

中美用水结构转型比较与中国“世界工厂”的全球意义

黄津辉^{1,2}, 张鹏伟^{1,2}

(1. 南开大学环境科学与工程学院; 2. 南开大学中加水与环境安全联合研发中心)

摘要: 基于《中国水资源公报》、美国地质调查局发布的“美国用水评估序列”及世界银行可比价指标, 构建了 1985—2024 年中美用水可比序列, 提出了稳态水再平衡 (SWR) 框架, 分析了中国作为“世界工厂”背景下的用水演变与全球意义。结果表明: 中国工业用水占比由 1997 年的 20.2% 降至 2024 年的 16.4%, 工业用水量由 2011 年的峰值 1462 亿 m³ 减少至 2024 年的 971 亿 m³, 用水强度按可比价累计下降 60%~70%; 生活用水占比由 1997 年的 9.4% 升至 2024 年的 15.6%, 生态用水自 2003 年起单独统计, 2024 年占用水总量的 6.4%; 中美用水总量均已达峰且缓降, 但机制不同, 美国用水降幅中大部分属于水足迹核算意义上的责任转移, 其余来自火电冷却转型与灌溉效率提升等真实技术节水; 中国在制造业增加值全球占比升至约 28% 的同时实现了用水与经济增长的绝对脱钩, 其工业节水经虚拟水贸易外溢惠及全球消费端, 基于 SWR 框架可将这种转变界定为总量稳态约束下生产、生活、生态用水的同步结构演变。

关键词: 稳态水再平衡框架; 用水结构; 用水总量; 水资源生产力; 美国; 中国

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2026)05-0001-08

Comparison of water-use structural transitions between China and the United States and global implications of China as “world’s factory” // Huang Jinhui^{1,2}, Zhang Pengwei^{1,2} (1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University; 2. Sino-Canadian Joint R&D Centre for Water and Environmental Safety, Nankai University)

Abstract: Based on the *China Water Resources Bulletin*, “the United States water-use assessment series” released by the U.S. Geological Survey, and World Bank indicators at constant prices, this study constructs a comparable China- the United States water-use series covering 1985-2024, proposes a steady-state water rebalancing (SWR) framework, and analyzes the evolution of water-use in China in the context of its role as the “world’s factory” and the associated global implications. The results show that the share of industrial water-use in China declined from 20.2% in 1997 to 16.4% in 2024, while industrial water use decreased from a peak of 146.2 billion m³ in 2011 to 97.1 billion m³ in 2024, accompanied by a cumulative 60%-70% decline in water-use intensity at constant prices. The share of residential water use increased from 9.4% in 1997 to 15.6% in 2024. Ecological water replenishment, which has been recorded as a separate category since 2003, accounted for 6.4% of total water use in 2024. Total water use in both China and the United States has peaked and subsequently declined gradually, but the underlying mechanisms differ. A substantial share of the decline in the United States water-use represents a transfer of water-use responsibility from a water footprint accounting perspective, while the remainder reflects genuine technological water savings arising from changes in thermoelectric cooling systems and improvements in irrigation efficiency. By contrast, China achieved absolute decoupling of water use from economic growth while its share of global manufacturing value-added increased to approximately 28%. Water savings in China’s industrial sector have generated spillover benefits for consumers worldwide through virtual-water trade. Based on the SWR framework, this transition can be characterized as a simultaneous structural reallocation among production, residential, and ecological water uses under a relatively stable aggregate water-use constraint.

Key words: steady-state water rebalancing framework; water-use structure; total water use; water resources productivity; the United States; China

2000 年发布的《中国可持续发展水资源战略研究综合报告》警示, 在城镇化与工业化双重压力下中国用水矛盾将持续加剧^[1]。1997 年中国用水总

量已达 5 566 亿 m³, 农业、工业、生活用水占比分别为 70.4%、20.2%、9.4%^[2]。至 2022 年, 中国成长为承担全球制造业增加值约 28% 的“世界工厂”^[3],

用水总量却在 2013 年达到 6 183 亿 m³ 的峰值后进入平稳缓降阶段^[4], 2024 年用水总量为 5928 亿 m³。王国庆等^[5]的研究表明, 2015—2024 年中国工业与农业用水量显著减少, 生活与生态用水量持续增长。最大规模的制造业扩张与用水总量稳态并存, 构成有待解释的悖论式事实。

从国际研究看, 美国地质调查局自 1950 年起每 5 年发布的“美国用水评估序列”^[6-13]显示, 美国总取水于 20 世纪 80 年代达峰后波动下降, 火电冷却转型与灌溉效率提升被识别为重要驱动因素。世界银行可比价指标记录了主要经济体用水效率的普遍提升与新兴工业化国家的追赶效应^[14-15], 国内研究对各国节水经验亦有系统比较^[16-17]。国际研究的另一重要分支是虚拟水与消费侧水足迹核算, Hoekstra 等^[18]的水足迹框架研究、Feng 等^[19]的消费视角流域核算、Li 等^[20]的远程取水耦合研究均显示, 一国的用水演变无法再以国界为边界孤立解读。国内研究则围绕用水总量达峰^[4,21]、用水结构演变归因^[5]、节水型社会与用水效率^[22-23]、生态流量保障^[24-26]、“四水四定”与刚性约束^[27-30]以及贸易视角下的虚拟资源流动^[31]等主题展开, 积累了丰富的单国证据。既有研究仍存在 3 点不足: ①多为单国叙事, 缺乏将生产国与消费国置于同一框架下的镜像式长时段对比, 美国的“早达峰”与中国的“晚达峰”尚未作为一对结构性事实被联合解释; ②用水结构转型缺乏统一的诊断框架与可计算指标, 对结构优化的研究多停留在描述层面; ③生产国节水通过贸易产生的全球外溢贡献, 尚未进入 SDG (Sustainable Development Goal) 6.4 等国际监测体系。

针对上述不足, 本文提出稳态水再平衡 (steady-state water rebalancing, SWR) 框架, 基于美国作为全球最大消费经济体与中国形成天然的消费与生产“镜像关系”, 选择美国作为对照, 建立中美用水可比序列, 以 SWR 框架为基础, 从虚拟水视角论证生产国节水的全球外溢意义并提出国际监测建议。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文数据主要来自官方统计数据和国际数据库。中国数据来源于 1997—2024 年《中国水资源公报》, 包括用水总量及农业、工业、生活、生态用水分项数据 (生态用水自 2003 年起单独统计); 万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量采用基于《中国水资源公报》按可比价核算的官方统计数据^[2,32]; GDP 数据来自国家统计局。美国数据来源于美国地质调查局自 1950 年起每 5 年发布的“美国用水评

估序列”^[6-13]。国际可比数据来源于世界银行 WDI (World Development Indicators) 数据库中取水总量与水资源生产力指标序列 (以 2015 年不变价美元作为计价基准)^[14-15]及联合国工业发展组织制造业增加值数据库^[3]。美国地质调查局自 2020 年起采用基于模型的估算方法且存在部门覆盖不全的问题^[33], 故本文以 2015 年为可比节点。

1.2 比较维度与分析方法

为消除现价计价方式造成的用水强度降幅高估问题, 万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量两个指标统一依据不变价统计规范测算。本文将用水部门划分为 4 类: 农业、工业、生活、生态用水。为实现中美用水数据横向可比, 对美国地质调查局划分的 8 部门用水分类实施归并处理, 对应匹配关系为: 灌溉、畜牧、水产养殖用水整合为农业用水; 自供工业、火电、采矿用水整合为工业用水; 公共供水、自供生活用水整合为生活用水。美国火电行业直流冷却式取水规模占火电总取水量的 76%, 但其耗水量占比不足 1%^[13]。因此, 中美用水对比分析基于取水、耗水两个比较维度开展。

官方统计数据有统一的核算边界, 具有连续、稳定的特点, 与自建模型相比, 可规避参数设定带来的不确定性。因此, 本文主要利用官方统计数据, 同时引用 Feng 等^[19,34-36]研究中的对数平均迪氏指数 (logarithmic mean divisia index, LMDI) 分解结果与虚拟水流量数据, 采用时间序列对照、结构端点比较、核算体系校准 3 种分析方法开展比较。

1.3 SWR 框架定义

SWR 框架定义为: 在用水总量基本稳定的稳态约束下, 通过技术进步、制度引导及价值选择, 实现生产部门用水占比下降、民生用水占比合理增长、生态用水单独统计的同步结构演变。采用用水结构转型强度与零和式优化系数两个指标进行 SWR 框架量化分析, 计算公式为:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 |S_{1,i} - S_{0,i}| \quad (1)$$

$$Z = \frac{\min \{W_1, W_2\}}{\max \{W_1, W_2\}} \quad (2)$$

式中: S 为用水结构转型强度; $S_{1,i}$ 为考察期末第 i 个部门的用水量占比, i 为 1、2、3、4 分别代表农业、工业、生活、生态部门; $S_{0,i}$ 为考察期初第 i 个部门的用水量占比; W_1 为考察期内工业用水减少量; W_2 为考察期内生活用水、生态用水增加量之和; Z 为零和式优化系数, Z 趋近 1 表示部门间近似等量再分配, Z 趋近 0 表示用水总量单向扩张或收缩。

本文在进行 SWR 框架分析时, 以《中国水资源

公报》、美国地质调查局发布的“美国用水评估序列”及世界银行可比价指标 3 种官方统计数据的交叉互证替代模型敏感性检验;对引用文献中的 LMDI 分解结果采用区间表述^[34];基准年敏感性方面,分别以 1997 年、2011 年(工业用水峰值年)为基准年计算工业用水减少量,部门再配置方向一致,核心结论不随基准年选择而改变。

2 中美用水对比

2.1 用水总量比较

选择用水总量作为耗水维度比较指标。1985—2024 年中美用水总量演变呈“双达峰”、不同期的特征。“美国用水评估序列”数据^[12]显示,1985 年美国淡水取水量约为 4 684 亿 m³,2005 年回升至约 4 823 亿 m³,之后持续下降,2015 年降至约 3 883 亿 m³,较 1985 年累计下降约 17.1%。2013 年中国用水总量达 6 183 亿 m³ 的峰值^[4],此后进入缓降阶段,2024 年为 5 928 亿 m³,较峰值下降约 4.1%。美国的“早达峰”由 3 方面因素叠加驱动:①火电冷却技术转型,直流冷却电厂关停与循环冷却机组的替代使火电取水量在 2010—2015 年下降约 18%,贡献了同期美国总取水量降幅的近 90%,是 2005 年后总取水量下降的最大单项来源^[12-13];②农业灌溉效率提升,喷灌与微灌对漫灌的替代使灌溉取水量从 1980 年约 2 073 亿 m³ 的峰值降至 2015 年的约 1 630 亿 m³^[12];③去工业化,美国制造业 GDP 占比从 1953 年 28.1% 的峰值降至 2015 年的约 12%^[37],自供工业用水从 1970 年的约 649 亿 m³ 降至 2015 年的约 205 亿 m³,累计下降 68.4%^[12]。中国的“晚达峰”则发生在 2001 年加入世界贸易组织后制造业快速扩张的过程中,张建云等^[21]的分析显示,中国工业用水量于 2011 年达到历史峰值 1 462 亿 m³ 后持续下降,2021 年降至 1 050 亿 m³,2024 年进一步降至 971 亿 m³^[2];同期万元 GDP 用水量从 2000 年的 600 m³ 降至 2020 年的 57.2 m³,用水量与 GDP 增长呈明显脱钩态势。

为分析中美用水演变的结构差异,基于 1985—2015 年美国淡水取水量数据和 1997—2024 年中国用水总量数据,对中美用水总量进行部门贡献分解,结果如表 1 所示。其中,美国用水数据按地质调查局原始部门进行分解,牲畜、水产养殖、采矿与农村自供生活用水归入其他;美国地质调查局原始数据单位为 Bgal/d,本文按照 1 Bgal/d = 13.8168 亿 m³/a 将其转换为年取水量;中国用水数据中,1997—2002 年生态用水未单独统计,计为 0。由表 1 可见,1985—2015 年美国淡水取水量绝对收缩,火电、灌溉与自

供工业等主要部门同向下降;1997—2024 年中国用水总量仅增长 6.5%,部门之间呈此消彼长的再配置格局。因此,可将美国用水演变概括为“收缩型转型”,中国概括为“稳态型转型”(图 1),这一分析结果与 Feng 等^[19,34]的研究结果一致。

表 1 中美用水总量的部门贡献分解
Table 1 Departmental contribution decomposition of total water use in China and the United States

美国部门	美国部门用水		中国部门	中国部门用水	
	变化量/ 亿 m ³	贡献率/%		变化量/ 亿 m ³	贡献率/%
火电	-496.0	-10.6	农业	-271.6	-4.9
灌溉	-262.5	-5.6	工业	-150.0	-2.7
自供工业	-116.1	-2.5	生活	+401.8	+7.2
公共供水	+34.5	+0.7	生态	+381.8	+6.9
其他	+42.8	+0.9			
合计	-797.2	-17.0	合计	+362.0	+6.5

注:贡献率为部门用水变化量占考察期初用水总量的百分比,负值表示减少,正值表示增加。

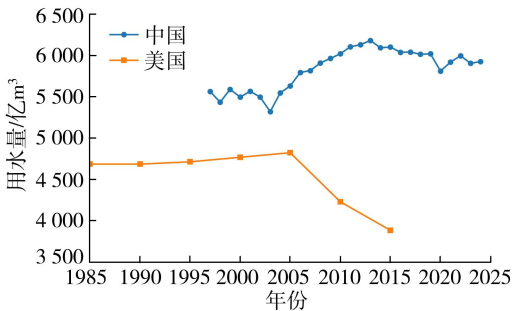


图 1 中美用水演变过程对比
Fig. 1 Comparison of water use evolution processes between China and the United States

2.2 水资源生产力比较

水资源生产力指单位取水量对应的 GDP,是衡量水资源经济效率的核心指标,选择其作为取水维度比较指标。世界银行可比价指标^[15]显示,美国 1985 年水资源生产力约 9 美元/m³,2015 年约 47 美元/m³,30 年间增至原来的约 5.2 倍;中国 2000 年水资源生产力约 1.5 美元/m³,2020 年约 18 美元/m³,20 年间增至原来的约 12 倍。水利部发展研究中心^[16]对 60 国的横向比较显示,中国 2020 年万元工业增加值用水量为 32.9 m³,居第 27 位,低于 60 国平均值 44.6 m³。中国水资源生产力仍低于发达经济体,但提升速度居全球前列,呈“追赶、逼近”的趋势。

2.3 中美各部门用水结构差异

将 1997 年、2015 年、2024 年中国各部门用水占比与美国 2015 年数据进行对比,结果见表 2,其中 1997 年中国生活用水占比 9.4% 含城镇与农村生活用水的 4.4%,2015 年美国工业用水占比 46% 含火

电用水的 41%。

由表 2 可见,中美各部门用水结构存在系统性差异,有两点值得重视:①美国火电用水占比存在“统计放大”效应,火电用水主要来自直流冷却电厂,其用水的 97%以高温水形式即时返回水源^[13];若按耗水量进行计算,灌溉约占美国耗水量的 80%,火电用水仅占约 5%,用水结构方面与中国趋同;②中国自 2003 年起将生态用水单独统计,美国生态用水未作单独统计,相关用水分散于灌溉、水产养殖、河道维持流量中。

表 2 中美各部门用水结构对比

部门	中国各部门用水占比/%			美国 2015 年各部门用水占比/%
	1997 年	2015 年	2024 年	
农业	70.4	63.1	61.6	42
工业(含火电)	20.2	21.9	16.4	46
生活(含农村)	9.4	13.0	15.6	12
生态	未单独统计	2.0	6.4	未单独统计

3 SWR 框架分析

根据 SWR 框架的定义,对中国 1997—2024 年的用水结构演变进行分析,其包含 3 个同步发生的结构变化:①工业用水占比由 20.2%降至 16.4%,生活用水占比由 9.4%升至 15.6%,生态用水从未单独统计到占比 6.4%;②三重转型在用水总量基本稳定的约束下完成,属结构性优化而非总量扩张;③按《中国水资源公报》计算,中国 1997—2024 年的用水结构转型强度约为 12.6%,即约 1/8 的用水份额在部门间完成了再配置,以工业用水峰值年 2011 年为基准,2011—2024 年工业用水减少约 491 亿 m³,同期生活与生态用水合计增加约 407 亿 m³,零和式优化系数约为 0.83(校正 2012 年生活用水标准后调整为约 0.93),支持零和式再平衡的判断。

3.1 工业用水占比下降:从增量主体到效率主体

工业用水占比下降是中国用水结构转型最具标志性的特征,工业用水量从 1997 年的约 1 121 亿 m³攀升至 2011 年的峰值 1 462 亿 m³后,回落至 2024 年的 971 亿 m³^[2,4]。

单位产出水耗的可比价降幅可从两类来源分别界定:①文献层面,Du 等^[34]的研究中 2000—2020 年的 LMDI 分解结果显示,技术效应带来的工业用水强度累计降幅介于 60%~70%。②官方统计数据层面,2020 年《中国水资源公报》载万元工业增加值用水量较 2015 年下降 39.6%(可比价)^[32];王国庆等^[5]测算得到该指标 2015—2024 年累计下降

58.8%;据水利部初步统计,“十四五”期间万元工业增加值用水量较 2020 年再降约 25%(可比价)^[38]。两类来源的界定方向一致,据此可确认 2000—2024 年中国工业用水强度按世界银行可比价标准累计下降 60%~70%。

这一下降的驱动机制包括 3 个层次:①产业结构升级,高耗水的钢铁、纺织、造纸等传统行业占比下降,先进制造业与服务业占比上升;②循环利用水平提升,循环冷却、废水回用与零排放技术的普及显著提高了工业用水重复利用率;③制度约束,“最严格水资源管理制度”划定“三条红线”^[39],水资源税改革于 2016 年试点,2024 年 12 月起在全国推广,以价格杠杆抑制高耗水行业取水^[40-41]。刘波等^[22]的研究证实城市工业用水效率与经济发展水平存在秩匹配关系,支持工业部门“效率主体化”的判断。

3.2 生活用水占比增长:民生维度的基本需求保障度提高

生活用水占比上升并非用水浪费扩张,而是基本用水需求随经济发展逐步得到保障的过程。1997 年中国生活用水 525 亿 m³(其中城镇生活用水约 247 亿 m³)^[2],2024 年增至 927 亿 m³^[2];同期城镇化率由约 30%升至 67%,供水与卫生设施覆盖显著提升。中国人均城镇生活用水量为 130~180 L/d,仍明显低于美国 300~400 L/d 的水平^[12]。Zhao 等^[23]基于 333 个地级市的研究表明,节水型社会政策对居民用水强度有显著抑制效应,生活用水增长处于制度约束下的理性轨道。

3.3 生态用水单独统计:从统计承认到制度化保障

生态用水的单独统计与持续增长是最具时代意义的维度。2003 年《中国水资源公报》首次单列生态用水,当年约 80 亿 m³(占比 1.5%)^[2],2024 年达到 382 亿 m³(占比 6.4%),在各部门中增长最快^[5]。这一变化反映的是统计制度与治理理念的范式转变,而非生态用水在自然意义上从无到有。

20 世纪 80—90 年代黄河频繁断流、海河平原地下水位大幅下降的生态危机,催生了中国生态需水研究及其概念体系^[24-25];生态流量计算方法的持续发展,使生态用水从概念落地为可监测、可考核的量化指标^[26,42]。制度层面,“生态文明”(2007 年)、“河长制”(2016 年)、“生态保护红线”(2017 年)等政策逐步实施^[5,39]。《中华人民共和国水法》将生态环境用水纳入统筹保障范畴,在此基础上,“河湖生态流量保障目标”“生态保护红线”等制度实施使生态用水在事实上获得了政策层面的优先保障,并进入可监测、可考核的管理体系。

3.4 三维协同:稳态约束下的零和式优化

SWR 框架揭示了中国用水转型的零和式优化特征。中国 1997 年用水总量为 5566 亿 m³,2024 年为 5928 亿 m³,27 年间仅增长 6.5%;同期 GDP(可比价)增长约 13 倍,人口增加约 1.5 亿人。结构转型并非通过“开源”实现,而是通过部门间水量再分配完成:以 2011 年工业用水峰值为基准,工业用水至 2024 年净减少约 491 亿 m³,与生活用水和生态用水的同期增量之和大体相当;若以 1997 年为基准,工业用水至 2024 年净减少约 150 亿 m³。这一零和式优化呼应了“四水四定”在水资源刚性约束下统筹生产、生活、生态用水的核心思想^[28],并与空间均衡调控^[29]、“三生用水平衡计算框架”^[30]共同构成水治理范式转型的理论基础。

多数发展中国家在城镇化与工业化同步推进期都伴随着用水总量的快速扩张,中国“边生产边改善”的路径在国际经验中较为罕见,并实现了 SDG 6.4 国际监测体系中用水效率目标与 SDG 6.5 国际监测体系中综合水资源管理目标的同步推进。需要区分的是,SWR 框架描述宏观结构现象,零和式优化是其内部的水量再分配机制。

4 “世界工厂”承担与全球可持续贡献

4.1 中国“世界工厂”角色的水资源含义

中国制造业增加值全球占比从 2003 年的不足 10% 上升至 2023—2024 年的约 28%^[3],同期,中国工业用水占比反而由 22.1% 降至 16.4%。这种“生产份额上升、工业用水占比下降”的反向轨迹(图 2)是描述性观察,并不直接构成因果证据,但其为考察中国 SWR 框架价值的全球外溢提供了关键切入点。结合 Du 等^[34]的 LMDI 分解结果与 Li 等^[20]的消费驱动取水证据,可以在机制层面将该轨迹与技术进步及出口结构演变相联系。Hoekstra 等^[18]的水足迹框架研究进一步表明,商品生产中的水消耗以虚

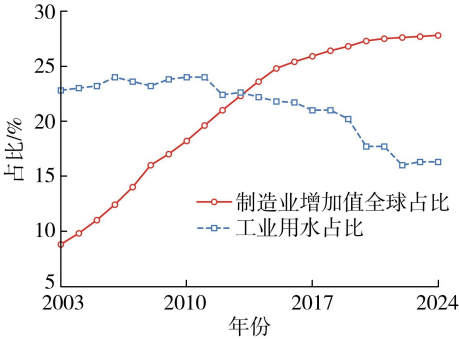


图 2 2003—2024 年中国制造业增加值全球占比与工业用水占比

Fig. 2 Global share of China's manufacturing value-added and industrial water use ratio from 2003 to 2024

拟水形式随贸易流动,生产视角的国家水耗统计会系统性高估生产国、低估消费国的水足迹。

4.2 虚拟水视角下的中国净输出与隐性水补贴

Zhao 等^[35]对中国区域虚拟水流动的研究表明,国内贸易显著缓解了北方缺水流域的压力;Feng 等^[19]与 Zhang 等^[36]的虚拟水核算结果进一步表明,内陆缺水省份通过出口高耗水产品向沿海发达地区与境外消费者输出了大量虚拟水。中国为虚拟水净输出国是国际学术界的共识性结论^[18-19,35-36]。基于上述事实,本文提出隐性虚拟水补贴(implicit virtual water subsidy, IVWS),将其定义为:生产国净输出虚拟水中未通过贸易价格获得补偿的水资源机会成本。计算公式为:

$$C = Vp \tag{3}$$

式中: C 为隐性虚拟水补贴的年度量值; V 为净虚拟水输出量; p 为水资源影子价格,可在水资源税税额标准、再生水供水成本或国际可比水价构成的区间内取值。

IVWS 是对“消费侧水责任”“远程取水耦合”等国际概念的政策化重述,而非新的核算体系。Li 等^[20]研究发现中国城市远程取水中约 20% 与国外消费相关,其中逾 25% 由美国消费驱动;叠加 2000—2024 年中国工业用水强度按世界银行可比价标准累计下降 60%~70%,全球消费者购买中国制造商品的间接水耗显著下降。参考前期研究^[18-19,35-36],若 V 在 10¹⁰ m³/a 量级取值, p 取 1~5 元/m³,则 C 为 10¹⁰~10¹¹ 元/a 量级的数值。

虚拟水视角下的中国净输出贡献伴随着国内水系统的实际代价。华北平原长期地下水超采曾形成大范围地下水位降落漏斗,近年依托南水北调工程受水区压采置换、水量水位双控与河湖生态补水才转入治理回补阶段^[43];部分北方流域的生态欠账尚未完全偿清,高强度节水之下的边际节水成本也在持续上升。中国为承担“世界工厂”角色付出的国内水系统代价,正是隐性虚拟水补贴的实物形态,SWR 框架价值的全球外溢收益并非无成本的馈赠。

4.3 对国际监测体系的启示

中美之间存在特殊的生产与消费“镜像关系”,美国通过去工业化与进口替代使自供工业用水下降 69%^[12],同期中国承接全球制造业份额并持续提升用水效率,工业用水增幅远低于工业增加值增幅^[21]。当前 SDG 6.4 国际监测体系仍以生产视角的用水效率指标为主,未充分核算消费国通过进口转移出去的水足迹,Hoekstra 等^[18]据此主张纳入消费视角指标。为此,本文建议在 SDG 6.4 国际监测体系中增设“用水结构转型”辅助解释指标,考察一

个经济体能否在总量稳定状态下将水从生产部门释放给生活、生态部门,使生产国的节水贡献得到更公平的确认。

5 SWR 框架的可推广性与新兴用水挑战

中国 SWR 框架经验的可推广性涉及制度、技术、价值 3 个维度。

a. 制度维度的核心是总量控制、效率约束、生态强制三元结构。以“三条红线”考核为枢纽^[39],流域尺度的制度刚性约束被证实是结构转型得以实现的关键机制;水权交易试点与阶梯水价、超定额累进加价分别在流域与终端层面提供再分配与节水激励。这一制度框架对水压力大的发展中国家具有直接参考价值。

b. 技术维度体现为分行业、分场景的节水技术。农业领域的滴灌、喷灌与管道输水组合使农田灌溉水有效利用系数从 2000 年的 0.430 提升至 2021 年的 0.568,工业领域采用循环冷却、回用与零液体排放技术,城镇领域实施供水管网漏损控制与再生水利用。这些技术标准多为国际通用,中国的独特经验在于大尺度、低成本、快速部署,可为发展中国家提供借鉴。

c. 价值维度中,生态文明理念将水资源管理纳入人与自然关系的整体框架,生态用水不再是剩余水量,而是被纳入法定统筹,实行单独统计并获得政策性优先保障。这一改变对发展中国家具有启示作用,但实施高度依赖国家规划能力、跨部门协调与统计体系。中国 SWR 框架经验宜以模块化方式输出,分别考量制度模块、技术模块与适用条件,而非直接移植整套制度。

中国 SWR 框架自身亦有明确局限:①高度依赖国家治理能力,制度或财政能力有限的国家难以照搬;②水权交易市场的成熟度仍有限,跨流域水权分配的法律基础有待加强^[27];③地下水超采、面源污染与水质水量协同管控等深层问题尚未根本解决,Liu 等^[44]指出中国水安全仍面临气候变化与空间不均等长期挑战。

新兴用水需求正对 SWR 框架形成新的压力测试。随着“东数西算”工程推进与人工智能产业发展,数据中心冷却用水快速增长,中国水风险机构估计当前中国数据中心直接冷却用水约 13 亿 m³/a,2030 年或超 30 亿 m³/a,且近半数机架位于缺水地区,“水、算空间错配”的迹象值得注意。

6 结论与建议

6.1 结论

a. 中美均呈现用水总量“达峰、缓降”特征,但

驱动机制不同。美国总取水量于 20 世纪 80 年代达峰,由火电冷却转型、灌溉效率提升、去工业化叠加驱动,其中产业外移的部分在水足迹核算意义上属于责任转移而非真实节水;中国用水总量于 2013 年达峰,且与制造业全球份额扩张同步发生,“十四五”期间用水总量年度波动控制在±2%以内。仅考察单一国家的国内用水演变会导致生产国真实节水贡献被低估。

b. 中国用水演变符合 SWR 框架特征,1997—2024 年用水结构发生三重转型:工业用水占比由 20.2%降至 16.4%,生活用水占比由 9.4%升至 15.6%,生态用水由未单独统计到占比 6.4%。三重转型在用水总量仅增长 6.5%的约束下完成,工业用水减少量(基于 2011 年峰值计算)与生活、生态用水增量之和大体相当,呈零和式优化特征。

c. 在制造业增加值占全球约 28%的“世界工厂”背景下,中国工业用水强度按可比价累计下降 60%~70%,具有显著的全球外溢效益,构成一种未经定价的隐性虚拟水补贴;这一贡献伴随着华北平原地下水超采等国内水系统代价。中国 SWR 框架经验可作为模块化经验供发展中经济体参考,其核心价值是“边生产边改善”路径的可行性证明。

6.2 建议

a. 深化国内用水总量与强度双控。建议将生态用水占比纳入流域综合规划与考核体系;依托已在全国推行的水资源税,以价格反映用水成本和水资源稀缺性,对高耗水行业实行准入负面清单管理;由流域管理机构会同省级政府将结构性指标逐级分解实施。

b. 前瞻管理数据中心等新兴产业用水。将水使用效率与电使用效率共同纳入数据中心建设审批的强制性指标,在“东数西算”西部枢纽节点规定再生水等非非常规水源配置比例,并将水资源论证前置项目报批环节,防止数电协同战略的实施侵蚀既有节水成果。

c. 推动生产国节水贡献的国际确认。依托联合国水机制或双边水合作平台,提议在 SDG 6.4 国际监测体系增设用水结构转型辅助指标;将 SWR 框架经验纳入“南南”合作水能力建设项目载体,开展水足迹标识试点,推动消费侧水责任分担进入全球水治理议程。

参考文献:

[1] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001.

- [2] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(1997—2024 年)[DB/OL]. [2026-05-10]. <http://szy.mwr.gov.cn/gbsj/index.html>.
- [3] United Nations Industrial Development Organization. UNIDO Statistics Portal; National Accounts [DB/OL]. [2026-05-10]. <https://stat.unido.org/>.
- [4] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35 (1): 11-23. (Wang Yu, Peng Shaoming, Zheng Xiaokang, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River basin under the layout of water network[J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (1): 11-23. (in Chinese))
- [5] 王国庆, 于学锦, 王婕, 等. 2015—2024 年中国水资源和用水结构的时空演变及成因[J]. 水科学进展, 2025, 36 (6): 949-958. (Wang Guoqing, Yu Xuejin, Wang Jie, et al. Evolution and causes of water resources and water consumption in China from 2015 to 2024[J]. Advances in Water Science, 2025, 36 (6): 949-958. (in Chinese))
- [6] Solley W B, Merk C F, Pierce R R. Estimated use of water in the United States in 1985[R]. Denver: U. S. Geological Survey, 1988.
- [7] Solley W B, Pierce R R, Perlman H A. Estimated use of water in the United States in 1990[R]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1993.
- [8] Solley W B, Pierce R R, Perlman H A. Estimated use of water in the United States in 1995[R]. Denver: U. S. Geological Survey, 1998.
- [9] Hutson S S, Barber N L, Kenny J F, et al. Estimated use of water in the United States in 2000[R]. Denver: U. S. Geological Survey, 2004.
- [10] Kenny J F, Barber N L, Hutson S S, et al. Estimated use of water in the United States in 2005[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2009.
- [11] Maupin M A, Kenny J F, Hutson S S, et al. Estimated use of water in the United States in 2010[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2014.
- [12] Dieter C A, Maupin M A, Caldwell R R, et al. Estimated use of water in the United States in 2015[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2018.
- [13] Harris M A, Diehl T H. Withdrawal and consumption of water by thermoelectric power plants in the United States, 2015[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2019.
- [14] World Bank Group. Annual freshwater withdrawals, total (billion cubic meters) [DB/OL]. [2026-05-10]. <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.FWTL.K3>.
- [15] World Bank Group. Water productivity, total (constant 2015 US \$ GDP per cubic meter of total freshwater withdrawal) [DB/OL]. [2026-05-10]. <https://data.worldbank.org/indicator/ER.GDP.FWTL.M3.KD>.
- [16] 耿思敏, 刘定湘, 夏朋. 从国内外对比分析看我国用水效率水平[J]. 水利发展研究, 2022, 22 (8): 77-82. (Geng Simin, Liu Dingxiang, Xia Peng. Comparative analysis of water use efficiency in China from domestic and international perspectives [J]. Water Conservancy Development Research, 2022, 22 (8): 77-82. (in Chinese))
- [17] 胡文俊, 孙岩. 世界主要国家的节水措施及其启发与思考[J]. 水利经济, 2024, 42 (2): 1-6. (Hu Wenjun, Sun Yan. Inspiration and reflection on review of water saving measures in major countries[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (2): 1-6. (in Chinese))
- [18] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109 (9): 3232-3237.
- [19] Feng K S, Siu Y L, Guan D, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: a consumption based approach[J]. Applied Geography, 2012, 32 (2): 691-701.
- [20] Li Jixuan, Huang Kai, Yu Yajuan, et al. Telecoupling China's city-level water withdrawal with distant consumption[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57 (10): 4332-4341.
- [21] 张建云, 王建华, 何国华, 等. 关于中国水达峰几个问题的讨论[J]. 水科学进展, 2024, 35 (1): 1-10. (Zhang Jianyun, Wang Jianhua, He Guohua, et al. Discussion on issues related to water peaking in China[J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (1): 1-10. (in Chinese))
- [22] 刘波, 张璐然, 王文鹏, 等. 我国城市工业用水效率与经济发展水平的秩匹配度原理及特征解析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 64-71. (Liu Bo, Zhang Luran, Wang Wenpeng, et al. Principle and characteristic analysis of rank matching degree between urban industrial water use efficiency and economic development level in China[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 64-71. (in Chinese))
- [23] Zhao Yali, Li Min. Effect of water-saving society policy on water consumption in the cities of China: a propensity score matching analysis [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (21): 8171.
- [24] 栗晓玲, 康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展, 2003, 14 (6): 740-744. (Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Concept of ecological water requirement and its estimation method[J]. Advances in Water Science, 2003, 14 (6): 740-744. (in Chinese))
- [25] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16 (4): 617-622. (Zhao Xining, Wu Pute, Wang Wanzhong, et al. Research advance on eco-environmental water requirement [J]. Advances in

- Water Science, 2005, 16(4): 617-622. (in Chinese))
- [26] 黄冬菁, 李一平, 崔广柏, 等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 142-148. (Huang Dongjing, Li Yiping, Cui Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 142-148. (in Chinese))
- [27] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 竞争性用水问题本质及解决途径与方法[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 1-8. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Ma Junxia. Essence, resolutions, and dealing methods of competitive water use issues[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 1-8. (in Chinese))
- [28] 褚俊英, 李孟泽, 周祖昊, 等. 水资源保护利用“四水四定”的创新管理模式[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 23-27. (Chu Junying, Li Mengze, Zhou Zuhao, et al. Innovative management pattern of “four water-based principles” in water resources protection and utilization [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 23-27. (in Chinese))
- [29] 魏豪杉, 王红瑞, 郝鹏鑫, 等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 71-77. (Wei Haoshan, Wang Hongrui, Jia Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 71-77. (in Chinese))
- [30] 左其亭, 全志森, 吴青松, 等. 经济社会与生态用水平衡计算规则与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 1-10. (Zuo Qiting, Quan Zhimiao, Wu Qingsong, et al. Calculation rules and methods for water use balance between economic society and ecology [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 1-10. (in Chinese))
- [31] 洪思扬, 程涛, 王佳友, 等. 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间压力互馈研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 48-57. (Hong Siyang, Cheng Tao, Wang Jiayou, et al. Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 48-57. (in Chinese))
- [32] 中华人民共和国水利部. 2020 年中国水资源公报[R/OL]. (2021-07-09) [2026-05-10]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202510/t20251001_2067940.html.
- [33] U. S. Geological Survey. Water use in the United States [EB/OL]. (2026-06-17) [2026-05-10]. <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/water-use-united-states>.
- [34] Du Boyu, Guo Xiaoqian, Liu Guwang, et al. China's water intensity factor decomposition and water usage decoupling analysis[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7039.
- [35] Zhao Xu, Liu Junguo, Liu Qingying, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [36] Zhang Zongyong, Shan Yuli, Zhao Dandan, et al. City level water withdrawal and scarcity accounts of China [J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 449.
- [37] Chien Y L, Morris P. Is U. S. manufacturing really declining? [EB/OL]. (2017-04-11) [2026-05-10]. <https://www.stlouisfed.org/on-the-economy/2017/april/us-manufacturing-really-declining>.
- [38] 付丽丽. 水利部: “十四五”时期我国用水总量实现零增长[EB/OL]. (2026-01-20) [2026-05-10]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2026-01/20/content_464260.html.
- [39] 国务院. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL]. (2012-01-12) [2026-05-10]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676526.shtml.
- [40] 田贵良, 高廷艳. 税费改革对高耗水行业水资源利用效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(9): 143-150. (Tian Guiliang, Gao Tingyan. Impact of tax reform on water resource utilization efficiency in water-intensive industries[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(9): 143-150. (in Chinese))
- [41] 田贵良, 高廷艳. 水资源税改革对缺水地区工业用水效率的影响[J]. 资源与产业, 2022, 24(3): 43-52. (Tian Guiliang, Gao Tingyan. Impacts of water resource tax reform on industrial water use efficiency in water shortage areas[J]. Resources & Industries, 2022, 24(3): 43-52. (in Chinese))
- [42] 陈雪, 徐富刚, 李琴, 等. 基于水情变化的河流生态流量阈值及多时间尺度保障率计算[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 128-136. (Chen Xue, Xu Fugang, Li Qin, et al. River ecological flow threshold and multi-time scale guarantee rate calculation based on hydrological regime changes[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 128-136. (in Chinese))
- [43] 徐腾, 王以鹏, 叶逾, 等. 地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, Ye Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))
- [44] Liu Junguo, Li Delong, Chen He, et al. Timing the first emergence and disappearance of global water scarcity[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 7129.

(收稿日期: 2026-05-14 编辑: 王芳)