社会水循环受自然能量和人工能量共同作用驱动,能量为评价自然-社会二元水循环驱动力提供了统一的评价指标。水循环演变背后的原因在于输入系统的能量变化,尤其是近几十年人工能量的大量集中输入,导致水循环过程发生变异,评价输入水循环系统能量的大小对揭示水循环过程变异原因具有重要意义。最后,能量为解耦二元水循环系统提供新视角。根据水循环路径的不同划分出二元水循环,以往研究更多集中在定量评价社会水循环对自然水循环及其伴生过程的影响,在解耦自然和社会水循环驱动过程、揭示人类活动对水循环过程的作用机理等研究还不充分。从能量转化的角度,以自然能量和人工能量的输入为分析对象,解耦二元水循环中能量和水量的驱动-响应关系,为解析二元水循环形成机理提供了新的视角。

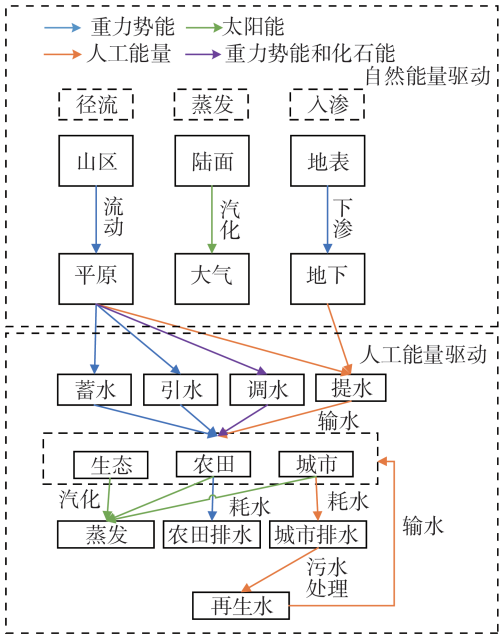
1.3 能量驱动水循环的过程

受人类活动的影响,水循环的耗能过程更加复杂,能量的来源增多、消耗的路径延长且不同能量交织在一起。如图 1 所示,在自然水循环中,蒸发过程消耗太阳能,产汇流过程由重力势能转化而来。在社会水循环中,一方面取水过程消耗能量,地表水或地下水通过渠道引水、泵站提水等方式,将自然界中势能低的水引入势能高的社会系统中,主要消耗化石能等人工能量;另一方面进入社会系统的水,通过加热等方式满足人类生活和生产功能,在过程中额

外消耗了能量、加速了蒸发。除此之外,水被人类从自然水循环引入社会水循环后,除部分排水外,其余均以蒸发形式消耗,不可避免地消耗太阳能,由于这部分消耗的太阳能发生在社会水循环过程中,且只有人类将水引入社会水循环后才会发生,故将其计入社会水循环驱动能量。



(a) 水量流动



(b) 能量流动

图1 自然水循环和社会水循环中的能量驱动过程
Fig.1 Energy driven process in nature hydrology cycle and social hydrology cycle

2 自然水循环和社会水循环驱动能量计算方法

2.1 自然水循环驱动能量

自然水循环驱动能量包括自然水循环过程中水量蒸发消耗的太阳能和径流过程转化的重力势能,

计算公式为

$$E_n = E_{ns} + E_{ng} \quad (1)$$

式中: E_n 为自然水循环驱动能量; E_{ns} 为自然条件下蒸发消耗的太阳能; E_{ng} 为径流过程中重力势能转化为动能。

蒸发是在太阳能作用下水分子从液态转化气态溢出水面的过程,实际蒸发过程中除汽化所需能量外,植被蒸腾的叶面阻抗、土壤蒸发克服的土壤吸力都需要消耗能量,但这部分能量较小,可忽略不计^[18],因此,蒸发消耗的太阳能计算公式为

$$E_{ns} = L \times ET_n \quad (2)$$

其中

$$L = (2500 - 2.4t) \times 10^3$$

式中: ET_n 为自然水循环下蒸发量; t 为气温; L 为汽化潜热系数,研究中自然条件下汽化潜热系数按标准大气压(101.325 kPa)、年均气温条件下的计算结果,如年均气温为 20℃ 的情况下, $L = 2452 \text{ kJ/kg}$ 。

采用流域水量平衡法计算 ET_n 。在无人类活动的闭合流域内,降水是流域的水量来源,自然条件下降水形成径流除了一部分入海,其余全部在流域内蒸发消耗;当有人类活动后,径流被引入社会水循环中消耗,入海水量减少,流域内蒸发增加,如图 2 所示。因此,对自然条件下的入海水量进行还原,计算公式为

$$ET_n = P - Q_s - ET_s \quad (3)$$

式中 P 、 Q_s 、 ET_s 分别为人类活动影响下的流域降水量、入海水量和社会水循环蒸发量。

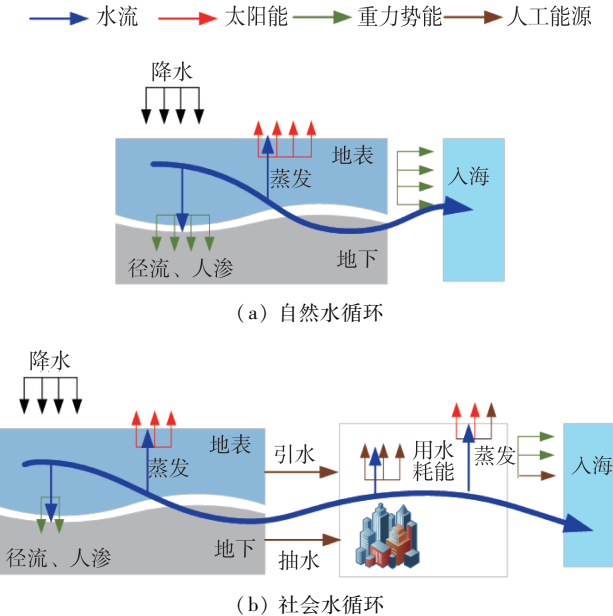


图2 自然水循环和社会水循环路径

Fig.2 Natural and social hydrology cycle paths

在自然状态下,径流由高处向低处流动,其动能来源于重力势能的转化,与径流起止的高程差有关,径流实际运动路径难以确定,为便于计算,概化为径

流高程差为流域形心点到流域出口的高程差,其转化的重力势能计算公式为

$$E_{ng} = R_r g h_r \quad (4)$$

式中: R_r 为流域年径流; h_r 为流域形心点高程与流域出口高程之差; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

2.2 社会水循环驱动能量

社会水循环驱动能量包括人类取水过程中反向位移的能耗、在社会水循环过程中加速蒸发的能耗以及在社会水循环蒸发耗水过程中不可避免消耗的太阳能,计算公式为

$$E_s = E_{sh} + E_{st} + E_{ss} \quad (5)$$

式中: E_s 为社会水循环驱动能量; E_{sh} 为取水过程能耗; E_{st} 为加热能耗; E_{ss} 为进入社会生产、生活的水蒸发消耗太阳能。

取水过程将水从低处引入高处,克服重力做功能耗,计算公式为

$$E_{sh} = \frac{mgh}{3.6 \times 10^6 \eta} \quad (6)$$

式中: m 为取水量; h 为提水高度; η 为泵站效率,本文取 75%。

用水过程中一部分水通过加热增大了蒸发速率,如家庭生活用水加热通常从 20°C 加热到 100°C ,热量转化系数按 95% 计,水加热能耗为 $97.78 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$;工业蒸汽用水加热可将水从 20°C 加热到 374°C ^[19],热量转化系数按 75% 计,水的加热能耗为 $598.89 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。计算公式为

$$E_{st} = \mu V \rho c (T_i - T_f) \quad (7)$$

式中: V 为加热水体积; ρ 为水的密度; c 为水的比热容,为 $4200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; μ 为热量转化系数; T_i 为加热水体最终温度; T_f 为加热水体初始温度。

社会水循环蒸发能耗指的是在人类通过取水过程,将自然水循环中的水引入社会水循环,在社会水循环的用水过程中蒸发消耗需要的太阳能,因为这部分水是在社会水循环系统中消耗掉的,故计入社会水循环驱动能量,计算公式为

$$E_{ss} = L \times ET_s \quad (8)$$

式中 ET_s 为社会水循环蒸发量,来源于《中国水资源公报》统计的分行业耗水数据。

污水依靠自流或者排水泵站收集送至污水处理厂,进入处理厂的污水处理过程中消耗电能。其中污水收集能耗较小,可忽略不计^[14]。《城镇排水统计年鉴》^[20]中统计了全国各污水处理厂及再生水厂的生产运营情况,包括污水处理量、出水标准、年累计用电量、再生水产量等,将统计用电能耗数据计入社会水循环驱动能量。

2.3 社会水循环与自然水循环驱动能量比

为更好地反映人工能量输入对流域水循环过程的影响,提出单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比 I_b 的概念。自然水循环驱动能量反映流域自然条件下对水循环驱动强度的大小,与流域的位置、气候等地理因素相关;社会水循环驱动能量反映流域内人类驱动水循环强度的大小。 I_b 越高说明人类活动对水循环的影响程度越大。

2.4 数据来源

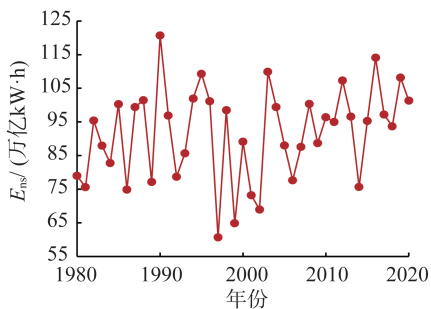
本文涉及的数据包括:①年降水量,数据来自全国基本气象站;②地表、地下水取水量、入海水量,数据来自《中国水资源公报》;③地表水取水高程,数据通过河道水位估算,由于各个流域取水点数据众多,且无分布规律,本文在计算时选择流域内一级河流非汛期水位和流域平原区平均地表高程之差作为地表水取水高程;④地下水抽水高程,数据通过地下水埋深估算,通过收集全国除港澳台外的 31 个省(自治区、直辖市)水资源公报,根据公报提供的平原区平均地下水位和平原区地表高程之差作为地下水抽水高程,将各省(自治区、直辖市)的抽水高程汇总到全国一级流域;⑤社会各行业耗水量,数据来自《中国水资源公报》;社会水循环加热蒸发量,数据通过北京、天津、石家庄等问卷调查分析得出^[21-22],获取加热用水占生活和工业总用水量的比例,并扩展到海河流域和其他一级流域。

3 案例应用

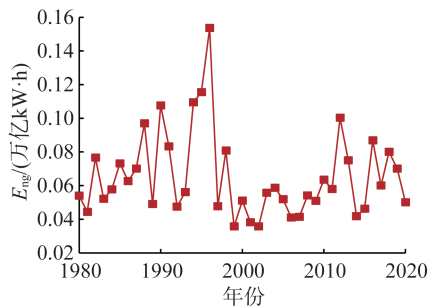
3.1 海河流域二元水循环驱动能量变化

3.1.1 海河流域自然水循环驱动能量

图 3 为 1980—2020 年海河流域自然水循环驱动能量。由图 3(a)可见,1980—2020 年海河流域自然水循环平均蒸发能耗为 91 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,略微呈现增加趋势,增加速率为 0.2 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$ 。由图 3(b)可见,1980—2020 年重力势能转化能耗平均为 0.065 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,1996 年以前呈现增加趋势,1996 年之后重力势能转化消耗降低,主要原因是流域径流量衰减。与自然水循环蒸发能耗相比,重力转化能耗仅占蒸发能耗的 0.07%,几乎可以忽略不计,故太阳能引起的蒸发能耗是驱动流域自然水循环的最主要因素。总体来说,自然条件下海河流域水循环输入能量相对稳定,不同年份受降水波动变化能量输入有所不同,但长期来看从并没有显著的趋势性的改变。



(a) 蒸发能耗

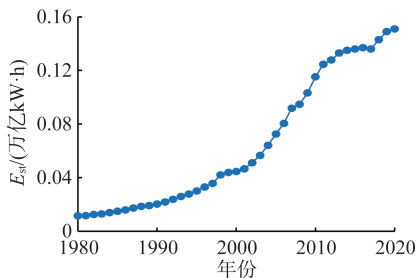


(b) 重力转化能耗

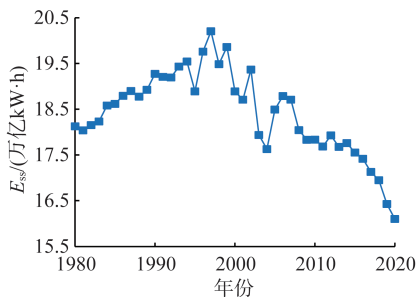
图3 1980—2020年海河流域自然水循环驱动能量
Fig.3 Driving energy of natural hydrology cycle in the Haihe River Basin from 1980 to 2020

3.1.2 海河流域社会水循环驱动能量

图4为1980—2020年海河流域社会水循环驱动能量。由图4(a)可见,社会水循环中人工驱动能量持续增加,从1980年的0.01 万亿 kW·h 增长到2020年的0.15 万亿 kW·h,在1997年以后人工能量增长加速,主要原因是海河流域社会经济快速增长,对水资源的需求更加旺盛,取水和用水的能耗随



(a) 加热能耗



(b) 蒸发能耗

图4 1980—2020年海河流域社会水循环驱动能量
Fig.4 Driving energy of social hydrology cycle in the Haihe River Basin from 1980 to 2020

之增加。由图4(b)可见,人工能量的不断增加导致社会水循环过程更加不稳定,社会水循环蒸发消耗的能量与人工能量的输入变化过程并不一致,在1997年以前,少量的人工能量输入增加便可导致社会水循环蒸发能耗大幅增长,说明这一时期社会经济发展的取用水能耗成本极低;1997年之后,人工能量输入增幅增大,但社会水循环蒸发能耗持续降低,说明社会经济发展的取用水能耗成本亟增。1980年海河流域社会水循环中每单位人工能量输入可带来1 648 倍的自然能量在社会系统中消耗(社会水循环蒸发能耗),到2020年这一数值仅为131。这也说明人工能量的输入已经打破了海河流域社会水循环原有的水-能平衡关系,外在的表现为流域超负荷水资源开发利用导致地表水干涸、地下水位下降、跨流域调水、再生水利用等,这些环节都大幅增加人工能量的消耗。

3.1.3 海河流域社会水循环与自然水循环驱动能量比

图5为1980—2020年海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比 I_b ,可见该比值平均为0.21,在1997年达到最高值0.33,2012年为最低值0.15。单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比能够综合反映人类活动对流域水循环过程的干扰程度,比值越大说明人类活动干扰越剧烈。1997—2000年比值相对较高,这与20世纪末海河流域遭遇特大干旱,流域水资源开发利用急剧增加的时间是一致的。随着社会水循环取用水能耗成本的亟增,反过来对社会系统用水起到一定的约束抑制作用,社会系统取用水量减少,社会水循环驱动能量随之减少,同时海河流域降水量有所增加,共同作用下使得2010年后该比值维持在一个相对稳定的区间,这也可能说明流域水-能关系正在到达一个新平衡阶段。

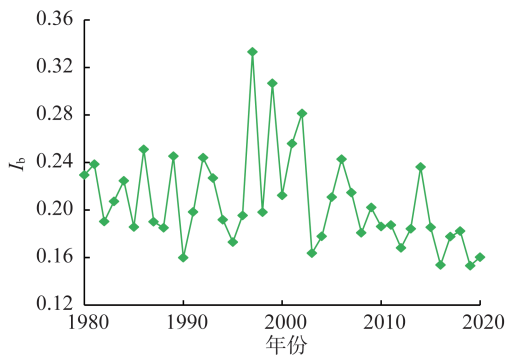


图5 1980—2020年海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比

Fig.5 Driving energy ratio of per area social and natural hydrology cycle in the Haihe River Basin from 1980 to 2020

3.2 全国一级流域自然水循环和社会水循环驱动能量变化

表1为2020年10个一级流域单位面积社会水循环和自然水循环驱动能量情况。由表1可见,东南诸河流域单位面积自然水循环驱动能量最高,为5.48亿kW·h/km²,其次为黄河流域,为4.40亿kW·h/km²,西南诸河最低,为1.30亿kW·h/km²。单位面积自然水循环驱动能量受流域气候条件影响,实际蒸发强度高的区域自然水循环驱动能量越大,西北诸河流域蒸发能力最大,但受水分限制,实际蒸发量较少,东南诸河流域水分充足,但蒸发能力弱,实际蒸发也小于黄淮海等流域。海河流域单位面积社会水循环驱动能量最高,为0.67亿kW·h/km²,其次为淮河流域,为0.65亿kW·h/km²,西南诸河流域最低,为0.03亿kW·h/km²。海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比最高,达到0.19,其次为淮河流域和辽河流域,为0.18,西南诸河流域最低,为0.02。全国平均单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比为0.12。

表1 全国一级流域自然水循环和社会水循环驱动能量对比

Table 1 Comparison of natural and social hydrology cycle energy consumption of first-level basins in China

一级流域	单位面积自然 水循环驱动能量/ (亿kW·h/km ²)	单位面积社会 水循环驱动能量/ (亿kW·h/km ²)	<i>I_b</i>
长江流域	2.63	0.18	0.07
黄河流域	4.40	0.55	0.13
淮河流域	3.60	0.65	0.18
海河流域	3.53	0.67	0.19
松花江流域	4.33	0.43	0.10
辽河流域	3.02	0.54	0.18
西北诸河流域	3.59	0.54	0.15
西南诸河流域	1.30	0.03	0.02
珠江流域	3.61	0.29	0.08
东南诸河流域	5.48	0.27	0.05

4 讨 论

4.1 人工能量过度输入导致水循环过程失衡

自然水循环条件下,水循环系统的能量输入和水循环速率保持相对稳定^[23],随着人类社会对能源的开发利用,人工能量集中过度输入,导致水循环速率急剧增加,破坏了流域水循环的正常更新交换过程,是导致流域水资源短缺、水生态恶化、水循环变异的主要原因之一。在人工能量作用下,水循环路径变长,蒸发加速,水循环速率显著加快,如前文分析,社会水循环中的能量输入会形成“杠杆效应”,每单位人工能量输入可带来几百甚至上千倍的社会水循环蒸发耗能,极大地加速流域水循环速率。人

类开采地下水,使得原来几十年甚至上百年才会更新的地下水在短时间内参与到水循环过程中^[24],同样,河道中的水引入到社会系统中,在社会系统内很快地蒸发耗散掉,而在自然条件下这些水应该是流入海洋。

在10个一级流域的自然水循环和社会水循环驱动能量对比中,凡是人工能量输入强度大的流域,其水资源、水生态问题往往更加突出。以海河流域为例,地下水位下降、河道干涸表象背后的机理在于人工能量把自然系统的水引入社会系统,以蒸发的形式耗散,导致自然条件下的水循环失衡。水循环系统有一定的韧性,在轻微失衡时,水循环系统能够自我修复,但当系统承受的能量继续累积,水资源短缺、水生态恶化问题集中凸显,说明当前水循环失衡程度已经超出流域水循环的韧性。

社会水循环与自然水循环驱动能量比的相关研究还处于起步阶段,目前研究结果表明社会水循环驱动能量过高是引发流域水循环失衡的重要原因之一。从10个一级流域同期横向对比来看,社会水循环与自然水循环驱动能量比值小于0.1时,流域的水循环变异问题相对不突出,比值超过0.15时,流域水循环问题开始凸显。但由于研究样本较少,不同的流域对社会水循环驱动能量的承载能力也有差异,还需要更多的样本分析、更深入的理论探讨,才能得到关于阈值更准确的结论。

4.2 社会水循环调控是维系健康水循环的关键

社会水循环以取水耗能开始,每个环节都离不开能量的输入。1956—2016年,中国的化石能源消费由3亿t标准煤增长到48.6亿t标准煤^[25],其中2016年输入到水循环过程中的能源消费约1.1亿t标准煤,占总消费量的2.44%^[26-27]。随着经济社会对水资源的需求越来越大,低能耗成本开发的水源越来越少,例如河北平原因地下水位下降导致每年灌溉多耗能24亿kW·h^[28],南水北调通水后,置换了部分地下水开采,河北省每年可减少能源消耗5.91亿kW·h^[29]。以能量换取水量的发展模式不仅是对能源产品的消耗,更重要的是打破了流域的能量平衡状态,在达到新的平衡前也是流域水问题最突出的阶段。海河流域在1997年以后,人工能量输入越来越多,但获取的水资源边际效益越来越少,经济社会用水矛盾突出,以能量换取水量的模式也越来越不可持续。减少社会水循环驱动能量的关键在于降低人工能量的取用水过程,尤其是在水资源禀赋较差的区域,在需求侧应控制城市发展规模、调整产业用水结构、减少高耗水行业,以降低城市发展用水需求;在供给侧应减

少地下水开采、控制地表水开发利用率,以减少社会水循环的能耗成本。

5 结 论

a. 水循环的物理本质是水分的相变和位移,相对自然水循环,人工能量驱动的社会水循环是加速相变和反向位移过程,自然和社会水循环的能量驱动过程是内在统一的。

b. 1980—2020 年海河流域平均自然水循环驱动能量为 91 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,自然水循环蒸发能耗占主要部分,重力转化能耗仅占蒸发能耗的 0.07%,自然水循环驱动能量主要受降水波动影响。社会水循环驱动能量中人工加热水量能量消耗从 1980 年的 0.01 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 增长到 2020 年的 0.15 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,人工能量输入导致社会水循环蒸发能耗先增加后减少,主要原因是社会系统取用水能耗成本增加。

c. 1980—2020 海河流域年单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比平均为 0.21。2020 年 10 个一级流域中,海河流域单位面积社会水循环与自然水循环驱动能量比最高,为 0.19,其次为淮河流域和辽河流域,为 0.18,全国平均值为 0.12。

d. 人工能量输入导致水循环加速,破坏了流域自然更新平衡,是引发社会水系统失衡、水资源衰减和水生态恶化的主要原因,调控社会水循环是维系流域健康水系统的关键。

参考文献:

[1] OK I, TAIKA N, KANA E, et al. Global hydrological cycles and world water resources. [J]. Science, 2006, 313(5790):1068-1072.

[2] MEYERS J, SEVENER M. Hydrologic cycle energy flux and the water-energy nexus [J]. Physical Review, 2009 (15):2046-2050.

[3] MOUSTAFA T, CHAHIN E. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. Nature, 1992, 359 (6394): 373-380.

[4] STEPHENS G L, LI J, WILD M, et al. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations [J]. Nature Geoscience, 2012, 5 (10): 691-696.

[5] WENTZ F J, RICCIARDULLI L, KYLE HILBURN C M. How much more rain will global warming bring? [J]. Science, 2007, 317 (5835):233-235.

[6] OHMURA A, WILD M. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. Science, 2002, 298(5597):1345-1346.

[7] BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396 (6706):30.

[8] 严登华,王浩,周梦,等. 全球治水模式思辨与发展展望 [J]. 水资源保护, 2020, 36(3):1-7. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHOU Meng, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3):1-7. (in Chinese))

[9] 褚俊英,王浩,周祖昊,等. 流域综合治理方案制定的基本理论及技术框架 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1):18-24. (CHU Junying, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Basic theory and technical framework for formulation of integrated watershed management plan [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):18-24. (in Chinese))

[10] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法 [J]. 水利学报, 2016, 47(10):1219-1226. (WANG Hao, JIANG Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10):1219-1226. (in Chinese))

[11] 王浩,贾仰文,杨贵羽,等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟 [J]. 科学通报, 2013(12):1064-1077. (WANG Hao, JIA Yangwen, YANG Guiyu, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2013 (12): 1064-1077. (in Chinese))

[12] 王建华,王浩,秦大庸. 海河流域二元水循环模式与水资源演变机理 [M]. 北京:科学出版社, 2015.

[13] 秦大庸. 海河流域二元水循环研究进展 [M]. 北京:科学出版社, 2011.

[14] 朱永霞. 社会水循环全过程能耗评价方法研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.

[15] MONTANARI A. Debates-perspectives on socio-hydrology: introduction [J]. Water Resources Research, 2015, 51(6):4768-4769.

[16] RATNA R V, SYME G J. Social sciences and hydrology: an introduction [J]. Journal of Hydrology, 2014, 518: 1-14.

[17] 秦大庸,陆垂裕,刘家宏,等. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架 [J]. 科学通报, 2014(4):419-427. (QIN Dayong, LU Chuiyu, LIU Jiahong, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle [J]. Chinese Science Bulletin, 2014 (4): 419-427. (in Chinese))

[18] 李爱贞,刘厚凤. 气象学与气候学基础. [M]. 2 版. 北京:气象出版社, 2004.

[19] 李精精. 超临界水自然循环流动及换热特性研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2015.

[20] 中国城镇供水排水协会. 《城镇供水统计年鉴》[M]. 北京:中国城镇供水排水协会出版社, 2016.

(下转第 15 页)

- Protection, 2023, 39(3):188-194. (in Chinese))
- [25] 马景,武周虎,邹艳均,等. 基于灰色马尔科夫模型的南四湖水质预测[J]. 水资源保护, 2021, 37(5):153-158. (MA Jing, WU Zhouhu, ZOU Yanjun, et al. Water quality prediction of Nansi Lake based on grey Markov model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):153-158. (in Chinese))
- [26] 李浩飞,常伟纲,楚宪亮. 新信息优先的灰色模型在沉降预测中的应用[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(6):97-99. (LI Haoifei, CHANG Weigang, CHU Xianliang. Application of gray model with new information priority in settlement prediction [J]. Journal of Geomatics, 2020, 45(6):97-99. (in Chinese))
- [27] 张朝飞,罗建军,徐兵华,等. 基于灰色理论的新陈代谢自适应多参数预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(8):970-976. (ZHANG Zhaoifei, LUO Jianjun, XU Binghua, et al. Metabolism adaptive multi-parameter prediction method based on grey theory [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(8):970-976. (in Chinese))
- [28] 郝导华,马晓丽,张美. 小清河入海口现状及管理探索[J]. 山东水利, 2015(2):22-23. (HAO Daohua, MA Xiaoli, ZHANG Mei. The current situation and management exploration of Xiaoqing River estuary [J]. Shandong Water Resources, 2015(2):22-23. (in Chinese))
- [29] 邵利民,傅刚,曹祥村,等. BP 神经网络在台风路径预报中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6):104-111. (SHAO Limin, FU Gang, CHAO Xiangcun, et al. Application of BP neural network to forecasting typhoon tracks [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6):104-111. (in Chinese))
- [30] 冯快乐,周建中,江焱生,等. 基于 BP 神经网络的湖北省山洪灾害危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1):148-154. (FENG Kuaile, ZHOU Jianzhong, JIANG Yansheng, et al. Assessment on the hazard of flash flood disaster in Hubei Province based on BP neural network [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1):148-154. (in Chinese))
- [31] 纪芳,侯一筠. 改进 BP 算法在风暴潮极值水位预报中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(5):120-123. (JI Fang, HOU Yijun. Application of improved BP neural network method in storm surges forecast [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(5):120-123. (in Chinese))
- [32] 朱新国,张展羽,祝卓. 基于改进型 BP 神经网络马尔科夫模型的区域需水量预测[J]. 水资源保护, 2010, 26(2):28-31. (ZHU Xinguo, ZHANG Zhanyu, ZHU Zhuo. Prediction of water demand based on improved BP neural network and Markov model [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2):28-31. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-11 编辑:王芳)

(上接第7页)

- [21] 石红旺,赵勇,屈吉鸿,等. 天津市城市居民用水行为调查及影响因素识别[J]. 水电能源科学, 2015(6):143-147. (SHI Hongwang, ZHAO Yong, QU Jihong, et al. Behavior survey and influencing factors recognition of urban residential water in Tianjin City [J]. Water Resources and Power, 2015(6):143-147. (in Chinese))
- [22] 王海叶,赵勇,李海红,等. 缺水型特大城市家庭水能关系分析与改进措施[J]. 水电能源科学, 2016(11):44-48. (WANG Haiye, ZHAO Yong, LI Haihong, et al. , Analysis and improvement measures of water energy relationship of water shortage type super-urban families [J]. Water Resources and Power, 2016(11):44-48. (in Chinese))
- [23] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(1):61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):61-68. (in Chinese))
- [24] 张光辉,费宇红,王茜,等. 灌溉农业的地下水保障能力评价方法研究-黄淮海平原为例[J]. 水利学报, 2016, 47(5):608-615. (ZHANG Guanghui, FEI Hongyu, WANG Xi, et al. Evaluation methodology of groundwater safeguard capacity on agricultural irrigation in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5):608-615. (in Chinese))
- [25] 牛庆静. 中国化石能源消费、碳排放与经济增长关系研究[D]. 济南:山东大学, 2015.
- [26] 曾萌,张园园,王红瑞,等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):159-165. (ZENG Meng, ZHANG Yuanyuan, WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):159-165. (in Chinese))
- [27] 姜珊. 水-能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.
- [28] 王庆明,张越,赵勇,等. 河北省井灌区灌溉用水与耗能变化规律研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2018(4):154-159. (WANG Qingming, ZHANG Yue, ZHAO Yong, et al. Study on the change of irrigation water utilization and energy consumption in well irrigation areas of Hebei Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018(4):154-159. (in Chinese))
- [29] ZHAO Y, ZHU Y, LIN Z, et al. Energy reduction effect of the South-To-North Water Diversion Project in China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):15956.

(收稿日期:2022-10-17 编辑:王芳)