

基于MRIO的中国省区和产业灰水足迹 测算及转移分析

孙才志^{1,2}, 阎晓东²

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029;

2. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029;)

摘要:水资源短缺与水资源污染已经严重影响到人类的生存与中国的可持续发展,分析各地区与各产业水资源污染情况是解决中国环境可持续发展的关键。论文在对传统灰水足迹研究的基础上,利用2002、2007和2012年多区域投入产出表,计算中国30个省份(因数据所限,未分析西藏、香港、澳门和台湾地区)和17个产业2002—2012年中间消费和最终消费灰水足迹,以及合并后的8大区域和17个产业的总灰水足迹转移。结果表明:①山东、河南和河北等经济规模较大的地区灰水足迹一直处于相对较高的状态,青海、宁夏和海南等经济规模较小的地区灰水足迹一直处于相对较少的状态。②农业是灰水足迹产生的最大部门,商业及运输业等4个产业部门灰水足迹较大,但其总和却远小于农业灰水足迹;其他制造业等5个产业部门灰水足迹一直相对较少。③灰水足迹净输入区域为京津区域、北部沿海区域、东部沿海区域和南部沿海区域;灰水足迹转移量最大的2条路径之和呈现先增加后减少的趋势,识别出的主要灰水足迹流出一流入关系区域为中部区域—东部沿海区域。④农业和采选业为灰水足迹净输出部门,大部分轻工业及第三产业为灰水足迹净输入部门;识别出的主要灰水足迹流出一流入关系部门包括农业—食品制造及烟草加工业、农业—纺织服务业、农业—化学工业。各地区和产业产生的灰水足迹以及区域和产业识别出的灰水足迹路径可为减少灰水产生提供理论依据,同时为地区和产业水资源合理利用提供理论支持。

关键词:灰水足迹;多区域投入产出模型;中间消费;最终消费;中国

水资源作为生活、生产的重要资源,和人类的生存发展息息相关^[1]。随着经济的发展,水资源短缺和水资源污染是中国水资源面临的严峻问题。中国水资源总量较为丰富,但人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4左右。《2017年中国环境年鉴》^[2]上的数据显示,在全国地表水1940个评价、考核、排名断面中,IV类及以上水质达到32.3%,全国60.1%的地下水监测点水质属较差或极差级别,水环境压力较大。

灰水足迹是指以现有水质标准和自然本底浓度为基准,稀释一定污染物所需淡水的体积^[3]。相对于其他污染物来说,灰水足迹可以直观地反映地区

水污染情况。中国灰水足迹研究还处于初级阶段,灰水足迹测算方面还不够完善,从区域和产业角度的研究较少。孙才志等^[4]、张楠等^[5]和冯浩源等^[6]分别对中国31个省份、河北省和张掖市的灰水足迹进行了核算评价。他们对灰水足迹研究作出了贡献,但是却没有对各地区产业细分下的灰水足迹作出分析,同时也没有涉及区域和产业间灰水足迹的流动关系。由于各地区的产业结构不同,产业灰水足迹研究已成为非常重要的研究内容。国外的研究主要集中在工农业产品的灰水足迹测算与分析^[7-9],国家、地区或流域灰水足迹测算与分析以及在灰水足迹测算基础上的水资源可持续发展评价等方

收稿日期:2019-02-18;修订日期:2019-05-23。

基金项目:国家社会科学重点基金项目(19AJY010)。[Foundation: Key Project of National Social Science Foundation of China, No. 19AJY010.]

第一作者简介:孙才志(1970—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事水资源与海洋经济研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

引用格式:孙才志,阎晓东. 基于MRIO的中国省区和产业灰水足迹测算及转移分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 207-218. [Sun Caizhi, Yan Xiaodong. Measurement and transfer analysis of grey water footprint of Chinese provinces and industries based on a multi-regional input-output model. Progress in Geography, 2020, 39(2): 207-218.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.003

面^[10-11],为灰水足迹研究奠定了理论基础,丰富了灰水足迹研究内容。

投入产出法是Leontief在1936年提出的,通过部门间货币转移考虑现代经济部门关系的方法^[12],可以计算所有直接或间接的包含在产品消费中的资源使用。由于投入产出方法可以描述经济内部产品和服务的流转情况,因此在虚拟水^[13-18]、水足迹^[19-24]和碳足迹^[25-30]的测算过程得到了非常广泛的应用。投入产出法的优点是可以从地区或产业角度分析资源或者污染物的流转情况,为解决资源短缺和污染控制提供了新的思路。鉴于此,本文在采用灰水足迹理念对中国30个省份(因数据所限,未分析西藏、香港、澳门和台湾地区)2002、2007和2012年灰水足迹进行测算的基础上,结合2002、2007和2012年区域间投入产出表,以省份和产业为研究单位,运用区域间投入产出表,对中国30个省份和17个产业部门中间消费和最终消费灰水足迹进行研究,并在此基础上分析合并后的8个区域和17个产业的灰水足迹转移特点,为减少地区各产业灰水足迹提供理论支持,为建立节水型社会提供参考依据。

1 研究方法 & 数据来源

1.1 灰水足迹的测算

本文采取韩琴等^[31]的灰水足迹计算方法,对中国30个省份2002、2007和2012年的灰水足迹进行测算。

1.1.1 农业灰水足迹

农作物在生长过程中,除了由植物吸收利用的化肥、农药外,部分残余伴随着灌溉和降雨进入水体,产生污染。由于面源污染数据的难获取性,本文在测算农业灰水足迹时选取氮肥作为水污染物,具体计算公式为:

$$GWF_{agr} = \frac{\alpha \times Appl}{C_{max} - C_{nat}} \quad (1)$$

式中: GWF_{agr} 为农业灰水足迹; α 为氮肥的流失率; $Appl$ 为氮肥施用量; C_{max} 为污染物标准浓度, C_{nat} 为容纳水体本底浓度。

1.1.2 工业灰水足迹

和农业相比,工业污染属于点源污染,工业污染是工业废水直接排放进入水体造成的,因此可以直接得到水中主要污染物排放量。本文选取化学

需氧量(COD)和氨氮($NH_4^+ - N$)作为工业污水污染物,具体计算公式为:

$$GWF_{ind(i)} = \frac{L_{ind(i)}}{C_{max} - C_{nat}} - W_{ed(ind)} \quad (2)$$

$$GWF_{ind} = \max \left(GWF_{ind(COD)}, GWF_{ind(NH_4^+ - N)} \right) \quad (3)$$

式中: $GWF_{ind(i)}$ 表示第*i*类污染物的工业灰水足迹; $L_{ind(i)}$ 表示第*i*类污染物的工业排放负荷; $W_{ed(ind)}$ 表示工业污水排放量; GWF_{ind} 表示工业灰水足迹。

1.1.3 生活灰水足迹

生活灰水足迹同样属于点源污染,且与工业灰水一样,其排放污水中均是COD和氨氮为主要污染物,因此生活灰水足迹的具体计算公式为:

$$GWF_{lif(i)} = \frac{L_{lif(i)}}{C_{max} - C_{nat}} - W_{ed(lif)} \quad (4)$$

$$GWF_{lif} = \max \left(GWF_{lif(COD)}, GWF_{lif(NH_4^+ - N)} \right) \quad (5)$$

式中: $GWF_{lif(i)}$ 表示第*i*类污染物的生活灰水足迹; $L_{lif(i)}$ 表示第*i*类污染物的生活排放负荷; $W_{ed(lif)}$ 表示生活污水排放量; GWF_{lif} 表示生活灰水足迹。

1.2 多区域投入产出法(MRIO)

投入产出技术是通过国民经济中各部门之间投入和产出对应关系研究经济结构之间关系的分析方法^[32],工具主要有投入产出数学模型和投入产出表^[33-34]。研究一国多区域灰水足迹及灰水足迹转移问题应建立在该国区域间投入产出表的基础上,本文在区域间投入产出表中加入灰水足迹项目,得到宏观经济区域间灰水足迹投入产出表(表1)。

假设模型所包含的区域个数为*m*,每个区域均含有*n*个产业部门,表1中, x_{ij}^{hk} 表示*k*区域*j*部门对*h*区域*i*部门产品的投入和使用; y_i^{hk} 表示*k*区域对*h*区域*i*部门产品的最终使用; ex_i^h 、 im_j^k 分别表示*h*区域*i*部门的出口和*k*区域*j*部门的进口; v_j^k 、 X_i^h 分别表示*k*区域*j*部门的增加值和*h*区域*i*部门的总产出。因此,区域间投入产出模型可表示为:

$$X_i^h = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^{hk} + \sum_{k=1}^m y_i^{hk} + ex_i^h \quad (6)$$

各部门的直接消耗系数表示为:

$$a_{ij}^{hk} = \frac{x_{ij}^{hk}}{X_j^k} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

结合式(7),将式(6)写成矩阵形式:

表1 区域间灰水足迹投入产出表

Tab.1 Inter-regional grey water footprint input-output table

(万元)

投入	中间使用								最终使用			出口	总产出	
	区域1				区域m				区域1	...	区域m			
	部门1	...	部门n	...	部门1	...	部门n							
中间投入	区域1	部门1	x_{11}^1	...	x_{1n}^1	...	x_{11}^m	...	x_{1n}^m	y_1^1	...	y_1^m	ex_1^1	X_1^1
	
		部门n	x_{n1}^1	...	x_{nn}^1	...	x_{n1}^m	...	x_{nn}^m	y_n^1	...	y_n^m	ex_n^1	X_n^1
	
	区域m	部门1	x_{11}^m	...	x_{1n}^m	...	x_{11}^{mm}	...	x_{1n}^{mm}	y_1^{m1}	...	y_1^{mm}	ex_1^m	X_1^m
	
		部门n	x_{n1}^m	...	x_{nn}^m	...	x_{n1}^{mm}	...	x_{nn}^{mm}	y_n^{m1}	...	y_n^{mm}	ex_n^m	X_n^m
		进口	im_1^1	...	im_n^1	...	im_1^m	...	im_n^m					
		增加值	v_1^1	...	v_n^1	...	v_1^m	...	v_n^m					
总投入			X_1^1	...	X_n^1	...	X_1^m	...	X_n^m					
灰水足迹			w_1^1	...	w_n^1	...	w_1^m	...	w_n^m					

$$X^h = A^{hk} X^h + Y^{hk} + E^h \quad (8)$$

式中: X^h 为区域间投入产出模型的产出矩阵; A^{hk} 为区域间投入产出模型的消耗系数矩阵; Y^{hk} 为最终需求矩阵; E^h 为出口矩阵。

由于2002年和2007年区域间投入产出表为进口竞争型模型,矩阵 A^{hk} 和 Y^{hk} 中包含进口,需要对其剔除(2012年为非竞争型,无需剔除进口)。为此,引入进口系数矩阵 \hat{M} ,用进口量占中间需求和最终需求总和的比例确定 \hat{M} (为方便统一,在计算2012年时,令 \hat{M} 为0矩阵)。

剔除进口后,式(8)可以改写为:

$$X^h = (I - \hat{M})(A^{hk} X^h + Y^{hk}) \quad (9)$$

$$\text{或 } X^h = [I - (I - \hat{M})A^{hk}]^{-1} [(I - \hat{M})Y^{hk}] \quad (10)$$

式中: $[I - (I - \hat{M})A^{hk}]^{-1}$ 是剔除进口后的列昂惕夫逆矩阵,表示剔除进口后生产单位产品对中间投入部门产品的需求; $[(I - \hat{M})Y^{hk}]$ 为剔除进口后的最终使用矩阵。

1.2.1 基于多区域投入产出表的灰水足迹计算方法

(1) 各省区各部门的直接灰水排放系数:

$$\sigma = [\sigma_j^k], \sigma_j^k = \frac{w_j^k}{X_j^k} \quad (11)$$

式中: σ 为直接灰水排放系数矩阵; σ_j^k 为 k 地区 j 部门的直接灰水排放系数; w_j^k 、 X_j^k 分别代表 k 地区 j 部门的灰水足迹和总产出。

完全灰水排放系数可表示为生产单位中间产

品的灰水排放量,本文用直接灰水排放系数与剔除进口的列昂惕夫逆矩阵相乘得到:

$$\delta = [\delta_j^k], \delta_j^k = \sum_k \sum_j \sigma_j^k [I - (I - \hat{M})A^{hk}]^{-1} \quad (12)$$

(2) 各省区灰水足迹

从区域间投入产出表可以看出,各省区灰水足迹包括中间消费灰水足迹和不包括出口的最终消费灰水足迹。各地区消费所包含的灰水足迹计算公式如下:

中间消费灰水足迹:

$$W_{ic} = \delta(I - \hat{M})x_i \quad (13)$$

最终消费灰水足迹:

$$W_{fc} = \delta(I - \hat{M})y_i \quad (14)$$

灰水足迹总量:

$$W_T = W_{ic} + W_{fc} \quad (15)$$

式中: x_i 表示 i 区域中间消费列阵; y_i 表示不包含出口的 i 区域最终消费列阵; δ 为完全灰水排放系数; W_{ic} 表示中间消费灰水足迹; W_{fc} 表示最终消费灰水足迹; W_T 表示灰水足迹总量。

1.2.2 基于多区域投入产出表的灰水足迹转移计算方法

(1) 区域间灰水足迹转移

剔除进口的区域间灰水足迹转移 T_T^{hk} , 可以用完全灰水排放系数与总使用(包含中间使用和不包含出口的最终使用)矩阵相乘,再整理合并得到,即

$$T_T^{hk} = \delta [(I - \hat{M})(x_i + y_i)] \quad (16)$$

(2) 产业间灰水足迹转移

灰水足迹产业转移矩阵,等于完全灰水排放矩阵与其自身转置矩阵之差^[35],计算公式如下:

$$vw_{ij} = \sigma [I - (I - \hat{M})A^{hk}]^{-1} [(I - \hat{M})(x_i + y_i)]^T \quad (17)$$

在本文中, $(x_i + y_i)$ 为区域间投入产出模型的总消费矩阵 $(x_i + y_i)$ 的对角化矩阵,得到的结果为136阶方阵,将其合并为17个部门的灰水排放方阵,在其基础上分析产业灰水足迹转移。

$$TVW = VW - VW^T = \begin{bmatrix} 0 & tvw_{12} & \cdots & tvw_{1n} \\ tvw_{21} & 0 & \cdots & tvw_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ tvw_{n1} & tvw_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: VW 为完全灰水排放矩阵; TVW 是主对角线元素为0的对称矩阵,其中, tvw_{ij} 从行方向看,表示 i 部门向 j 部门输出的灰水量,从列方向看,表示 j 部门从 i 部门灰水输入量,行方向之和等于 i 部门灰水净输出量。

1.3 数据来源

1.3.1 投入产出表的数据来源及处理

本文分析基于2002、2007和2012年中国区域间投入产出表,其中:2002年和2007年区域间投入产出表来自于张亚雄等^[36],该投入产出表包含中国30个省份(不含西藏、香港、澳门和台湾),2012年中国区域间投入产出表来自于刘卫东等^[37],刘卫东等提供的区域间投入产出表为上述30个地区加西藏共31个地区。在上述成果的基础上:①在测算地区中间消费灰水足迹时,由于2002年和2007年区域间投入产出表为8大区域,本文用各地区3大产业生产值以及式(1)~(5)测算出的各产业灰水足迹,得出各地区单位产值灰水足迹,再利用地区单位产

值灰水足迹与所在区域单位产值灰水足迹的比值将其剥离为30个省份;30个省份的最终消费灰水足迹根据地区不包含出口的最终消费占合并后区域最终消费的比例确定。②在测算地区灰水足迹转移时,本文将2012年区域间投入产出表合并为8个区域。8个区域分别为东北区域(NE)、京津区域(BT)、北部沿海区域(NC)、东部沿海区域(EC)、南部沿海区域(SC)、中部区域(CTR)、西北区域(NW)和西南区域(SW)。根据张亚雄等^[36]的区域和产业划分标准,将2012年中国区域间投入产出表合并为8大区域17个部门(表2)。

1.3.2 各地区分产业灰水足迹所需数据及处理

根据式(1)~(5)测算出农业、工业和生活灰水足迹,其中生活灰水足迹包含城市生活用水产生的灰水足迹和公共用水产生的灰水足迹2部分(含第三产业及建筑业等用水产生的灰水足迹)。本文采取王晓萌等^[21]生活用水与城市居民生活用水的剥离方法,将生活灰水足迹中的城市生活用水产生的灰水足迹剥离。工业、第三产业细分下的灰水足迹数据按照各部门经济产值增加值及经济产值占比同比例求得^[38]。通过以上数据计算各地区的灰水足迹及灰水足迹转移问题。

2 结果分析

2.1 区域灰水足迹格局分析

根据式(13)~(15)测算了2002—2012年中国30个省份的灰水足迹量(表3)。2002、2007和2012年,全国消费产生的灰水足迹总量分别为7765.08亿 m^3 、7792.59亿 m^3 和8323.53亿 m^3 ,呈逐渐上升的趋势。除了总量以外,各地区的灰水足迹情况呈现地区差异现象(图1)。

表2 产业分类

Tab.2 Industry classification

代码	产业	代码	产业
1	农业	10	机械工业
2	采选业	11	交通运输设备制造业
3	食品制造及烟草加工业	12	电器机械及电子通信设备制造业
4	纺织服务业	13	其他制造业
5	木材加工及家具制造业	14	电力、热力及水的生产与供应业
6	造纸印刷及文教用品制造业	15	建筑业
7	化学工业	16	商业及运输业
8	非金属矿物制品业	17	其他服务业
9	金属冶炼及制品业		

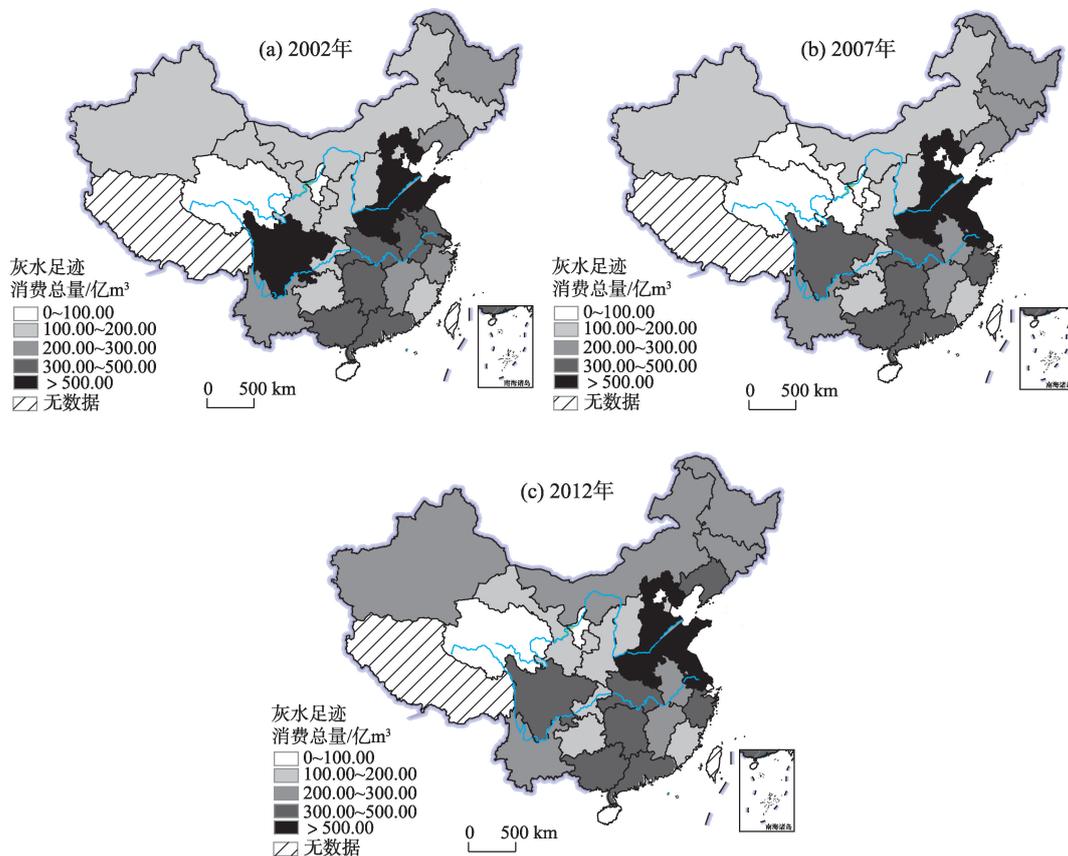
表3 中国30个省份2002—2012年灰水足迹消费计算结果

Tab.3 Calculation results of grey water footprint consumption in 30 provinces of China, 2002-2012 (亿m³)

省份	2002年			2007年			2012年		
	W_{ic}	W_{fc}	W_T	W_{ic}	W_{fc}	W_T	W_{ic}	W_{fc}	W_T
北京	71.96	59.39	131.35	53.44	27.75	81.19	5.00	43.17	48.17
天津	36.75	31.51	68.26	66.14	14.37	80.51	109.53	34.65	144.18
河北	377.04	128.17	505.21	499.53	109.45	608.99	468.23	116.65	584.88
山西	82.08	80.50	162.58	105.52	72.53	178.06	102.85	74.68	177.53
内蒙古	88.42	81.98	170.40	107.17	61.25	168.42	113.82	108.28	222.09
辽宁	114.98	130.60	245.59	184.03	110.40	294.43	198.53	111.74	310.26
吉林	121.19	63.60	184.80	171.29	68.56	239.85	172.89	63.06	235.95
黑龙江	115.24	96.60	211.84	175.65	66.48	242.14	213.59	67.09	280.69
上海	71.96	67.27	139.24	65.95	69.36	135.31	13.08	56.28	69.36
江苏	267.51	123.03	390.54	369.33	140.57	509.90	372.79	149.13	521.92
浙江	197.13	97.86	294.99	242.10	105.71	347.82	216.43	94.45	310.88
安徽	192.30	134.05	326.34	147.56	96.71	244.27	169.25	97.08	266.32
福建	71.99	66.84	138.83	106.00	53.53	159.53	96.50	62.75	159.24
江西	134.39	94.38	228.78	129.62	72.34	201.96	141.12	71.53	212.65
山东	444.27	236.14	680.41	472.34	207.80	680.14	446.03	211.07	657.10
河南	419.28	215.96	635.24	384.22	196.30	580.52	457.03	198.50	655.52
湖北	183.93	172.45	356.38	219.04	123.67	342.71	264.95	125.02	389.97
湖南	269.41	163.55	432.95	311.78	122.46	434.24	320.86	125.64	446.49
广东	178.96	182.62	361.58	240.86	155.91	396.77	220.36	177.31	397.67
广西	205.81	143.17	348.97	268.89	97.45	366.33	267.13	137.42	404.55
海南	50.12	9.57	59.69	77.79	7.14	84.93	76.76	11.52	88.28
重庆	45.43	121.71	167.14	45.56	80.45	126.01	59.63	92.07	151.70
四川	263.46	265.53	528.99	282.72	170.15	452.87	294.06	193.44	487.50
贵州	97.76	87.82	185.58	80.99	55.72	136.71	77.31	64.56	141.87
云南	127.61	132.73	260.34	138.45	88.05	226.49	167.35	114.80	282.15
陕西	83.58	96.42	180.00	88.47	49.29	137.76	100.36	90.73	191.09
甘肃	52.44	51.97	104.40	62.22	24.87	87.09	85.19	36.41	121.61
青海	34.34	21.11	55.45	38.96	8.68	47.63	53.30	16.32	69.61
宁夏	27.34	21.77	49.11	39.65	10.08	49.73	41.23	17.77	59.00
新疆	78.20	81.89	160.09	115.80	34.49	150.29	180.34	54.93	235.27
总和	4504.90	3260.18	7765.08	5291.07	2501.51	7792.59	5505.49	2818.04	8323.53

2002年,山东和河南灰水足迹相对较多,分别为680.41亿m³和635.24亿m³,宁夏和青海灰水足迹相对较少,分别为49.11亿m³和55.45亿m³;2007—2012年各地区灰水足迹总量的分布格局与2002—2007年基本相似,山东最高,宁夏、青海等地灰水足迹较低。上海灰水足迹呈现逐渐减少的趋势,江苏灰水足迹呈现逐渐上升的趋势,其他地区灰水足迹变化幅度不大。从2002—2012年数据来看,山东、河南和河北地区灰水足迹一直处于相对较高的状态,四川地区在2002年灰水足迹超过500

亿m³,之后呈现波动下降的趋势;江苏在2007—2012年间灰水足迹超过500亿m³,在2002—2012年间,呈现逐渐上升的趋势。青海、宁夏和海南地区灰水足迹一直处于相对较少的状态,天津在2002—2007年、北京在2007—2012年、甘肃在2007年、上海在2012年均表现为灰水足迹相对较少(100亿m³以内)的状态。总体来说,灰水足迹较大的省份多为农业较发达地区,如山东、河南,或经济规模较大的省份,如江苏。灰水足迹相对较小的省份多为经济规模小的地区,如青海、宁夏、甘肃,或为水资源



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1599号的标准地图制作,底图无修改。

图1 2002—2012年中国30个省份灰水足迹消费总量

Fig.1 Total consumption of grey water footprint in 30 provinces of China, 2002-2012

消耗量较少的省份,如海南、天津、北京和上海。

2.2 产业灰水足迹格局分析

根据式(13)~(15)测算结果进行整理,得到2002—2012年17产业灰水足迹(表4)。

从产业灰水足迹总量来看农业(产业1)是灰水足迹产生的最大部门,商业及运输业(产业16)、化学工业(产业7)、采选业(产业2)和金属冶炼及制品业(产业9)灰水足迹较大,但其总和却远小于农业灰水足迹;其他制造业(产业13)、木材加工及家具制造业(产业5)、造纸印刷及文教用品制造业(产业6)、建筑业(产业15)和纺织服务业(产业4)灰水足迹一直相对较少,这与产业规模有关,农业和重工业是最大的耗水部门,同时也是灰水足迹产生最大的产业,而轻工业则是灰水足迹产生最少的产业。另外,建筑业是灰水足迹产生较少的产业,第三产业中商业及运输业是灰水足迹产生较大的部门,这与废水排放的现实状况也是相同的。从产业灰水足迹变化幅度来看,农业灰水足迹呈现逐渐增加的趋势(从2002年的5562.71亿 m^3 到2012年的6916.31亿 m^3),

交通运输设备制造业(产业11),电力、热力及水的生产与供应业(产业14)、建筑业以及第三产业灰水足迹呈现逐渐减少的趋势,其他产业灰水足迹变化幅度不大。

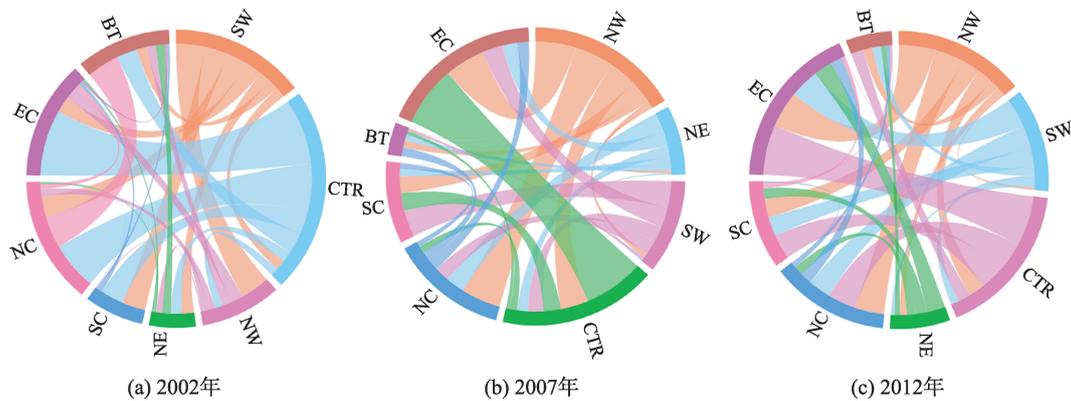
2.3 区域灰水足迹转移分析

根据式(16)计算中国各区域灰水足迹转移,得到2002—2012年各区域灰水足迹随时间的变化情况,并绘制了转移流向关系图(图2),分别以不同的颜色代表8大区域,关系带以灰水足迹流量的大小权衡并对应相应的资源转移区域。

从各区域输入(输出)灰水足迹来看,2002年灰水足迹输出的区域分别为西南区域(SW)和中部区域(CTR),输出量分别为219.09亿 m^3 和299.39亿 m^3 ,其他区域为灰水足迹输入区域。其中转移量最大的2条路径依次为中部区域(CTR)到东部沿海区域(EC)和北部沿海区域(NC),转移量分别为118.48亿 m^3 和86.09亿 m^3 ;2007—2012年灰水足迹输出的区域均为西北区域(NW)、西南区域、东北区域(NE)和中部区域,输出总量比2002年灰水足迹输出总量

表4 中国17个产业2002—2012年灰水足迹消费计算结果
 Tab.4 Calculation results of grey water footprint consumption of 17 industries in China, 2002-2012 (亿m³)

产业代码	2002年			2007年			2012年		
	W_{ic}	W_{fc}	W_T	W_{ic}	W_{fc}	W_T	W_{ic}	W_{fc}	W_T
1	3122.59	2440.12	5562.71	3924.90	1947.89	5872.79	4572.00	2344.31	6916.31
2	178.42	57.58	236.00	285.91	54.15	340.07	139.58	30.11	169.69
3	70.34	79.62	149.96	76.48	59.02	135.50	64.51	40.00	104.50
4	26.84	18.35	45.19	29.75	8.54	38.29	27.33	10.67	38.00
5	6.85	4.24	11.10	11.33	4.49	15.82	9.42	5.13	14.55
6	28.55	11.55	40.10	22.11	5.88	27.99	17.30	6.13	23.43
7	185.03	71.26	256.29	157.97	38.21	196.19	142.21	43.72	185.94
8	35.64	23.80	59.43	45.38	18.12	63.50	36.12	20.57	56.68
9	131.69	57.13	188.82	160.15	45.18	205.33	129.90	47.03	176.93
10	41.57	36.14	77.71	39.18	25.60	64.78	28.36	21.79	50.15
11	57.10	28.68	85.77	41.06	18.23	59.30	22.40	27.18	49.57
12	34.51	33.26	67.78	29.62	16.40	46.01	38.26	22.34	60.60
13	9.81	5.08	14.89	10.52	3.55	14.07	8.89	2.94	11.83
14	162.91	69.37	232.27	133.59	37.38	170.97	80.79	23.63	104.42
15	8.67	58.53	67.19	3.05	31.65	34.70	2.54	29.73	32.28
16	320.09	159.71	479.80	234.54	102.18	336.71	144.24	84.06	228.30
17	84.30	105.77	190.07	85.53	85.05	170.58	41.65	58.70	100.35
总和	4504.90	3260.18	7765.08	5291.07	2501.51	7792.59	5505.49	2818.04	8323.53



注：EC、NC、SC、NE、NW、CTR、SW和BT分别指东部沿海区域、北部沿海区域、南部沿海区域、东北区域、西北区域、中部区域、西南区域和京津区域。

图2 2002—2012年中国各区域灰水足迹转移矩阵流向关系图

Fig.2 Flow pattern of grey water footprint transfer matrix in various regions of China, 2002-2012

多,但是在2007—2012年呈现逐渐下降的趋势,整体来看呈“倒U型”分布;转移量最大的2条路径没有发生变化,分别为中部区域→东部沿海区域、西北区域→东部沿海区域。

从2002—2012年的灰水足迹转移量可以得出结论:第一,灰水足迹净输入区域为京津区域(BT)、北部沿海区域(NC)、东部沿海区域(EC)和南部沿海区域(SC),这与产业结构有着密切的联系,京津区

域、北部沿海区域、东部沿海区域和南部沿海区域第一产业相对薄弱,为满足生产和消费,大部分产品依赖其他地区的转入。众所周知,首先,第一产业是水资源利用率最低的部门,各区域为满足第一产业的发展,水资源投入量大,故灰水足迹产生量最大,尽管京津区域、北部沿海区域、东部沿海区域和南部沿海区域第三产业较为发达,第三产业中的商业及运输业在2002、2007和2012年灰水足迹产

生量分别排在当年的第二名、第三名和第二名,但商业及运输业灰水足迹产生量占当年灰水足迹总量的比例仅为6.18%、4.32%和2.74%。其次,从灰水足迹转移路径来看,2002年灰水足迹转移量较少,转移量最大的2条路径之和仅为204.57亿 m^3 ,2007年灰水足迹转移量最大的2条路径之和为391.1亿 m^3 ,相对2002年来看,转移量变多,交通运输较为便利可能是灰水足迹输出量变多的直接原因;2012年灰水足迹最大的2条路径之和为250.96亿 m^3 ,相对2007年来看,转移量变少,各区域各产业水资源利用效率变高,加强污染控制与地区政策相结合,可能是灰水足迹输出量变少的直接原因。另外,2002—2012年,灰水足迹转移量最大路径均为中部区域到东部沿海区域,这可能与中部区域和东部沿海区域位置相邻、产品或原料转移方便、运输成本降低有关——使得2区域各省区间贸易发展较快,从而彼此间灰水足迹转移现象显著。

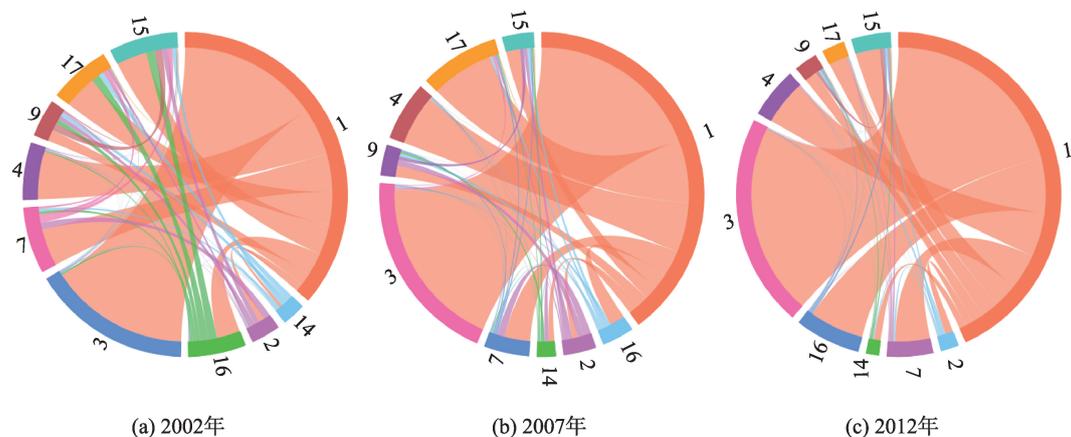
2.4 产业灰水足迹转移分析

根据式(17)和(18)计算中国各产业灰水足迹转移,得到2002—2012年各产业灰水足迹转移随时间变化情况,选取其中灰水足迹净输入或净输出较大的10个产业,并绘制转移流向关系图(图3)。从各产业输入(输出)灰水足迹来看,2002年,农业,采选业,电力、热力及水的生产与供应业和商业及运输业为灰水足迹净输出部门,2007—2012年农业和采选业为灰水足迹净输出部门;2002—2012年,灰水足迹净输出部门呈逐渐减少的趋势。从产业转移分布看,2002、2007和2012年农业灰水足迹净输出量分别为1525.19亿 m^3 、2281.59亿 m^3 和2976.32亿

m^3 ,呈逐渐增加的趋势;除农业外,2002—2012年,采选业一直是灰水足迹净输出部门,2002、2007和2012年灰水足迹净输出量分别为65.54亿 m^3 、117.66亿 m^3 和2.36亿 m^3 ;从产业灰水足迹流动路径来看,输入最明显的路径为农业到食品制造及烟草加工业,2002、2007和2012年农业到食品制造及烟草加工业的灰水足迹分别为643.25亿 m^3 、1087.63亿 m^3 和1448.13亿 m^3 ,有逐年增大的趋势,这与食品制造及烟草加工业十分依赖农业产品有关;农业向纺织服务业、化学工业、建筑业和第三产业输入的灰水足迹量也很大,2002、2007和2012年灰水足迹输入总量依次为792.44亿 m^3 、1055.04亿 m^3 和1327.16亿 m^3 ,也呈现逐年增加的趋势;此外,其他产业均有不同数量的灰水足迹流入建筑业,灰水足迹转移现象较为明显。

3 结论

传统灰水足迹的测算与区域间投入产出表结合应用为缓解水资源压力提供了新的思路和视角,如从产品消费角度改变(减少某些灰水产生较高部门的灰水排放量)、从区域间贸易角度调整(增加灰水产生较少产品的流动、减少灰水产生较多产品的流动)。本文参考已有的灰水足迹研究成果,结合2002、2007和2012年区域间投入产出表,对中国30个省份和17个产业部门中间消费和最终消费灰水足迹进行研究,并在此基础上分析合并后的8大区域和17个产业的灰水足迹转移特点,主要结论如下:



注:图中1, 2, ..., 17表示产业代码。

图3 2002—2012年中国各产业灰水足迹转移矩阵流向关系图

Fig.3 Flow pattern of grey water footprint transfer matrix of various industries in China, 2002-2012

(1) 从区域灰水足迹来看, 2002—2012年, 山东、河南和河北等农业较发达和经济规模较大的地区灰水足迹一直处于相对较高的状态, 四川地区在2002年灰水足迹超过500亿 m^3 , 之后呈现波动下降的趋势; 江苏在2002—2012年间, 灰水足迹呈现逐渐上升的趋势。青海、宁夏和海南经济规模较小的地区灰水足迹一直处于相对较少的状态, 天津在2002—2007年、北京在2007—2012年、甘肃在2007年、上海在2012年出现灰水足迹在100亿 m^3 内的相对较少的状态。

(2) 从产业灰水足迹来看, 2002—2012年, 农业是灰水足迹产生的最大部门, 商业及运输业、化学工业、采选业和金属冶炼及制品业灰水足迹较大, 但其总和却远小于农业灰水足迹, 另外, 第三产业中商业及运输业是灰水足迹产生较大的部门; 其他制造业、木材加工及家具制造业、造纸印刷及文教用品制造业、建筑业和纺织服务业灰水足迹一直相对较少, 这与废水排放的现实状况也是相同的。

(3) 从区域灰水足迹转移来看, 2002—2012年, 灰水足迹净输入区域为京津区域、北部沿海区域、东部沿海区域和南部沿海区域, 这些区域第一产业相对薄弱, 第一产业是灰水足迹产生量最大的产业; 从灰水足迹转移路径来看, 2002—2012年灰水足迹转移量最大的2条路径之和呈现先增加后减少的趋势。另外, 2002—2012年, 灰水足迹转移量最大路径均为中部区域到东部沿海区域, 中部区域和东部沿海区域位置相邻, 产品或原料转移方便, 运输成本降低, 省区间贸易发展的同时使得相邻区域间灰水足迹转移现象显著。

(4) 从产业灰水足迹转移来看, 2002—2012年, 农业和采选业为灰水足迹净输出部门, 大部分轻工业及第三产业为灰水足迹净输入部门。从产业流动路径来看, 输入现象最明显的路径为农业到食品制造及烟草加工业。农业向纺织服务业、化学工业、建筑业和第三产业输入的灰水足迹量也很大, 呈逐年增加的趋势; 此外, 其他产业与建筑业灰水足迹流动现象也较为明显。

参考文献(References)

- [1] 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析 [J]. 生态学报, 2016, 36(1): 86-97. [Sun Caizhi, Han Qin, Zheng Defeng. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading
- coefficient in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 86-97.]
- [2] 国家环境保护部. 中国环境年鉴 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2017. [The Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *China Environment Yearbook*. Beijing, China: China Environment Press, 2017.]
- [3] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard [M]. London, UK: Routledge, 2011.
- [4] 孙才志, 白天骄, 韩琴. 基于基尼系数的中国灰水足迹区域与结构均衡性分析 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2047-2059. [Sun Caizhi, Bai Tianjiao, Han Qin. The regional and structural equilibrium analysis of grey water footprint in China based on Gini coefficient. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2047-2059.]
- [5] 张楠, 李春晖, 杨志峰, 等. 基于灰水足迹理论的河北省水资源评价 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 75-79. [Zhang Nan, Li Chunhui, Yang Zhifeng, et al. Water resources assessment of Hebei Province by grey water footprint. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(1): 75-79.]
- [6] 冯浩源, 石培基, 周文霞, 等. 水资源管理“三条红线”约束下的城镇化水平阈值分析: 以张掖市为例 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 287-301. [Feng Haoyuan, Shi Peiji, Zhou Wenxia, et al. Threshold analysis of urbanization with the constraint of "Three Red Lines" on water resources management: A case study of Zhangye City. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 287-301.]
- [7] Chapagain A M, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [8] Ruini L, Marino M, Pignatelli S, et al. Water footprint of a large-size food company: The case of Barilla pasta production [J]. *Water Resources and Industry*, 2013, 1-2: 7-24.
- [9] Vanham D, Bidoglio G. The water footprint of agricultural products in European river basins [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 64-70.
- [10] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity [J]. *PNAS*, 2011, 109(9): 3232-3237.
- [11] Ercin A E, Hoekstra A Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis [J]. *Environment International*, 2014, 64(3): 71-82.

- [12] Munksgaard J, Wier M, Lenzen M, et al. Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1/2): 169-185.
- [13] 袁野, 胡聃. 基于投入产出方法的中国居民虚拟水消费研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(3): 415-418. [Yuan Ye, Hu Dan. Analysis of domestic virtual water consumption in China: Based on input-output method. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(3): 415-418.]
- [14] 李方一, 刘卫东, 刘红光. 区域间虚拟水贸易模型及其在山西省的应用 [J]. *资源科学*, 2012, 34(5): 802-810. [Li Fangyi, Liu Weidong, Liu Hongguang. Inter-regional virtual water trade model and its application in Shanxi Province. *Resources Science*, 2012, 34(5): 802-810.]
- [15] 谭圣林, 邱玉国, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 355-364. [Tan Shenglin, Qiu Yuguo, Xiong Yujiu. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 355-364.]
- [16] 马忠, 张晓霞. 基于投入产出分析的虚拟水研究综述及展望 [J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(9): 20-24. [Ma Zhong, Zhang Xiaoxia. Review and prospects of virtual water based on input-output analysis. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(9): 20-24.]
- [17] 吴兆丹, 赵敏, Upmanu L. 基于多区域投入产出的我国省区虚拟水流动格局研究 [J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2016, 18(6): 62-70. [Wu Zhaodan, Zhao Min, Upmanu L. 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): 62-70.]
- [18] 曹涛, 王塞鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算 [J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 788-799. [Cao Tao, Wang Saige, Chen Bin. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji region based on multiregional input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 788-799.]
- [19] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究 [J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488. [Cai Zhenhua, Shen Laixin, Liu Junguo, et al. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6481-6488.]
- [20] 王艳阳, 王会肖, 张昕. 基于投入产出表的中国水足迹走势分析 [J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3488-3498. [Wang Yanyang, Wang Huixiao, Zhang Xin. China water footprint trend analysis based on input-output tables. *Acta Ecologica*, 2013, 33(11): 3488-3498.]
- [21] 王晓萌, 黄凯, 杨顺顺, 等. 中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2114-2126. [Wang Xiaomeng, Huang Kai, Yang Shunshun, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2114-2126.]
- [22] 吴兆丹, 王张琪, Upmanu L. 生产视角下的中国水足迹空间差异研究: 基于经济区域分析层次 [J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 2039-2050. [Wu Zhaodan, Wang Zhangqi, Upmanu L. Spatial difference of water footprint in China in the production perspective based on the analytical hierarchy of economic regions. *Resources Science*, 2015, 37(10): 2039-2050.]
- [23] 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 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 76-87. [Wu Zhaodan, Zhao Min, Tian Ze, 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.]
- [24] 郑翔益, 孙思奥, 鲍超. 中国城乡居民食物消费水足迹变化及影响因素 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(1): 17-22. [Zheng Xiangyi, Sun Siao, Bao Chao. Urban and rural water footprints for food consumption in China and governing factor analysis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(1): 17-22.]
- [25] 曾静静, 张志强, 曲建升, 等. 家庭碳排放计算方法分析评价 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(10): 1341-1352. [Zeng Jingjing, Zhang Zhiqiang, Qu Jiansheng, et al. Analysis and evaluation of methods for household carbon emissions calculation. *Progress in Geography*, 2012, 31(10): 1341-1352.]
- [26] 秦耀辰, 李旭, 荣培君. 基于改进EiO-LCA模型的城市旅游业碳排放核算研究: 以开封市为例 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 132-140. [Qin Yaochen, Li Xu, Rong Peijun. Urban tourism carbon accounting based on improved EIO-LCA model: A case study of Kaifeng City in Henan Province. *Progress in Geography*, 2015, 34(2):

- 132-140.]
- [27] 刘莉娜, 曲建升, 黄雨生, 等. 中国居民生活碳排放的区域差异及影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1364-1377. [Liu Lina, Qu Jiansheng, Huang Yusheng, et al. Analyze on the spatial-temporal pattern and influence factors of China's per capita household carbon emissions. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1364-1377.]
- [28] 张红丽, 沈镭, 李艳梅. 京津冀经济活动隐含的碳排放转移: 基于多区域投入产出模型的分析 [J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2287-2298. [Zhang Hongli, Shen Lei, Li Yanmei. Carbon dioxide emission transfers embodied in interregional economic activities in Beijing-Tianjin-Hebei according to multiregional input-output mode. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2287-2298.]
- [29] 李富佳. 区域贸易隐含碳排放转移研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1303-1313. [Li Fujie. Progress and prospects of research on transfer of carbon emissions embodied in inter-regional trade. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1303-1313.]
- [30] 赵忠秀, 闫云凤, 裴建锁. 生产分割、区域间贸易与CO₂排放: 基于IRIO模型的研究 [J]. 管理评论, 2018, 30(5): 47-57. [Zhao Zhongxiu, Yan Yunfeng, Pei Jiansuo. Production fragmentation, interregional trade and CO₂ emissions: An IRIO model approach. *Management Review*, 2018, 30(5): 47-57.]
- [31] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998—2012年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析 [J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. [Han Qin, Sun Caizhi, Zou Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1179-1191.]
- [32] 李丽莉, 肖洪浪, 邹松兵, 等. 甘肃省产业部门用水结构及其效率分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(4): 501-507. [Li Lili, Xiao Honglang, Zou Songbin, et al. Analysis of the structure and efficiency of industrial water consumption in Gansu Province. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(4): 501-507.]
- [33] Correa H, Craft J. Input-output analysis for organizational human resources management [J]. *Omega*, 1999, 27(1): 87-99.
- [34] Chen X K, Guo J, Yang C H. Extending the input-output model with assets [J]. *Economic Systems Research*, 2005, 17(2): 211-225.
- [35] 马忠, 张继良. 张掖市虚拟水投入产出分析 [J]. 统计研究, 2008, 25(5): 65-70. [Ma Zhong, Zhang Jiliang. Analysis on virtual water in Zhangye City using regional input-output model. *Statistical Research*, 2008, 25(5): 65-70.]
- [36] 张亚雄, 齐舒畅. 2002、2007年中国区域间投入产出表 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. [Zhang Yaxiong, Qi Shuchang. *China multi-regional input-output table*. Beijing, China: China Statistics Press, 2012.]
- [37] 刘卫东, 唐志鹏, 韩梦瑶, 等. 2012年中国31省区市区间投入产出表 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. [Liu Weidong, Tang Zhipeng, Han Mengyao, et al. *The 2012 China multi-regional input-output table of 31 provincial units*. Beijing, China: China Statistics Press, 2018.]
- [38] 刘雅婷, 王塞鸽, 陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算 [J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1930-1940. [Liu Yating, Wang Saige, Chen Bin. Virtual water analysis for Beijing based on input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1930-1940.]

Measurement and transfer analysis of grey water footprint of Chinese provinces and industries based on a multi-regional input-output model

SUN Caizhi^{1,2}, YAN Xiaodong²

(1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Water shortage and water pollution have seriously affected human survival and China's sustainable development. Analysis of water pollution in various regions and industries is the key for addressing China's environmental sustainability problem. This study used multiregional input-output tables for 2002, 2007, and 2012 on the basis of traditional greywater footprint research, calculated the process and final consumption grey water footprints of China's 30 provinces, municipalities, and autonomous regions (not including Tibet, Hong Kong, Macao and Tianwan) and 17 industries during 2002–2012, and the total grey water footprint transfer of the eight regions and 17 industries. The results show that: 1) The grey water footprints of large economic areas such as Shandong, Henan, and Hebei have been relatively high, and the grey water footprints of relatively small economies such as Qinghai, Ningxia, and Hainan have been relatively small. 2) Agriculture is the largest sector contributing to grey water footprint. The four industries in the commercial and transportation sectors have large grey water footprints, but their total is far less than the agricultural grey water footprint. The grey water footprints of five industrial sectors, such as other manufacturing industries, have been relatively small. 3) The net input area of grey water footprint is the Beijing-Tianjin region, northern coastal region, eastern coastal region, and southern coastal region. The sum of the two paths with the largest amount of grey water footprint transfer increases first and then decreases. The identified main grey water footprint outflow–inflow area is the central area–the eastern coastal area. 4) Agriculture and mining industry are the net export sectors of grey water footprints. Most light industries and tertiary industries are the net input sectors of grey water footprints. The identified major grey water footprint outflow–inflow sectors include agriculture–food manufacturing and tobacco processing, agriculture–textile services, and agriculture–chemical industries. The grey water footprints generated by various regions and industries and the grey water footprint paths identified for the regions and industries can provide a theoretical basis for reducing grey water production, and provide theoretical support for the rational use of regional and industrial water resources.

Keywords: grey water footprint; multi-regional input-output model; intermediate consumption; final consumption; China