

虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价

丁超, 胡永江, 王振华, 赵娜, 董文秀, 王黎明

(内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010)

摘要: 中国水资源短缺且分布不均, 水资源利用的矛盾已从供给不足转为承载过度。以“可持续利用”概念为框架, 在生态完整、水资源持续有效供给的基础上结合虚拟水社会循环过程, 完善水资源承载力评价体系, 并对西北地区进行分析评价。结果表明: (1) 陕西总体较好, 但近十年间呈现不断下降趋势, 其中环境压力承压最大; 甘肃总体上呈下降趋势, 在环境和社会压力方面变化尤为明显; 宁夏一直处于濒临或轻度超载状态, 通过虚拟水贸易有所缓解; 新疆受虚拟水流出影响较大, 一直处于濒临或轻度超载状态; 青海基本处于承载富余状态。(2) 虚拟水贸易对水资源承载力综合压力指数影响较大, 结合虚拟水社会循环过程的水资源承载力评价更具有现实指导意义。(3) 面对不同水资源禀赋及用水效率的地区, 其发展模式可以适当不同, 用水效率高的地区可偏发展激进型一些, 用水效率低的地区建议更靠近环保激进型一些。

关键词: 西北地区; 水资源; 虚拟水; 承载力指数

在过去的 100 年中, 人类社会的用水需求增长已近 8 倍^[1]。部分地区对水资源的使用甚至已超过水自然处理能力的极限^[2], 从而带来严重的生态问题。与世界相比, 我国的水资源问题更为复杂, 面临水资源缺乏、布局不匹配以及分配不均^[3]等诸多问题, 水资源已成为制约我国经济、社会可持续发展的关键因素, 水资源利用的矛盾已从供给不足转为承载过度^[4]。按照“可持续发展”的要求, 水资源要同时承载经济、社会发展以及生态保护三大目标^[5]。中国未来的发展, 既要“发展才是硬道理”, 又要“绿水青山就是金山银山”, 这些都对我国的水资源利用提出了更高的要求。

目前, 水资源承载力的概念从“资源可利用量”^[6], 到“规模和人口支撑”^[7], 再到加入“生态支撑”^[8], 内涵越来越丰富。如阮本青等^[9]认为水资源承载力是一定水资源量直接或间接所能供养的人口数量或经济规模; 鲍超等^[10]将其定义为水资源约束力, 是经济、人口等的约束条件; 龙腾锐等^[11]定义其为一种最大可持续人均综合效用水平。而随着“虚拟水”概念的提出, 以经济、贸易视角研究水资源承载力开始流行^[12-15], 水资源承载力的内涵进一步扩大, 如定义成水赤字账户^[16]等。水资源承载力的概念至今也没有一个公认、明确的定义, 从“资源数量”承载, 到“人口规模”承载, 再到纳入“生态”承载因素, 对水资源承载力内涵的理解不断丰富, 但也造成了目前多标准、多形式、多结果的水资源承载力定义的现状, 这说明对水资源承载力的认知还不完善, 还有研究的空间。

因此, 对水资源承载力进行科学评价, 采取“卸荷”“强载”“经贸”等多种手段提

收稿日期: 2019-06-12; 修订日期: 2020-02-03

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目 (NJSY18131); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2019LH07002)

作者简介: 丁超 (1984-), 男, 河南南阳人, 博士, 讲师, 主要从事水资源承载力、污水资源化研究。

E-mail: dckinger@imust.edu.cn

通讯作者: 王振华 (1980-), 男, 内蒙古包头人, 硕士, 讲师, 主要从事可持续发展研究。

E-mail: 13474728538@163.com

高水资源的适配性，控制水资源使用压力负荷在可承受水平，实现水资源、经济、社会、生态的协调发展，是当前迫切需要解决的重要课题之一。本文基于“虚拟水”概念的发展，以水的自然循环为基础，引入虚拟水贸易因素，将水的社会循环过程纳入到整个水循环过程，给水资源承载力的认知带来崭新的视角，通过经济要素控制水资源消耗和提高水资源承载力来指导区域未来的经济、社会发展。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 虚拟水社会循环视域下水的“自然—社会”循环模型构建

水资源的形成主要基于水的自然循环过程，永无止境、周而复始（图 1a1），因此其是一种可再生、可持续利用的资源。人类社会对水的利用，使水由自由形态变为可利用的资源形态^[7]，实质上扩大了水的循环过程（图 1a2）；但人类对水的利用在一定时间和范围内有强度限制，否则水资源无法自我补充与更新，因此水资源又是一种“有限资源”。在水的自然循环中嵌入水的社会循环过程（图 1a3），形成了传统的水的“自然—社会”循环体系，从这个视角来看待水资源承载力，其主要从可供给及可利用的水资源总量上考虑（图 1a3 中所示的水资源承压环节）。传统的水的“自然—社会”循环过程研究中存在两个不足，一是在此过程中忽视了生态环境需水，二是对水资源在经济社会中的流动过程研究不足。

生态环境需水一般包含在水自然循环中，不在水资源循环内。虽然在目前水资源承

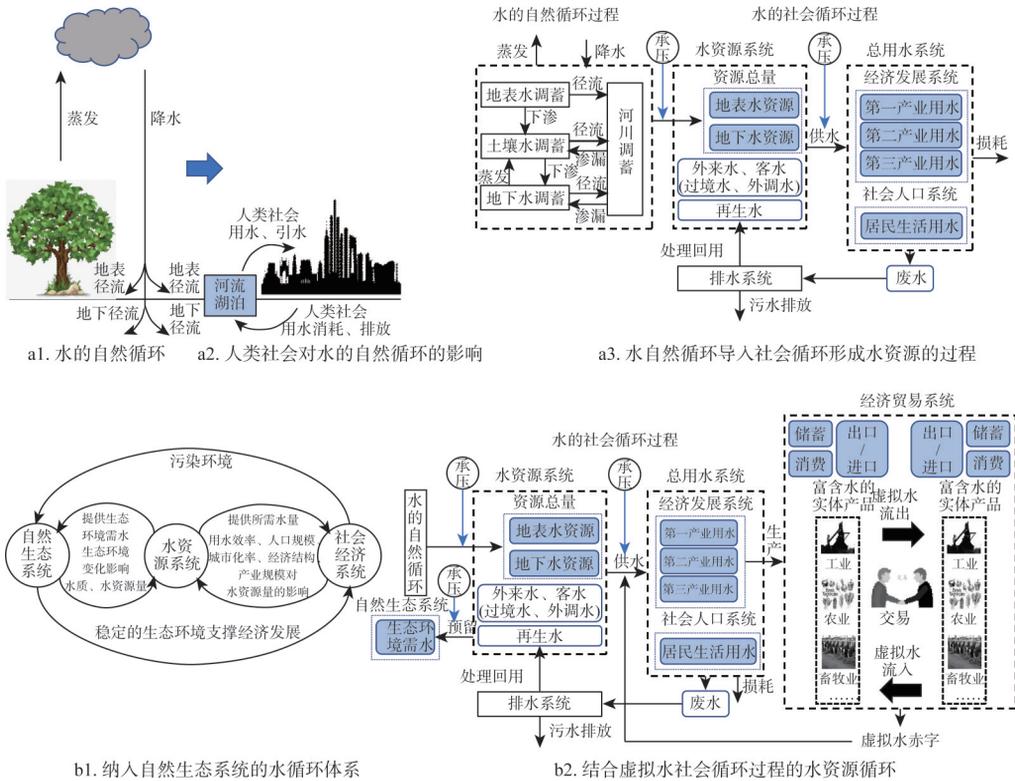


图 1 水的“自然—社会”循环模型及其改进模型
Fig. 1 Water's "Natural-Social" cycle model and its improvement model

载力的研究中都会强调生态环境需水，但在实际利用过程中却往往被忽视（如甘肃祁连山系列环境污染案件中存在违法建设水电设施、周边企业偷排偷放等），导致生态用水需求边缘化。而单独的水环境承载力研究更多地强调生态环境用水安全，未能将自然生态与经济社会两大系统充分且有效融合。因此，需将生态环境需水纳入到传统的水资源循环过程中去，生态安全也需纳入到可持续发展框架中（图1b1）。

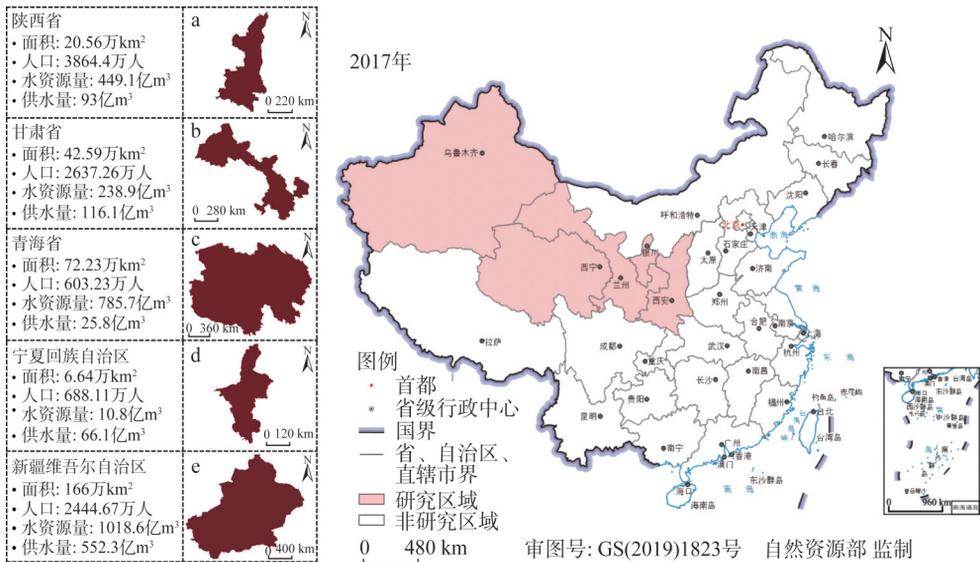
目前水资源承载力的研究中大多从水资源数量着手，但对水资源在经济社会中的流动过程研究不足。结合虚拟水理论，将水资源纳入到社会经济贸易体系中，通过实体产品的贸易来考察水资源的流动情况，这相当于扩大或缩小了有效水资源量。水资源通过经济贸易系统的流动，就给水资源承载力通过经济结构、产业规模、农业种植种类调整提供了可能，扩大了水资源承载力的研究视角，也能够更加真实、准确地考察水资源对经济社会发展的支撑情况。因此，本文构建了包含生态环境需水及虚拟水贸易的水的“自然—社会”循环改进模型（图1b2），以此来进行水资源承载力的研究。

1.2 研究区概况

西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区5个省（自治区）（图2）。西北地区具有面积广大、气候干旱、降水稀少、生态脆弱等特点。目前西北地区集中了我国92%的沙漠化土地，内陆湖泊面积减少近60%。2017年西北地区水资源总量仅为2027亿m³，为全国总量的7.25%，供水不足问题非常普遍。西北地区生态环境脆弱且较难恢复，地表水资源的缺乏导致了地下水掠夺式的开发，以牺牲环境为代价来维持地区发展的用水需求。在目前中国的新发展理念及“绿水青山就是金山银山”的科学论断下，水资源对于西北地区发展显得愈发重要，水资源承载力问题是西北地区发展不得不面对的一个重要课题。

1.3 数据来源

本文在空间上选取西北地区五省（自治区）水资源数据，在时间上选择2007年、



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图2 研究区域
Fig. 2 Research area

2012年和2017年数据进行承载力研究。

水资源类数据来自西北五省(自治区)的水资源公报(2007年、2012年、2017年)以及2017年中国河流泥沙公报、中国水土保持公报;西北五省第一产业用水数据分别来自各省统计年鉴、水资源公报;各工业部门用水量数据取自《2008中国经济普查年鉴》,将2008—2017年的中国经济增长率替代为水资源使用增长率,参考《2018中国统计年鉴》中各省工业用水总量进行校正,间接得到2017年各工业部门的用水量。服务业各部门用水量是基于《2018中国统计年鉴》中服务业用水总量,按照各部门对水的生产和供应的消耗比例进行分配^[18,19]。

投入产出数据主要来源为《中国地区投入产出表》(2007年、2012年)。2017年投入产出表是在2012年投入产出表基础上,结合2017年西北地区五省(自治区)相关经济社会发展数据,运用RAS修正法^[20]编制。各年投入产出表均为42部门,结合所收集的用水量数据,将原有投入产出表中42部门根据《国民经济行业分类》(GB/T 4754-2017)指引合并为第一、二、三产业三类。

1.4 研究方法

1.4.1 实体水资源总量方程

实体水资源量方程为:

$$Q = Q_{sw} + Q_{gw} - Q_{repeat} + Q_{ew} - Q_{ow} + Q_{rw} \quad (1)$$

式中: Q 为区域的实体水资源总量(亿 m^3); Q_{sw} 为地表水资源量(亿 m^3); Q_{gw} 为地下水水资源量(亿 m^3); Q_{repeat} 为地上地下重复计算量(亿 m^3); Q_{ew} 为水资源外部流入量(亿 m^3)(包括外调水量、过境水取水量); Q_{ow} 为水资源调出量(亿 m^3); Q_{rw} 为再生水及雨水利用量(亿 m^3)。

1.4.2 虚拟水贸易额计算

对于虚拟水流动量的估算选取投入产出法(Input-output analysis, IOA)^[18,21-23],因为其进行计算所使用的投入产出表能够体现出不同产品的生产过程和去向,能够更为直观且准确地追踪虚拟水的流动情况^[24-26],且能够避免省际间缺乏商品实物量贸易统计数据的问题,因此成为目前分析虚拟水问题的最主要研究工具。其计算过程如下:

(1) 直接用水系数 k 计算^[22,27]。直接用水系数反映各经济部门单位产量下对自然形态水资源的直接消耗,可构成用水系数行向量。

$$k = [k_j] = \left[\frac{W_j}{X_j} \right] (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: k_j 为第 j 行业的直接用水系数(单位产出直接用水量,用万元产值用水量表示); W_j 为第 j 行业的直接用水量(亿 m^3); X_j 为第 j 行业的经济总产出(亿元)。

(2) 完全用水系数 k' 计算^[22,27]。完全用水系数反映各经济部门在整个生命周期中对直接水资源消耗和间接水资源消耗量的总和,即为产品的虚拟水含量。其计算过程如下:

计算直接消耗系数:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: a_{ij} 为直接消耗系数,即某一经济部门的单位总产出直接消耗的各部门的产品或服务; x_{ij} 为第 i 个经济部门提供给第 j 个经济部门的产品或服务数量(亿元)。

构建直接消耗系数矩阵 A :

$$A=[a_{ij}](i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

计算完全用水系数:

$$k'=[k'_j]=k(I-A)^{-1}(j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: I 为单位矩阵。

(3) 虚拟水贸易额计算^[22,27]。

虚拟水输出量:

$$Q_j^{out}=k'_j OUT_j(j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

虚拟水输入量:

$$Q_j^{in}=k'_j IN_j(j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

虚拟水贸易额:

$$Q_{vwc}=\sum_{j=1}^n(Q_j^{in}-Q_j^{out}) \quad (8)$$

式中: OUT_j 和 IN_j 为第 j 经济部门当年产品或服务的输出量和输入量(亿元)(包含国内贸易和国际贸易)。

1.4.3 生态环境需水量计算

生态环境需水量由城市生态需水、河道外生态需水及河道内生态需水三部分构成^[16](表1)。

表1 生态环境需水量计算

Table 1 Estimation of eco-environmental water demand

生态环境需水		计算办法	说明
城市生态需水 Q_c	城市园林绿化需水	需水统计数据, 来源为各省水资源公报	
	城市人工水域需水	$Q_c=A(E_m-P_m)$	A 为水域面积(hm^2); E_m 为平均蒸发量(mm); P_m 为平均降水量(mm)
河道外生态环境需水 Q_{ro}	植被需水	需水定额=150 m^3/hm^2 ^[28]	
	水土保持需水	需水定额=160 m^3/hm^2 ^[28]	
	人工水域(水库)需水	需水定额=304.25 m^3/hm^2 ^[28]	
河道内生态环境需水 Q_{ri}	维持基本径流	$Q_r=MeanQ_i$	Q_i 为第 i 年的平均径流量(亿 m^3), 采用蒙大拿法 ^[29]
	维持水沙平衡	$Q_s=S_i/C_{max}$	S_i 为多年平均输沙量(亿t); C_{max} 为平均多年最大月含沙量(亿t)

$$Q_e=Q_c+Q_{ro}+Q_{ri} \quad (9)$$

式中: Q_e 为生态环境需水; Q_c 为城市生态需水; Q_{ro} 河道外生态需水; Q_{ri} 为河道内生态需水。

1.4.4 水资源承载力综合指数及度量标准

(1) 水资源承载资源压力指数 I_r

$$I_r=I_r^{entity}+I_r^{virtual}=(Q-Q_e)/Q_u+Q_{vwc}/Q_u \quad (10)$$

式中: Q_u 为总用水量(亿 m^3); I_r^{entity} 为实体水资源承载资源压力指数; $I_r^{virtual}$ 为虚拟水资源压力指数。

(2) 水资源承载环境压力指数 I_e

$$I_e=I_e^{entity}+I_e^{virtual}=(Q-Q_u)/Q_e+Q_{vwc}/Q_e \quad (11)$$

式中: I_e^{entity} 为实体水资源承载环境压力指数; $I_e^{virtual}$ 为虚拟水环境压力指数。

(3) 水资源承载经济压力指数 I_{eco}

$$I_{eco} = I_{eco}^{entity} + I_{eco}^{virtual} = \frac{(Q - Q_e - Q_{pep})}{Q_{eco}} + \frac{Q_{vwc}}{Q_{eco}} \quad (12)$$

式中: Q_{eco} 为三大产业的总用水量 (亿 m^3); Q_{pep} 为城乡居民生活用水总量 (亿 m^3); I_{eco}^{entity} 为实体水资源承载经济压力指数; $I_{eco}^{virtual}$ 为虚拟水经济压力指数。

(4) 水资源承载社会压力指数 I_{pep}

$$I_{pep} = I_{pep}^{entity} + I_{pep}^{virtual} = \frac{(Q - Q_e - Q_{eco})}{Q_{pep}} + \frac{Q_{vwc}}{Q_{pep}} \quad (13)$$

式中: I_{pep}^{entity} 为实体水资源承载社会压力指数; $I_{pep}^{virtual}$ 为虚拟水社会压力指数。

综上, 构建水资源承载力综合压力指数 (Water resources carrying capacity, WRCC) 为:

$$WRCC = \alpha I_r + \beta I_e + \delta I_{eco} + \gamma I_{pep} \quad (14)$$

式中: α 、 β 、 γ 、 δ 为权重。

(5) 水资源承载力度量标准

参考已有文献, 未来“中国流域水资源的综合开发强度应保持在 35% 左右为宜, 其中水资源的开发强度大体可在 25%”^[30]。因此, 水资源承载力度量标准见表 2^[3]。

表 2 水资源承载力度量标准

Table 2 Measurement standards for water resources bearing capacity

$WRCC$ 、 I_r 、 I_{eco} 、 I_{pep} 、 I_e	<0	0~0.50	0.51~1.00	1.01~1.30	1.31~2.00	>2.00
承载力等级	F	E	D	C	B	A
	严重超载	重度超载	轻度超载	濒临超载	承载适宜	承载富余
	严重恶化	资源匮乏	资源短缺	资源紧张	资源协调	资源丰富

2 结果分析

2.1 计算过程中的假设条件

(1) 河道内生态环境需水计算选取蒙大拿法 (Tennant法), 在水资源短缺、用水紧张地区选取平均径流量的 20% 及以下水平, 即在“好”的分级之下 (10月至次年 3 月为 20%, 4-9 月为 40%)^[29]。但对于青海省, 由于其处于三江源头, 具有生态保护的重要责任, 在此选择 80%, 即“最佳”状态 (60%~100%)。

(2) 本文中忽略了降水平丰年对水资源承载力的影响, 选取十年间水自然资源量的均值代替, 以统一比较基础。同时, 观察数据发现, 十年间产水系数变化不大, 因此假定在现有技术水平下, 产水系数不变。

2.2 2017 年西北地区水资源承载力现状分析

资源压力指数 I_r 表征在假定首先满足生态环境需水的情况下, 剩余水资源量对经济、社会发展用水需求的供给压力情况。如图 3a 所示, 甘肃 (0.42) 为重度超载, 宁夏 (0.96) 为轻度超载, 新疆 (1.01) 为濒临超载, 陕西 (1.80) 为承载适宜, 青海 (8.77) 为承载富余状态。以甘肃为例, 若在完全保障生态环境需水后, 其只能满足经济、社会发展用水的 40%。但现实中甘肃、宁夏、新疆均完成了一定数量的经济、社会发展用水供水量, 则意味着必定挤占生态环境需水、超额取水, 势必会造成水生态环境的进一步恶化。

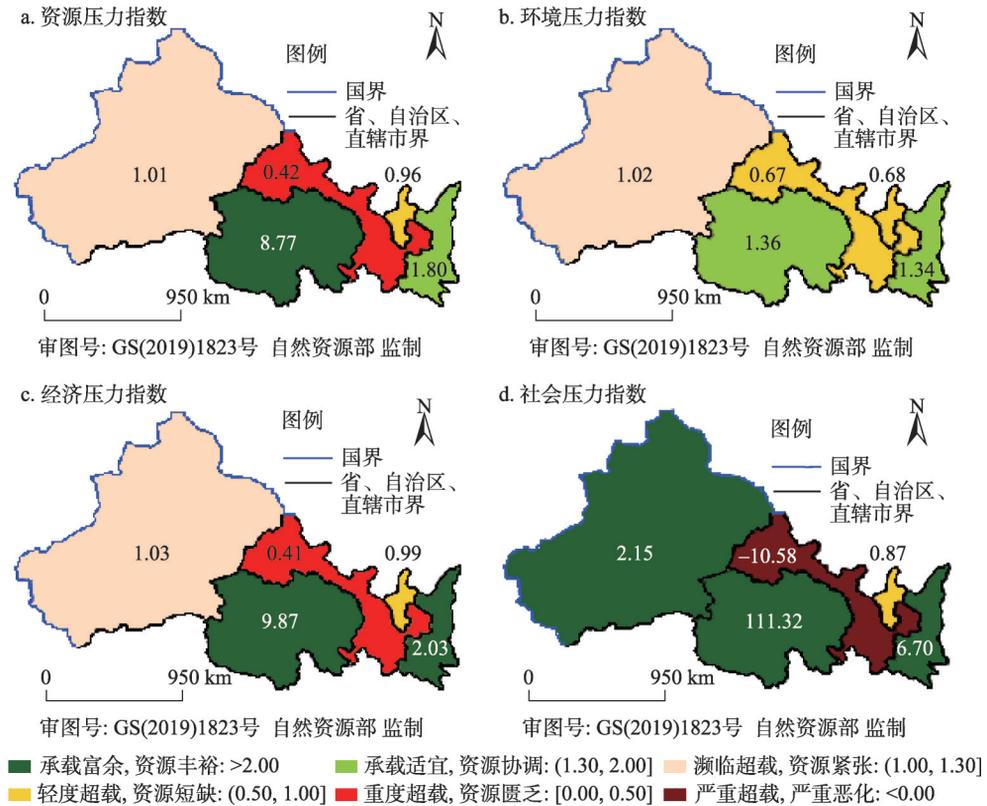


图3 2017年西北地区水资源资源、经济、社会、环境指数

Fig. 3 Water resources, economy, society, environment pressure index in Northwest China, 2017

环境压力指数 I_e 表征在假定首先满足经济、社会发展用水需求的情况下, 剩余水资源量对生态环境需水的保障压力情况。如图3b所示, 宁夏(0.68)和甘肃(0.67)为轻度超载, 新疆(1.02)为濒临超载, 青海(1.36)和陕西(1.34)为承载适宜。青海水资源丰富, 资源保障能力高, 但由于青海承担很大的生态保障、水源地保护的任務, 其生态环境需水需求很大, 因此其环境压力指数下降很大。

经济压力指数 I_{eco} 表征在假定首先满足生态环境、社会发展用水需求的情况下, 剩余水资源量对经济发展用水需求的供给压力情况。如图3c所示, 甘肃(0.41)为重度超载, 宁夏(0.99)为轻度超载, 新疆(1.03)为濒临超载, 青海(9.87)和陕西(2.03)为承载富余。青海经济规模增长仍有较大潜力, 其表现为受环境保护影响的工程性缺水。

社会压力指数 I_{sep} 表征在假定首先满足生态环境、经济发展用水需求的情况下, 剩余水资源量对社会发展用水需求的供给压力情况。如图3d所示, 甘肃(-10.58)为严重超载, 宁夏(0.87)为轻度超载, 新疆(2.15)、陕西(6.7)和青海(111.32)为承载富余。以甘肃为例, 因其经济发展用水使用效率不高, 造成对社会用水的极大挤占(如甘肃人均经济发展用水 $421 \text{ m}^3/\text{人}$, 而陕西仅为 $191 \text{ m}^3/\text{人}$)。因此若有限满足经济发展及生态环境用水需求情况下, 社会发展用水需求无法保障。但在现实生活中, 社会发展用水既受经济发展用水需求的挤占, 同时又挤占生态环境用水需求以满足自身需要, 从而通过传导效应造成生态环境的巨大压力(甘肃 I_e 值也验证了这一点)。

2.3 2007—2017年西北地区水资源承载力压力指数的变化情况分析

本文选择了2007年、2012年及2017年三个时间节点来分析水资源承载力的时空变化情况，结果发现（图4）：

（1）陕西水资源承载压力指数总体上为承载富余和承载适宜状态，但十年间呈现不断下降趋势，其中环境压力承压最大。目前陕西省出现了西安、宝鸡、咸阳、渭南、榆林5市15处面积1427.4 km²的地下水超采区，以及IV类、V类与劣V类水质河长占比22.4%且氨氮、化学需氧量超标的情况，客观上验证了其环境压力承压大且指数不断下降的结论。

（2）甘肃水资源承载压力指数总体上呈现不断下降的趋势，在环境和社会压力方面变化尤为明显。甘肃面临资源性缺水，掠夺式开发又进一步破坏生态，十年间环境和社会压力几乎出现了“断崖式下降”。因此，2017年中央环保督察组指出甘肃祁连山等自

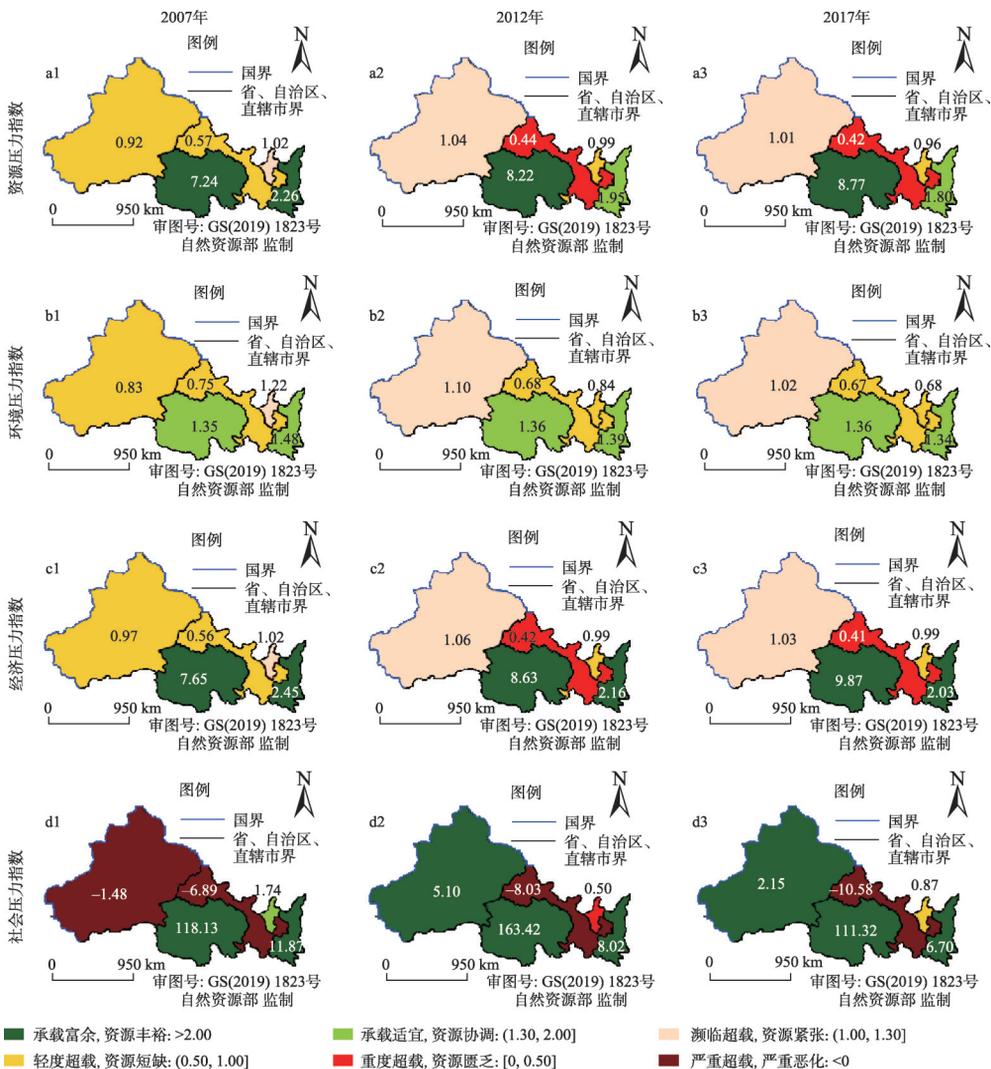


图4 2007—2017年水资源承载力变化情况

Fig. 4 Changes of WRCC in 2007-2017

然保护区生态破坏问题严重，黑河、石羊河、疏勒河等流域水生态碎片化问题突出。

(3) 宁夏水资源承载力一直处于濒临超载与轻度超载状态。以宁夏的水资源禀赋取得目前状态，其主要得益于引黄灌区及虚拟水贸易。宁夏最主要问题是资源性缺水严重，严重依赖黄河取水，自身水资源与水生态环境脆弱，虚拟水贸易一定程度上缓解了这一状况。

(4) 新疆水资源承载力一直处于濒临超载与轻度超载状态。分析可能原因有：在经济方面水资源及居民生活用水利用效率都较低，如新疆万元GDP用水量为449.8 m³/万元，是全国水平的7倍；同时新疆第一产业占比高达15.5%，虚拟水贸易加剧了水资源流出。

(5) 青海水资源承载力基本处于承载富余状态。分析原因可能有：一是水资源总量较为丰富；二是青海是我国主要水源涵养区和生态屏障，承担重要生态战略及水资源保护的责任，因此经济、社会发展受到一定限制，经济及人口规模均较小，产水系数也较小。

2.4 虚拟水社会循环过程对水资源承载力的影响分析

图5展示了虚拟水社会循环过程对水资源承载各压力指数的影响情况。由图5可知：

(1) 虚拟水的流动实质上降低了陕西、甘肃、青海、新疆的水资源承载能力，而在一定程度上缓解了宁夏的水资源短缺情况。其中，第一产业是高虚拟水含量的大户，也是主要流出大户，是通过经济手段提高水资源承载力的主要调控对象。①由图6a可见，陕西虚拟水贸易呈现净流出状态，主要由第一产业造成且十年间流出规模不断加大，2017年达到水资源总量的7.74%。虽然第一产业产品的万元虚拟水含量大幅降低了

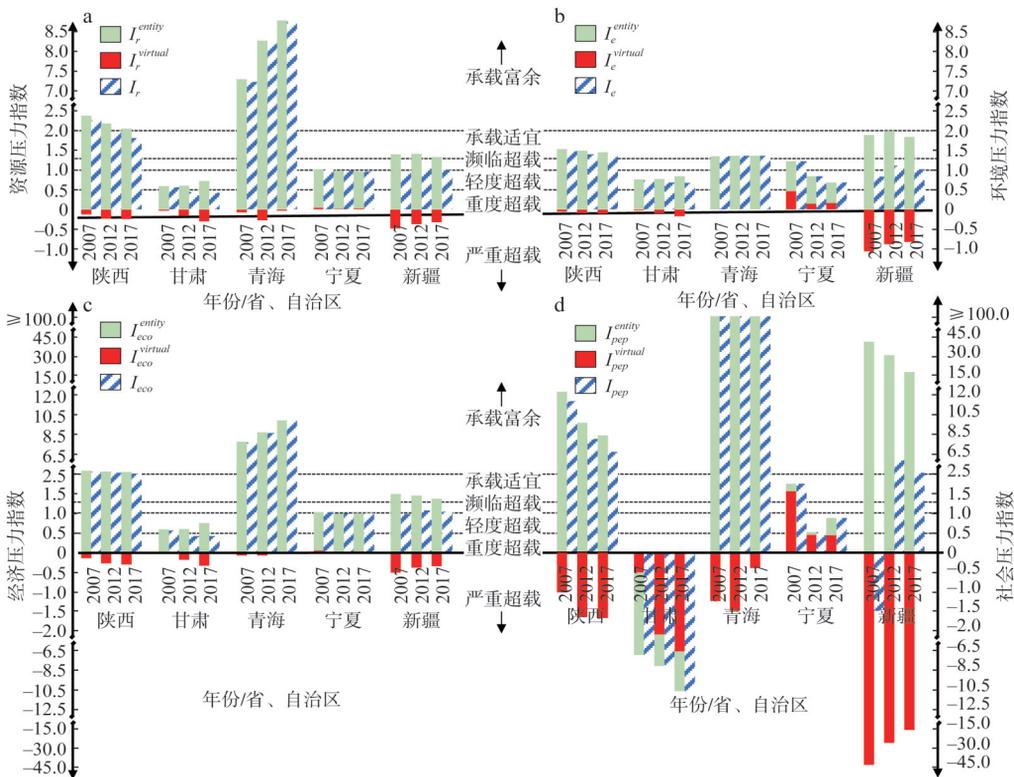


图5 虚拟水社会循环过程对水资源承载力计算结果的影响

Fig. 5 The influence of virtual water social cycle process on the calculation results of WRCC

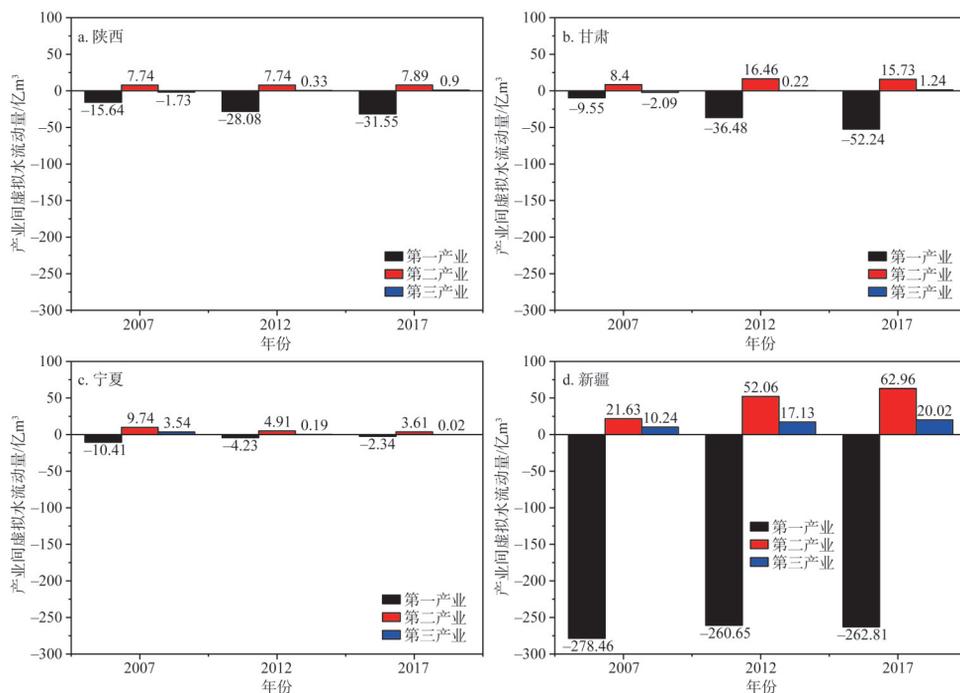


图6 不同产业的虚拟水流入流出情况

Fig. 6 Virtual water inflow and outflow in different industries

71.29%，但仍为第二、三产业的9.41倍和27.81倍，第一产业的初始农产品输出带来的产值增长相对于损耗的水资源来说有些得不偿失。②甘肃农业种植以粮食作物为主，整体情况与陕西相似，但水资源利用效率更低，虚拟水贸易加剧了水资源的流出，降低了水资源承载力。③宁夏的第一产业虚拟水流出量十年间不断降低，一定程度改善了水资源承载状况。宁夏以60多亿 m^3 的黄河取水支撑了现在的经济社会发展，农业种植结构和规模仍有一定的调整空间（稻谷、小麦和玉米）。④以目前新疆的经济及人口规模来说，其水资源总量相对其他四省区是富余的。由图6可知：三大产业的虚拟水含量是陕西的9.23倍、7.78倍和11.99倍，用水过于粗放；第一产业造就了巨大的虚拟水流出，其流出量相当于水资源总量的20%。

因此，西北地区未来一是在保障主粮安全的情况下，种植规模和结构（棉花、大豆、小麦、玉米）还有调整空间；二是对于特色农产品及水果等，可进一步发展深加工产业链，将初始农产品留在本地深加工，利用第一二产业的用水效率差，能够进一步提升水资源的利用效率，万元产值发挥更大的收益；三是要进一步提高第一产业的用水效率。

(2) 虚拟水的省区间流动情况间接降低了西北地区的水资源承载能力。参考吴兆丹等^[11]的研究计算省区间虚拟水流动情况，从西北地区虚拟水转移情况来看（表3），西北地区的虚拟水主要流向了国外（96.3亿 m^3 ）、山东（62.4亿 m^3 ）、广东（50.2亿 m^3 ）等地，以及在西北地区内部流转部分，如甘肃（38.4亿 m^3 ）。但是，西北地区主要虚拟水流入来源则为国外（258.3亿 m^3 ）、新疆（19.2亿 m^3 ）、宁夏（14.6亿 m^3 ）、青海（6.4亿 m^3 ）、陕西（6.2亿 m^3 ）以及甘肃（1.2亿 m^3 ）。由此可见，除国外进口商品带来较大的虚拟水量进行弥补以外，西北地区的虚拟水流入量主要为西北地区内部间的转移，而流出量则有

表3 西北地区虚拟水转移情况表^[31]Table 3 Table of virtual water transfer in Northwest China^[31]

省、自治区	虚拟水主要流出地及流出所占比例(前4名)											
	第1	亿m ³	%	第2	亿m ³	%	第3	亿m ³	%	第4	亿m ³	%
陕西	国外	24.8	29.5	内蒙古	12.1	14.4	山东	6.0	7.1	江苏	3.3	3.9
甘肃	山东	9.3	10.9	广东	7.9	9.3	江苏	5.8	6.8	内蒙古	5.2	6.1
青海	山东	0.8	11.0	广东	0.7	10.2	甘肃	0.6	8.7	江苏	0.5	6.8
宁夏	山东	5.8	11.6	广东	5.2	10.4	甘肃	4.8	9.6	江苏	3.3	6.7
新疆	国外	71.5	17.2	山东	40.5	9.8	广东	36.3	8.7	甘肃	33.0	8.0
省、自治区	虚拟水主要流入地及流入所占比例(前4名)											
	第1	亿m ³	%	第2	亿m ³	%	第3	亿m ³	%	第4	亿m ³	%
陕西	国外	20.3	33.1	黑龙江	4.0	6.6	内蒙古	3.5	5.6	新疆	3.4	5.5
甘肃	国外	13.3	26.6	新疆	12.0	24.1	宁夏	9.3	18.7	青海	5.0	10.0
青海	国外	4.3	66.8	新疆	0.7	10.8	宁夏	0.5	8.4	甘肃	0.2	3.3
宁夏	国外	41.9	82.0	新疆	3.1	6.2	青海	1.4	2.7	甘肃	1.0	1.9
新疆	国外	178.5	75.7	陕西	6.2	2.6	黑龙江	5.5	2.4	宁夏	4.8	2.0

不少流向富水地区。这实质上相当于加重了西北五省(自治区)虚拟水贸易的不平衡状态,间接降低了西北地区的水资源承载能力。

(3) 总体来看,根据目前西北五省(自治区)的经济发展水平及贸易情况,虚拟水贸易额绝对量相对于水资源总量来说相对较小,因此计算出的资源、环境、经济、社会压力指数相对较小,但在西北地区(青海除外)面临干旱缺水的自然条件下,虚拟水贸易对实体水资源承载力数值的修正仍起到了关键作用。如表4所示,除青海省未受到影响外,其余各省(自治区)的水资源承载状态均受到虚拟水贸易影响,其中新疆受到的

表4 整合虚拟水社会循环对原实体水资源承载力影响情况

Table 4 Impact of integrating virtual water social cycle on WRCC of original entities

省、自治区	年份	I_r^{entity}	I_r	变化情况	I_c^{entity}	I_c	变化情况	I_{eco}^{entity}	I_{eco}	变化情况	I_{pep}^{entity}	I_{pep}	变化情况	变化率/%
陕西	2007	A	A	不变	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	16.67
	2012	A	B	降1档	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	
	2017	A	B	降1档	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	
甘肃	2007	D	D	不变	D	D	不变	D	D	不变	F	F	不变	33.33
	2012	D	E	降1档	D	D	不变	D	E	降1档	F	F	不变	
	2017	D	E	降1档	D	D	不变	D	E	降1档	F	F	不变	
青海	2007	A	A	不变	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	0
	2012	A	A	不变	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	
	2017	A	A	不变	B	B	不变	A	A	不变	A	A	不变	
宁夏	2007	D	C	提1档	D	C	提1档	D	C	提1档	E	B	提3档	50.00
	2012	D	D	不变	D	D	不变	D	D	不变	E	D	提1档	
	2017	D	D	不变	D	D	不变	D	D	不变	E	D	提1档	
新疆	2007	B	D	降2档	B	D	降2档	B	D	降2档	A	F	降5档	83.33
	2012	B	C	降1档	B	C	降1档	B	C	降1档	A	A	不变	
	2017	B	D	降2档	B	C	降1档	B	C	降1档	A	A	不变	

负面影响最大（承载状态有83.33%变化且下降），宁夏受到的正面影响最大（承载状态有50%变化且上升）。由此可见，结合虚拟水社会循环重新审视水资源承载力的评价情况，是十分重要且必要的。

2.5 不同发展模式下水资源承载力综合压力指数的变化分析

水资源承载力综合压力指数由资源、经济、社会和环境压力指数按照不同权重构成， α 、 β 、 γ 、 δ 的取值大小实质上反映不同发展理念下对水资源的使用情况。因此，本文通过对权重的不同分配测试了水资源承载力综合压力指数的变化情况。为简化模型计算，在此假定 α 与 β 取值相同， γ 与 δ 取值相同。共设计了三种模式：当 $\alpha=\beta \geq 0.35$ 时（ $\gamma=\delta \leq 0.15$ ），为环保激进型；当 $\alpha=\beta \leq 0.15$ 时（ $\gamma=\delta \geq 0.35$ ），为发展激进型；中间为平稳协调型。图7很好表现了各省区在三中发展模式下水资源综合承载力的影响：

(1) 总体上并未表现出环保激进型压力指数小、发展激进型压力指数大这样一边倒的形式，而是呈现了不同省（自治区）的两极分化的现象（图7），较明显的为陕西和甘肃。

(2) 陕西在环保激进型WRCC偏小，发展激进型时WRCC偏大。这说明优先满足资源供应及生态需求时WRCC较小，水资源承载能力有一定压力；但优先考虑经济社会发展用水时WRCC较大，水资源承载能力较环保激进型有所缓解。甘肃则正好相反，主要

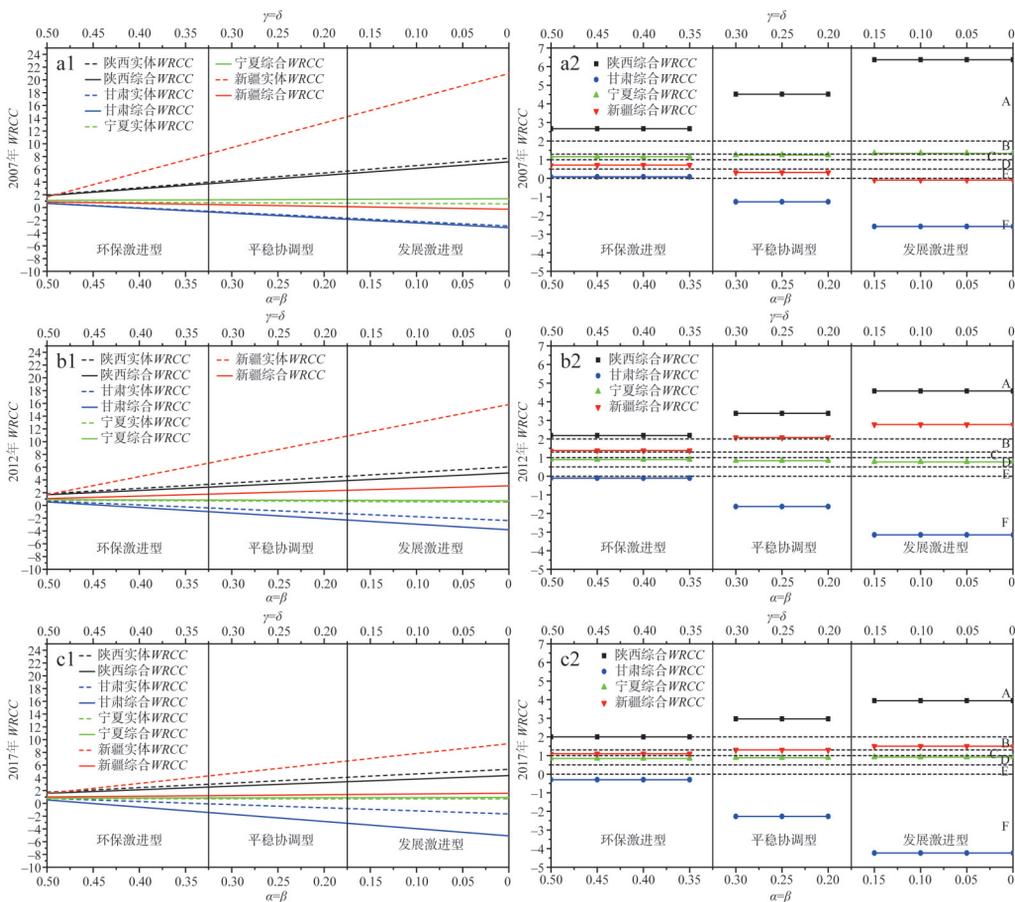


图7 不同发展模式下水资源承载力综合压力指数的变化情况

Fig. 7 Changes of WRCC under different development modes

原因为：对于资源和环境用水需求来说，其压力指数表现较为刚性，因为即使用水效率再提升，其需水总量也不会缩减，因此当资源与环境压力指数较小时，面对环保激进型 *WRCC* 的数值就会较小；但对于经济和社会用水需求来说，其压力指数表现较为柔性，因为随着科技快速发展，经济、社会用水效率是可变的，即同样的经济规模随着更高的用水效率，需水总量会减少，所以面对发展激进型且用水效率较高的地区，*WRCC* 值就会变大。甘肃自然资源禀赋不足，承载力本身面临较大承压状态，且三大产业用水效率仅为陕西的 0.38、0.37 和 0.26，自身经济社会压力指数本身就处于更大的承压状态，所以跟陕西表现截然相反。

(3) 宁夏水资源禀赋也不足，但因大规模黄河取水及虚拟水贸易的流入，勉强维持了目前状态。

(4) 新疆水资源禀赋相对充裕，但因大规模的虚拟水流出，从而大幅度拉低了水资源承载状况。如 2007 年，若在环保激进型的发展模式下，新疆的 *WRCC* 是三种模式下最高的，说明即便以最严格的优先满足生态环境需水的条件来看，新疆的生态环境需水缺口也是最小的，生态环境有一定保障。而到了 2012 年，可以看出，若在环保激进型的发展模式下，新疆的 *WRCC* 已经成为三种模式下最小的，整个发展趋势反转。说明在新疆的发展过程中，对水资源的分配，已经严重侵占了生态环境需水，对生态环境破坏加剧了，而发展激进型模式下 *WRCC* 最高，说明水资源配给主要供给了经济社会发展，虚拟水贸易也加重了这一情况。到了 2017 年，虽然整体趋势没有改变，但是三种模式下的 *WRCC* 都在下降，说明随着发展，新疆水资源发生了总量短缺，这种短缺是各个方面都存在的，当然环保激进型下的 *WRCC* 最低，表明对生态环境用水的侵占或者短缺相对更为严重。

(5) 通过分析发现，固定权重取值并不是一个好方式，用水效率高的地区建议将权重取值靠近发展激进型一些，而用水效率低的地区建议将权重取值靠近环保激进型一些。

3 结论

本文以“可持续利用”概念为框架，在生态系统完整、水资源持续供给的基础上结合虚拟水社会循环过程建立水资源承载力评价体系，对西北地区进行了评价，结果表明：

(1) 虚拟水贸易对水资源承载力综合压力指数影响较大，结合虚拟水社会循环过程的水资源承载力评价更具有现实指导意义。

(2) 本文基于水资源承载力综合权重赋值而构建的三种发展模式具有一定的典型性，应基于各地发展基础、国家发展战略、地区发展规划等因素来制定当地的匹配水资源承载力状况的经济发展模式。

(3) 基于种植传统、自然和土壤状况等因素的影响，短期内通过调整农业种植结构和规模来改变虚拟水贸易状况，进而改善水资源承载状况，具有较大的现实难度。但随着种植技术的快速发展，从长期来看，这一做法是有重大环境、社会和经济效益的。

(4) 通过科技创新和工艺设备改造，切实且快速提高第一、二、三产业的用水效率是现阶段和未来改善水资源承载状况最主要和最有效的手段。

(5) 增强节水意识，通过经济、管理、法律等手段提高国民的用水效率，是一项长期任务，对改善水资源承载状况具有深远影响。

参考文献(References):

- [1] VELDKAMP T I E, WADA Y, AERTS J C J H, et al. Water scarcity hotspots travel downstream due to human interventions in the 20th and 21st century. *Nature Communications*, 2017, 8: 15697.
- [2] LU S, ZHANG X, BAO H, et al. Review of social water cycle research in a changing environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 132-140.
- [3] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. *自然资源学报*, 2011, 26(2): 258-269. [LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2): 258-269.]
- [4] 王建华. 国家水资源承载力评价与战略配置. *中国环境管理*, 2017, 9(4): 111-112. [WANG J H. Evaluation and strategic allocation of national water resources carrying capacity. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2017, 9(4): 111-112.]
- [5] 赵敏娟, 刘霁瑶. 水资源多目标协同配置: 全价值基础上的框架研究. *中国环境管理*, 2018, 10(5): 8-14. [ZHAO M J, LIU J Y. Multi-objective collaborative allocation of water resources: A framework study based on full value. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, 10(5): 8-14.]
- [6] DAILY G C, EHRlich P R. Socioeconomic equity, sustainability, and earth' carrying capacity. *Ecological Application*, 1996, 6(4): 991-1001.
- [7] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269. [XIA J, ZHU Y Z. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269.]
- [8] 闵庆文, 余卫东, 张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 14-16. [MIN Q W, YU W D, ZHANG J X. Fuzzy-based evaluation of water resources carrying capacity and its application. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 14-16.]
- [9] 阮本青, 沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 57-61. [RUAN B Q, SHEN J. Calculating model for moderately bearing capacity of regional water resources. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3): 57-61.]
- [10] 鲍超, 方创琳. 水资源约束力的内涵、研究意义及战略框架. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 844-852. [BAO C, FANG C L. On concept, significance and strategic framework for water resources constraint force. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 844-852.]
- [11] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识. *水利学报*, 2004, (1): 38-45. [LONG T R, JIANG W C, HE Q. Water resources carrying capacity: New perspectives based on eco economic analysis and sustainable development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (1): 38-45.]
- [12] KANG H, SRIDHAR V, MILLS B F, et al. Economy-wide climate change impacts on green water droughts based on the hydrologic simulations. *Agricultural Systems*, 2019, 171(C): 76-88.
- [13] YANG D, YIN Y, MA X, et al. Environmental improvement of lead refining: A case study of water footprint assessment in Jiangxi province, China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(7): 1533-1542.
- [14] 熊娜娜, 谢世友. 成都市水资源生态足迹及承载力时空演变研究. *西南大学学报: 自然科学版*, 2018, 40(6): 124-131. [XIONG N N, XIE S Y. A study of the spatio-temporal evolution of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources of Chengdu. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2018, 40(6): 124-131.]
- [15] 尹默雪, 赵先贵. 基于水足迹理论的内蒙古1990—2016年水资源评价. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(6): 120-125. [YIN M X, ZHAO X G. Evaluation of water resource in Inner Mongolia from 1990 to 2016 based on water footprint theory. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(6): 120-125.]
- [16] 丁超. 支撑西北干旱地区经济可持续发展的水资源承载力评价与模拟研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. [DING C. Support the northwest arid areas of sustainable economic development of water resources carrying capacity evaluation and simulation. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.]
- [17] 付汉良, 刘晓君. 再生水回用公众心理感染现象的验证及影响策略. *资源科学*, 2018, 40(6): 1222-1229. [FU H L, LIU X J. Verification and influence strategies of residents' spiritual cognition of recycled water reuse. *Resources Science*, 2018, 40(6): 1222-1229.]

- [18] 田贵良, 李娇娇, 李乐乐. 基于多区域投入产出模型的长江经济带虚拟水流动格局研究. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(3): 81-88. [TIAN G L, LI J J, LI L L. Pattern of virtual water flow in the Yangtze River Economic Belt based on multi-regional input-output model. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(3): 81-88.]
- [19] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(3): 788-799. [CAO T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji region based on multiregional input-output model. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 788-799.]
- [20] 黄晓荣, 裴源生, 梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方法. 水科学进展, 2005, (4): 564-568. [HUANG X R, PEI Y S, LIANG C. Input/output method for calculating the virtual water trading in Ningxia. Advances in Water Science, 2005, (4): 564-568.]
- [21] 丁雪丽, 张玲玲, 王宗志. 基于省际间粮食贸易的虚拟水综合效益分析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 978-987. [DING X L, ZHANG L L, WANG Z Z. Comprehensive benefits analysis of virtual water based on inter provincial trade. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 978-987.]
- [22] 张金良, 蒋桂芹, 杨立彬, 等. 基于投入产出分析的内蒙古虚拟水消费及贸易研究. 水电能源科学, 2018, 36(9): 52-54. [ZHANG J L, JIANG G Q, YANG L B, et al. Study on virtual water consumption and trade based on input-output analysis in Inner Mongolia. Water Resources and Power, 2018, 36(9): 52-54.]
- [23] 马超, 许长新, 田贵良, 等. 虚拟水贸易的可计算非线性动态投入产出分析模型. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(11): 160-169. [MA C, XU C X, TIAN G L, et al. Computable nonlinear dynamic input-output analysis model of virtual water trade. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(11): 160-169.]
- [24] 余灏哲, 韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 474-483. [YU H Z, HAN M. Spatial-temporal analysis of sustainable water resources utilization in shandong province based on water footprint. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 474-483.]
- [25] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较: 基于“总量—相关指标—结构”分析框架. 自然资源学报, 2017, 32(1): 76-87. [WU Z D, ZHAO M, TIAN Z, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical framework of "amount-relative index-structure". Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 76-87.]
- [26] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析. 自然资源学报, 2019, 34(5): 934-944. [ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 934-944.]
- [27] 刘雅婷, 王赛鸽, 陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(6): 1930-1940. [LIU Y T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for Beijing based on input-output model. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1930-1940.]
- [28] 王菊翠, 仵彦卿, 党碧玲, 等. 陕西关中地区水资源的可持续发展支持能力. 地球科学与环境学报, 2009, 31(2): 177-184. [WANG J C, WU Y Q, DANG B L, et al. Water resources supporting capacity for sustaining development in Guanzhong region, Shaanxi province, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(2): 177-184.]
- [29] 中华人民共和国水利部. SLZ 712-2014 河湖生态环境需水计算规范. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. [Ministry of water resources of the people's Republic of China. SLZ 712-2014 Code for Calculation of Water Demand of River and Lake Ecological Environment. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014.]
- [30] 张雷, 鲁春霞, 吴映梅, 等. 中国流域水资源综合开发. 自然资源学报, 2014, 29(2): 295-303. [ZHANG L, LU C X, WU Y M, et al. An overall development of water resources for China's rivers. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 295-303.]
- [31] 吴兆丹, 赵敏, LALL UPMANU. 基于多区域投入产出的我国省区虚拟水流动格局研究. 河海大学学报: 哲学社会科学版, 2016, 18(6): 62-69. [WU Z D, ZHAO M, LALL U. Pattern of provincial virtual water flow in China based on multi-regional input-output analysis. Journal of Hohai University: Philosophy and Social Sciences, 2016, 18(6): 62-69.]

Assessment of water resources carrying capacity from the perspective of virtual water social cycle

DING Chao, HU Yong-jiang, WANG Zhen-hua, ZHAO Na,
DONG Wen-xiu, WANG Li-ming

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The shortage and uneven distribution of water resources in China are very serious. The contradiction of water utilization has changed from insufficient supply to overload of Water Resources Carrying Capacity (WRCC). Based on the concept of sustainability, this study, combined with the society cycle process of virtual water, improves the evaluation method of WRCC and analyzes the WRCC of Northwest China. The method can be helpful to maintain the integrity of water ecology and the stability of water supply. The results show that: (1) The WRCC of Shaanxi is generally good. However, it has a downward trend in the past ten years, in which the environmental pressure is the largest. The WRCC of Gansu shows a downward trend on the whole, especially in terms of environmental and social pressure. The WRCC of Ningxia has been on the verge of overloading or slight overloading, and alleviated by virtual water trade. The WRCC of Xinjiang is greatly affected by virtual water outflow and has been on the verge of overloading or slight overloading. The WRCC of Qinghai is basically in a surplus state of carrying capacity. (2) Virtual water trade has a significant influence on the comprehensive pressure index of WRCC. The evaluation method of WRCC, combined with the society cycle process of virtual water, has a practical significance. (3) The regions of different endowments of water resources and the efficiency of using water can be appropriately different in development modes. We suggest that the regions with high and low use efficiency of water take the "radical development mode" and the "radical environmental protection mode", respectively.

Keywords: Northwest China; water resources; virtual water; bearing capacity index