

基于投入产出表的中国水资源消耗结构路径分析

孙才志¹, 郑靖伟^{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:为了解各部门在生产链中水资源的具体消耗路径和在消耗路径中所发挥的作用以及维持生产链中水资源消耗的关键部门, 论文基于2017年投入产出表和相关气象数据, 在农业用水中加入绿水资源消耗量, 利用投入产出模型和结构路径分析(structural path analysis, SPA)法分析中国42个部门水资源消耗的总量和结构, 以及水资源在生产链中消耗的具体路径。结果表明:①城镇居民消费和进口的水足迹最高, 其次为农村居民消费, 大多数水足迹较高的部门, 都是以居民消费为主, 进口水资源弥补了国内部分生产用水的消耗, 但水资源短缺的形势仍然严峻;②生产链前5个层级的水足迹消耗占比为95%左右, 其中部门内部消耗占比最大, 水足迹随层级数的增加而下降, 水资源反馈循环程度较弱;③从部门生产链看, 部门内部的水足迹占比最大, 部门流入和流出水足迹差值较大, 部门之间普遍存在单向依赖特征, 关联网络不够稳定;④从最终消费角度看, 农业部门内部水足迹占比最大, 是生产链中重要的衔接结点, 多样化的消费需求增加上游部门的水资源压力。研究为调整节水政策和提升水资源配置与管理能力提供了一定的理论基础。

关键词:水资源; 水足迹; 投入产出模型; 结构路径分析; 产业链

水资源短缺问题一直是中国重要的社会问题, 社会发展对水资源的需求不断上升, 中国不断提升水资源配置的管理能力来应对现有的水资源问题, 而隐含在商品中的水资源转移作为水资源配置的重要途径之一, 在一定程度上缓解了中国大部分产业的需水问题。在2002年荷兰学者Hoekstra等^[1]提出水足迹概念后, 我们能够从生产和消费的角度掌握各行业水资源的消耗情况以及行业间的水资源传输情况^[2], 基于水足迹研究水资源在生产链中每一层级行业间的具体消耗和传输情况, 对于缓解中国的水资源短缺问题和制定合理的产业节水政策具有重要的意义, 可以为更准确地配置水资源、研究水资源在产业间的具体利用情况提供新的思路。

目前对于各行业水足迹的研究大多集中于水

足迹的占比、强度以及贸易情况。其中, Chen等^[3]分析了2004年全球112个国家的区域水足迹, 得出69%的总取水量与农业部门有关; Zeng等^[4]分析了黑河流域农业部门的总水足迹构成、蓝绿水占比情况; 孙才志等^[5]测算了2012年中国三大产业的水足迹结构及其贸易量; 王晓萌等^[6]、王艳阳等^[7]分析了1997—2007年中国各行业的水足迹及其强度、水足迹消费的产业结构; Liu等^[8]、Dong等^[9]从生产和消费2个角度, 分别对河套灌区和辽宁省各行业的水足迹构成、强度及其贸易进行了评估; 蔡振华等^[10]、谭圣林等^[11]、曹涛等^[12]、Wang等^[13]分别对甘肃省、广东省、京津冀地区和北京的3大产业水足迹及其强度进行了分析, 识别重点耗水部门。目前的研究中, 农业用水在水资源消耗总量中一直占据较大的

收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-06-30。

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(19AJY010)。[Foundation: Key Program of the 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, 主要从事水资源经济与海洋经济地理等方面的研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

*通信作者简介: 郑靖伟(1995—), 女, 河北邯郸人, 硕士生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。

E-mail: m15830066185@163.com

引用格式: 孙才志, 郑靖伟. 基于投入产出表的中国水资源消耗结构路径分析[J]. 地理科学进展, 2021, 40(3): 370-381. [Sun Caizhi, Zheng Jingwei. Structural path analysis of water resources consumption in China based on input-output table. Progress in Geography, 2021, 40(3): 370-381.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.03.002

份额^[14],虽然国内外利用自下而上法计算农业水足迹时,已将蓝水和绿水结合进行研究,但利用投入产出法计算农业水足迹时,一般只考虑蓝水资源的消耗量。而在农业生产过程中,绿水资源发挥着较大的作用,无论是农作物还是畜产品,消耗的绿水资源要远多于蓝水资源,因此,只核算农业中的蓝水资源无法比较准确掌握农业总用水量。除此之外,现有的研究中,只分析单一行业的各类总水足迹与强度,无法掌握该行业在生产链中水资源的具体消耗路径,以及该部门在消耗路径中所发挥的作用,并且,现有的研究只能识别出水资源消耗较大的重点部门,无法掌握维持生产链中水资源消耗的关键部门。而在当前规模经济和集聚经济的作用下,全球的生产链不断被肢解,各个国家承担生产链中的某一环节,产业分工不同,还伴随着关联产业形成产业集群^[15],进而形成不同规模的城市群,城市群中的核心城市不断加强与其它具备优势条件城市的经济联系,最终形成紧密的经济发展网络,推动了各地区的产业转型和经济一体化发展。同时,由于产业的特性差异,不同类型产业的区位选择造成了不同地区产业空间结构的差异^[16],根据这种差异可以掌握生产链中高耗水部门和水资源消耗关键部门的主要生产地,从而因地制宜地制定合理的节水政策。

鉴于此,本文核算了2017年中国42个部门的水足迹,为了能更加准确地分析农业用水量,在农业用水中加入农作物和畜产品的绿水资源消耗

量。利用投入产出模型计算与分析各部门水足迹的差异,进而分析中国目前水资源利用与经济发展的协调关系,以及水资源紧缺情况;运用结构路径分析(structural path analysis, SPA)法对各部门的水足迹进行具体的路径分析,计算水资源在生产链中每一层级的具体消耗情况,阐明生产链中各部门水资源的消耗结构和依赖特征,识别生产链中水资源消耗的关键路径和部门,以及造成水资源压力的关键产业链,以期调整为节水政策和提升水资源配置与管理能力提供一定的理论基础。

1 数据来源

本文以国家统计局最新公布的《2017年投入产出表》为基础数据,根据GB/T4754—2017《国民经济行业分类》标准,将投入产出表中的149个部门合并为42个部门(表1)。各产业用水数据分别来自于《水资源公报》《中国环境年鉴》《中国统计年鉴》《中国畜牧兽医年鉴》和中国气象数据网。第一产业的蓝水数据从《水资源公报》获得;与农作物绿水相关的气象数据(温度、风速、相对湿度、日照时数和降水量)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);与畜牧业绿水相关的数据从《中国统计年鉴》和《中国畜牧兽医年鉴》获得。第二产业和第三产业的各行业用水数据,根据投入产出表中“水的生产和供应业”在不同行业的投入比例确定,其中,城镇生活用水由居民用水和公共用水(含第三产业和建筑业

表 1 各部门及其代码
Tab.1 Sectors and their codes

代码	部门	代码	部门	代码	部门
01	农林牧渔产品和服务	15	金属制品	29	批发和零售
02	煤炭采选产品	16	通用设备	30	交通运输、仓储和邮政
03	石油和天然气开采产品	17	专用设备	31	住宿和餐饮
04	金属矿采选产品	18	交通运输设备	32	信息传输、软件和信息技术服务
05	非金属矿和其他矿采选产品	19	电气机械和器材	33	金融
06	食品和烟草	20	通信设备、计算机和其他设备	34	房地产
07	纺织品	21	仪器仪表	35	租赁和商务服务
08	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	22	其他制造产品	36	科学研究和技术服务
09	木材加工品和家具	23	废品废料	37	水利、环境和公共设施管理
10	造纸印刷和文教体育用品	24	金属制品、机械和设备修理服务	38	居民服务、修理和其他服务
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	25	电力、热力的生产和供应	39	教育
12	化学产品	26	燃气生产和供应	40	卫生和社会工作
13	非金属矿物制品	27	水的生产和供应	41	文化、体育和娱乐
14	金属冶炼和压延加工品	28	建筑	42	公共管理、社会保障和组织

等用水)组成,因此,第三产业用水量通过城镇生活用水减去城市居民生活用水获取。

2 研究方法

本文的研究方法由3部分构成:第一部分是农业绿水的计算方法,包括农作物绿水和畜产品绿水的计算;第二部分是水足迹的计算方法,利用投入产出模型计算水足迹,其中农业部门在原有蓝水资源消耗的基础上,加入第一部分计算得出的绿水资源消耗总量;第三部分是结构路径的计算方法,在水足迹计算的基础上,利用结构路径分析法,计算各部门之间水资源消耗的传输路径。

2.1 农业绿水

绿水是指植物根部的土壤储存的雨水,在本文中,农业绿水由农作物绿水和畜产品绿水构成。农作物绿水运用农作物的蒸发蒸腾量结合耕地面积计算得出。畜产品绿水资源消耗主要是饲料生产中的消耗,由于没有详细的饲料消耗量数据,因此采用韩昕儒等^[17]的饲料粮构成比例计算猪肉、禽肉和禽蛋的绿水资源消耗量;牛肉、羊肉和奶类的饲料主要是牧草和草料,因此参考已有的单位质量虚拟水含量成果进行计算^[18]。

2.1.1 农作物绿水资源消耗总量

对比农作物蒸发蒸腾量和有效降水量,得出绿水资源的消耗总量,公式为:

$$W_g = 10 ET_g \times S \quad (1)$$

$$ET_g = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \quad (2)$$

式中: W_g 为农作物绿水资源消耗总量(m^3); ET_g 为作物需水量中的绿水资源量(mm); 10 为转化系数,将水深(mm)转化为单位面积水量(m^3/hm^2); S 为农作物占地面积(hm^2); ET_c 为作物蒸发蒸腾量(mm); P_{eff} 为有效降水量(mm)。

作物蒸发蒸腾量计算公式为^[19]:

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (3)$$

式中: ET_c 为作物蒸发蒸腾量(mm); K_c 为作物系数; ET_o 为参考作物蒸发蒸腾量(mm)。

利用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量^[20],计算公式为:

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T+273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)} \quad (4)$$

式中: Δ 为水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R_n 为作物表面

的净辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); T 为 2 m 高度处的温度($^\circ\text{C}$); γ 为湿度常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高度处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

由于 FAO 数据库的作物系数是推荐的标准系数,需要用修正公式来确定作物系数 K_c ,其计算公式为^[21]:

$$K_c = K_{c(\text{Tab})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(\text{RH}_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (5)$$

式中: $K_{c(\text{Tab})}$ 为 FAO 数据库的标准作物系数; RH_{\min} 为日最低相对湿度平均值(%); h 为作物生育阶段内的平均高度(m)。

有效降水量是指自然降水储存在土壤中满足作物生长需要的部分降水量^[22],本文利用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)提出的方法计算,公式为:

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} P_{\text{month}} \times \frac{125 - 0.2P_{\text{month}}}{125} & (P_{\text{month}} \leq 250 \text{ mm}) \\ 125 + 0.1P_{\text{month}} & (P_{\text{month}} > 250 \text{ mm}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{month} 为月降水量(mm)。

2.1.2 畜产品绿水资源消耗量

猪肉、禽肉和禽蛋绿水资源消耗量计算公式为:

$$W_A = ET_f \times O \quad (7)$$

式中: W_A 为畜产品绿水资源消耗量(m^3); ET_f 为饲料作物需水量中的绿水资源量(m^3/kg); O 为畜产品消耗各类饲料量(kg)。

牛肉、羊肉和奶类绿水资源消耗量计算公式为:

$$W_A = VW_A \times H - VW_D - VW_S \quad (8)$$

式中: VW_A 为畜产品单位质量的虚拟水含量(m^3/kg); H 为畜产品重量(kg); VW_D 为畜产品生长周期内的饮用虚拟水(m^3); VW_S 为畜产品生长周期内的服务虚拟水(m^3)。

2.2 水足迹

水足迹的测算是在投入产出表的基础上,加入了水资源消耗量^[23],并且农业用水在蓝水的基础上,加入了农畜产品的绿水资源,修正了现有基于投入产出模型研究中关于农业部门的直接用水系数,使评价结果更符合实际。

(1) 直接消耗系数

$$A = (A_{ij}) = \frac{x_{ij}}{X_i} \quad (9)$$

式中: A 为直接消耗矩阵; A_{ij} 为直接消耗系数; x_{ij} 为 i

部门向 j 部门的中间投入; X_i 为 i 部门的总产出。

(2) 直接用水系数

$$\sigma = (\sigma_i) = B_i / X_i \quad (10)$$

式中: σ 为直接用水系数矩阵; σ_i 为 i 部门的直接用水系数; B_i 为 i 部门的用水量。

(3) 完全用水系数

$$\delta = (\delta_i) = \sum \sigma(I-A)^{-1} \quad (11)$$

式中: δ 为完全用水系数矩阵; δ_i 为 i 部门的完全用水系数; I 为单位矩阵; A 为中间投入的直接消耗矩阵。

(4) 总水足迹

$$W_Z = \delta(Y_N + Y_C + Y_G + Y_X + Y_E + Y_I) \quad (12)$$

式中: W_Z 为水足迹总量; Y_N 、 Y_C 、 Y_G 、 Y_X 、 Y_E 、 Y_I 分别为农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、资本形成总额、出口和进口矩阵。

2.3 结构路径分析

结构路径分析(SPA)是由Defourny等^[24]在1984年首次提出。该方法通过产业间的生产联系,能够将特定产业或产品在生产过程中的水资源消耗分解为无穷多条流动路径,为经济系统和生产链提供更加详细的关联路径。一个经济系统由多个因子组成,一个因子发生变化,系统中的其他关联因子也会相应地发生变化^[25],而被影响的因子又会使其他因子发生变化。因此,结构路径分析法能够反映经济系统中的某一影响,从产生的起点到终点的传输过程,将部门间的流量分解为多条路径^[26],每个部门为一个结点,结点与结点之间的流量联系可用路径表示。

本文利用SPA分析各部门在生产过程中的水资源消耗路径,并且找出生产过程中水资源消耗的关键路径和部门。SPA是在式(11)的基础上,将剔除进口后的列昂惕夫逆矩阵展开,与最终需求矩阵相乘得到:

$$S = \sigma(I-A)^{-1}Y \\ = \sigma IY + \sigma AY + \sigma A^2Y + \sigma A^3Y + \dots + \sigma A^nY \quad (13)$$

式中: S 为路径总值(影响大小), σA^nY 表示来自第 n 层流动路径的路径影响。由于列昂惕夫逆矩阵展开是无穷次幂,因此每条路径的层数是无穷的,本文以42个部门为结点,每一层有 $n+1$ 个结点^[27],并且路径值随长度的增加不断减少,因此需要对生产链进行适当的截断,当结点的路径值低于指定的阈值时,则从路径中排除该结点以及剩下的结点,故选择有限数量的结点和路径值非常重要^[28]。本文

根据计算的结果,结合现有研究,选取0.001%为阈值^[27],路径长度限制为6个结点。

3 结果分析

3.1 总水足迹构成

本文在投入产出表的基础上计算2017年水足迹,并将得到的结果与已有相关的文献对比,发现农业绿水与以往的研究结果相近^[29],而总水足迹由于在农业用水数据中加入了绿水资源消耗量,比之前的结果偏大^[5-6,23],但属于正常的增长幅度。总水足迹构成如表2所示。

从整体来看,2017年中国水足迹总量为12067.29亿 m^3 ,其中城镇居民消费和进口水足迹最高,分别占水足迹总量的39.31%和19.48%,其次为农村居民消费,占比为14.64%。居民消费水足迹占总水足迹的一半以上,说明居民消费总量的高低是影响中国水足迹的主要原因,特别是城镇居民消费。从分类来看,基于中国生产的水足迹(剔除进口)为9716.35亿 m^3 ,而国内消费的水足迹(剔除出口)为10380.38亿 m^3 ,净输入水足迹664.03亿 m^3 ,与孙才志等^[5]的结果(2012年净输入水足迹为261.3亿 m^3)对比,输入水足迹增长幅度较大,进口水资源弥补了国内部分生产用水的消耗,在经济发展中发挥的作用越来越大。从产业水足迹构成来看,部门01(农林牧渔产品和服务)的水足迹最高,占水足迹总量的39.67%,其次为部门12(化学产品),占总量的13.93%,多数产业水足迹较高的部门,都是以居民消费为主,如部门01、部门06(食品和烟草)、部门29(批发和零售)等,而少数部门的产业水足迹是以其他消费为主,表明水足迹的构成与大小因使用人群的不同消费倾向而不同,同时,造成这种不同的原因不仅与中国的消费模式相关,部门不同的社会特性和经济发展的产业结构也在很大程度上影响各部门产业水足迹的构成,因此,在改善产业用水时,要根据各部门的不同消费主体,制定合理的节水政策。

目前国际上普遍采用30%为水资源的合理开发利用率^[30],一旦某区域的水资源开发利用率超过30%,人类和自然的协调关系就会遭到不同程度的破坏,同时选取40%为水资源开发利用的上限指标。2017年中国的水资源总量为28761.2亿 m^3 ,生产和消费所消耗的水资源为12067.29亿 m^3 ,占水资

表2 2017年总水足迹构成

Tab.2 Composition of total water footprint, 2017

(亿 m³)

部门代码	农村居民消费	城镇居民消费	政府消费	资本形成	出口	进口	总计
01	1120.71	2266.31	159.78	309.89	154.06	776.49	4787.24
02	0.68	0.45	0	1.31	0.55	12.88	15.87
03	0	0	0	0.96	1.34	85.52	87.82
04	0	0	0	0.14	0.25	30.34	30.73
05	0	0	0	-0.06	0.55	2.23	2.71
06	331.43	926.88	0	30.24	72.29	118.07	1478.91
07	0.51	1.00	0	-0.59	12.69	2.60	16.22
08	7.26	41.66	0	0.07	52.17	8.24	109.40
09	0.86	2.96	0	4.98	8.99	2.12	19.91
10	1.87	9.44	0	2.29	24.14	6.68	44.41
11	1.62	18.17	0	2.35	9.09	14.97	46.21
12	72.69	312.41	0	17.51	535.16	743.59	1681.36
13	0.29	0.87	0	0.18	6.65	2.33	10.32
14	0	0	0	3.61	50.16	81.82	135.59
15	0.55	3.63	0	19.11	40.23	6.56	70.08
16	0.18	0.53	0	49.09	32.32	19.63	101.75
17	0.14	0.89	0	66.85	16.93	17.74	102.55
18	5.62	50.63	0	147.89	26.80	34.86	265.80
19	4.40	15.46	0	40.31	73.21	26.10	159.48
20	7.69	29.88	0	52.38	227.11	179.26	496.33
21	0.21	0.75	0	3.24	6.89	11.41	22.49
22	0.29	0.80	0	0.11	2.26	0.35	3.82
23	0	0	0	0.14	0.43	5.34	5.92
24	0	0	0	0	1.57	0.59	2.16
25	21.01	90.65	0	0	3.16	0.69	115.51
26	0.26	6.73	0	0.15	0	0	7.15
27	8.68	70.52	0	2.37	0	0	81.57
28	0	0	0	139.17	0.53	0.37	140.07
29	50.17	174.16	0	100.90	172.59	0	497.81
30	41.04	158.72	40.03	50.76	105.78	82.25	478.59
31	6.37	53.20	0	0	1.63	14.56	75.76
32	5.04	21.24	0	59.71	6.41	5.53	97.93
33	36.98	294.92	18.86	0	9.69	22.67	383.13
34	29.55	101.95	0	39.04	0	0	170.54
35	1.22	37.51	15.65	0	26.58	19.24	100.20
36	0.17	0.92	20.13	35.33	3.31	6.98	66.84
37	1.17	6.35	59.63	0	0.89	5.96	74.00
38	5.83	35.64	0	0	0.09	0.83	42.39
39	0.77	2.69	4.20	0	0	0.06	7.72
40	0.31	1.43	3.09	0	0.01	0.04	4.88
41	0.69	4.70	4.28	0	0.39	1.95	12.01
42	0.01	0.15	13.87	0	0.03	0.06	14.12
总计	1766.26	4744.22	339.53	1179.43	1686.91	2350.94	12067.29

源总量的41.96%，其中进口的水资源占8.17%，但基于中国生产消耗的水资源(剔除进口)占水资源总量的33.79%，其中出口的水资源占5.87%，虽然中国的水资源开发利用率高出合理开发率的3.79%，不断向合理范围靠拢，经济类型也从耗水型逐渐向节水型过渡，但是生产和消费的总用水量却超出了上限指标，表明中国水资源紧缺的形势依然严峻，而进口水资源在一定程度上平衡了中国社会经济发展和水资源开发利用的协调关系，同时，为满足中国生产和消费的需求，以及缓解中国的水资源压力，进口水资源总量不断增加。出口的水资源虽然也呈上升的趋势，但并没有进口水资源的上升幅度大，尽管2017年中国的出口贸易值要远大于进口值，但出口水足迹却远小于进口水足迹，表明中国的出口贸易结构得到一定的改善，在一定程度上也减少了国内水资源消耗的压力。

3.2 生产链的结构路径分析

为了进一步阐明各部门水资源消耗的具体分配情况，以及是否维护和增加生产链中的反馈流(水资源的消耗量)，表3列出前5个层级的水足迹占比情况，其中，第0层级表示部门内部对水资源的直接消耗，第1层级表示两个部门之间水资源传输的间接消耗，第2层级表示3个部门之间水资源传输的间接消耗，其他层级依次递加。

表3显示，前5个层级占各消费水足迹总量的95%左右(出口除外)，第0层的占比最大(出口除外)，特别是农村居民消费，占比高达水足迹总量的一半以上，说明在水资源传输系统中，大多数水资源消耗体现在部门内部直接消耗中，而传输到其他部门的水资源减少，水资源从起始部门开始逐渐从生产链中损耗，使得水资源在经济系统的反馈循环强度较弱，而居民的消费需求也是造成这种现象的直接原因之一。水足迹占比随着层级数的增加而

逐渐下降，第1到第3层级的水足迹在间接消耗的水足迹中占比较高，特别是出口水足迹，说明水资源在生产链的前3个层级或前4个部门之间的反馈循环程度较高，大部分水资源能通过生产链反馈到下游部门。因此，在进行水资源管理时，应综合考虑在相互关联的生产过程中间接影响的复杂性对各部门输出和输入水足迹的构成和大小的影响，还应特别注意部门内部的水资源反馈程度，增加生产过程中水资源系统的反馈循环程度。

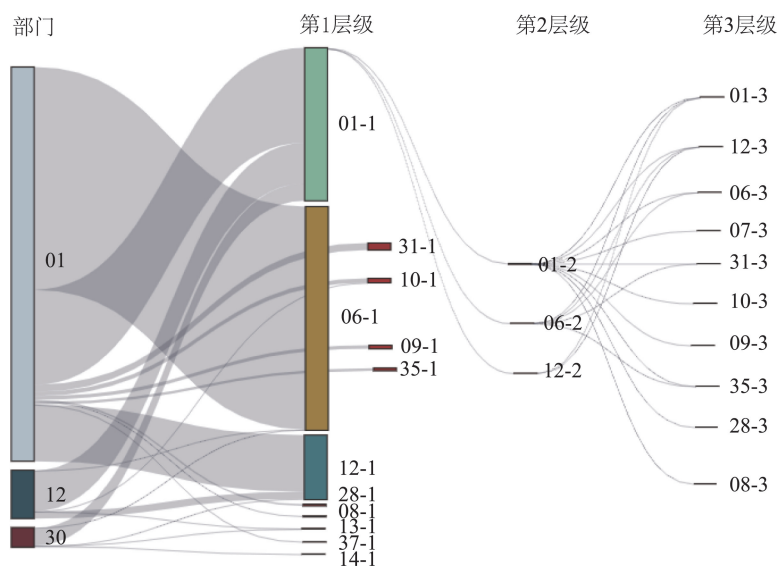
3.2.1 部门生产链

选取3个具有不同代表性类型的部门进一步详细说明水资源在生产链中的传输过程，部门01(农林牧渔产品和服务)、12(化学产品)、30(交通运输、仓储和邮政)的水足迹传输结构路径由图1所示。由于个别部门的路径值小于阈值，因此不在图中显示，且不评估这些部门的作用和影响。

图1表明，水资源在生产链的间接消耗中，第1层级的水足迹占比最大，传输到第2和第3层级的水足迹逐渐减少，绝大部分传输到第3层级的水足迹都低于1000 m³，说明在生产过程中，水资源在生产链中的反馈循环程度较低，且集中在第1层级(2个部门之间)，水资源在部门间的反馈循环程度随生产链层级的增加而大幅度下降，从而使得每一层级的传输都需要额外大量的水资源重新投入到生产链中。部门01在4条生产链中流入和流出水足迹都比较大，其次为部门12，部门30均为流出的水足迹，部门06流入的水足迹远大于流出的水足迹，其余部门均为流入的水足迹，说明在中国的生产链中，绝大部分部门的水资源消耗是一个单向依赖的过程，依赖程度较大，仅有个别部门的水资源消耗存在共生的过程，即相互依赖，例如部门01和12之间，水足迹在2个部门之间的流入流出差距较小，这种单向依赖使得部门间水资源传输的关联网络不

表3 各层级水足迹占比
Tab.3 Proportion of water footprint at each level (%)

层数	农村居民	城镇居民	政府	资本形成	出口
0	50.92	40.35	43.54	26.99	11.71
1	21.69	25.08	26.93	26.54	28.30
2	11.62	14.10	11.93	19.45	20.35
3	6.37	8.06	6.77	11.34	13.70
4	3.66	4.75	4.09	8.42	9.04
5	2.18	2.88	2.51	5.42	5.93
总和	96.44	95.23	95.77	98.17	89.03



注:01-1表示部门01第1层级,其余类推。

图1 各部门水足迹的结构路径

Fig.1 Structural path of water footprint of each sector

够稳定。

结合表3和图1可以看出,生产链中水资源消耗的主要路径是部门内部直接消耗和第1层级(2个部门之间)消耗,其中部门内部直接消耗是最关键的路径,投入的水资源绝大部分存储在部门内部,满足部门的发展所需,而生产链的末端大多属于下游制造业和服务业,对上游产业依赖较大。尽管部门内部水资源的存储是生产链中反馈循环的开始,存储量越多,反馈循环的层级数量越多,但中国目前的生产链中,部门内部直接消耗和流出水足迹差值较大,存储量并没有充分发挥其促进作用,只增加和维护生产链中的反馈流并不能达到中国的节水目标,因此,为了降低生产链中水资源的消耗,不仅要改善部门内部的用水量,还应加强部门间的生产关联程度,提高水资源在生产链中的反馈循环程度。部门间耗水量的相互依赖关系表明,被依赖部门维持生产链的稳定运行,依赖部门的高需求拉动作用,使得被依赖部门的需求量随之增多,生产过程的耗水量也随之增多,在一定程度上增加了被依赖部门的水资源压力,因此,需要从生产和消费的角度共同衡量部门耗水量,节水政策也应充分考虑上下游部门之间的关联性。

3.2.2 居民消费

由城镇居民和农村居民消费引起的传输过程如表4所示,表中列出前20条生产路径和相应的路径值。

居民消费水足迹最高的路径是部门01的内部直接消耗,分别为872.4529亿 m^3 和1764.2864亿 m^3 ,并且在其他路径中,部门01出现的频次最高,其次为部门06,说明在居民消费水足迹的结构路径中,部门01和06链接并促进了其他部门的水足迹占比,带动了其他部门的发展,是生产链中重要的衔接结点,也说明对部门01和06的依赖程度较高。例如第3条路径,部门01的部分产品作为原料传输到部门01进行其他产品的生产,水资源也随之传输,然后再把生产的部分产品投入到部门01,最后传输到部门06被消费,部门01在从生产的角度贯穿整个生产链,部门06从消费的角度拉动了生产链中水资源的消耗。从每条生产链的最终部门来看,居民消费主要集中在部门01、06、12、37(水利、环境和公共设施管理),大多属于下游制造业和服务业,与居民日常生活紧密联系较多。

对比农村居民和城镇居民消费水足迹的结构路径可知,虽然消费倾向大致相同,但是水足迹总值存在一定的差距。对比相同生产链路径的水足迹,城镇居民仍是农村居民的2倍左右,表2中城镇居民消费水足迹在总水足迹中占比最高,表明城镇居民消费需求是导致生产链中水资源投入和消耗增加的重要因素,在前20条路径中,以部门01为起点,不同部门为终点的路径中,城镇居民消费的路径数量要多于农村居民,表明城镇居民的消费需求更加多样化,但这种多样化的消费需求通过生产链,给上游的

表4 居民消费水足迹的结构路径

Tab.4 Structural path of residents' consumption water footprint (亿 m³)

农村居民消费			城镇居民消费		
顺序	传输路径	路径总值	顺序	传输路径	路径总值
1	01	872.4529	1	01	1764.2864
2	01→01→01→01→01	134.1873	2	01→01→01→01→01	271.3553
3	01→01→01→06	131.8770	3	01→01→01→06	266.7096
4	01→01→01→12	131.8452	4	01→01→01→12	266.6240
5	01→01→01→37	131.8438	5	01→01→01→37	266.6183
6	01→01→01→08	131.8437	6	01→01→01	266.6151
7	01→01→01	131.8434	7	01→01→06→01→01	244.2496
8	01→01→06→01→01	120.6863	8	01→01→06→06	236.1073
9	01→01→12→01	116.6728	9	01→01→06→27	235.9902
10	01→01→06→06	116.6391	10	01→01→12→01	235.9723
11	01→01→06	116.5892	11	01→01→06→31	235.9694
12	01→01→12	116.3532	12	01→01→06	235.9561
13	01→01→37	116.3360	13	01→01→12→27	235.3428
14	01→01→08	116.3356	14	01→01→12→12	235.3402
15	01→01	116.3317	15	01→01→12→08	235.3178
16	06→01→01→01→01	87.2082	16	01→01→37	235.2711
17	06→01→01→06	85.7067	17	01→01→08	235.2699
18	06→01→01→12	85.6861	18	01→01→09	235.2606
19	06→01→01	85.6851	19	01→01→31	235.2595
20	12→01→01→01	81.5829	20	06→01→01→01→01	176.3536

起始部门增加了水资源压力,起始部门需要更多的存储量才能满足各部门间的反馈流需求。

3.2.3 政府、资本形成和出口

表5列出了由政府 and 资本形成构成的前20条生产路径及路径值。部门01的内部直接消耗在政府和资本形成水足迹的结构路径中最大,分别为124.3881亿m³和282.4303亿m³。政府消费水足迹的结构路径中,部门01、06和37出现频次较高,是重要的衔接结点,并且生产链的最终部门大多属于第三产业,这与政府的工作性质有很大的关联,为保障民生和市场的稳定性,需要在基础设施和服务中投入较多,才能使社会和经济系统良好地运作,因此也会耗费大量的水资源,同时,这些部门高度依赖上游产业的支撑,水资源通过生产链主要流向部门37、36(科学研究和技术服务)、41(文化、体育和娱乐)。资本形成水足迹的结构路径中,部门01和06是重要的衔接结点,生产链最终流向的部门以第一产业和第二产业为主,其中部门01和06出现的频次最高,资本投入较多,所消耗的水资源也较多。

出口水足迹的前20条结构路径如表6所示,部门01的内部直接消耗在出口水足迹的结构路径中

占比最大,为119.9339亿m³,部门01和部门12在结构路径中出现频次最高,同时也是重要的衔接结点,水资源通过部门01和12最终流向的部门大多为制造业。从路径值来看,虽然中国的出口贸易结构不断优化,但农业和制造业出口仍占较大比例,且出口产品大多为初级产品和工业制成品,耗费大量水资源,因此,还应继续调整中国的出口产品结构,减少高耗水产品的出口占比。

综上所述,可以看出农业的水足迹在不同消费主体中消费最多,并且在生产链中发挥着重要的衔接作用,从而使得农业生产地的用水需求量增多,农业的用水压力也随之增大。中国重要的商品粮基地,如黑龙江、河南、湖北、湖南、四川、广东等,优越的区位条件适宜农业布局,从而形成了不同规模的产业集群,农产品通过生产链传输到其他省份,不仅满足了其他省份生产和消费的需求,也缓解了水资源紧缺的压力,但是,对于农业生产地来说,各省份对农产品需求量的不断增加,以及农业在生产链中重要的衔接作用,使得生产地成为各省之间经济联系的重要“支柱”,同时,也增加了生产地水资源消耗的压力。

表5 政府和资本形成水足迹的结构路径
Tab.5 Structural path of government and capital forming water footprint (亿 m³)

政府			资本形成		
顺序	传输路径	路径总值	顺序	传输路径	路径总值
1	01	124.3881	1	01	282.4303
2	01→01→01→01→01	19.1315	2	01→01→01→01→01	37.1040
3	01→01→01→37	18.8268	3	01→01→01→06	36.4589
4	01→01→01→36	18.7973	4	01→01→01→09	36.4588
5	01→01→01→41	18.7973	5	01→01→01→12	36.4564
6	01→01→37→37	16.8149	6	01→01→01→28	36.4561
7	01→01→37→01	16.8099	7	01→01→01	36.4560
8	01→01→37→42	16.8075	8	01→01→06→01→01	33.3239
9	01→01→37	16.8074	9	01→01→06→06	32.1948
10	01→01	16.5857	10	01→01→06→17	32.1921
11	06→01→01→01→01	12.4335	11	01→01→06	32.1900
12	06→01→01→37	12.2355	12	01→01	32.1668
13	06→01→01→36	12.2163	13	06→01→01→01→01	24.1139
14	06→01→01	12.2163	14	06→01→01→06	23.6946
15	12→01→01→01	11.6315	15	06→01→01	23.6929
16	12→01→01→37	11.4699	16	12→01→01→01	22.5584
17	12→01→01	11.4519	17	12→01→01→06	22.2119
18	06→01→37→37	10.9280	18	12→01→01	22.2118
19	06→01→37→01	10.9247	19	06→01→06→01	21.5705
20	06→01→37	10.9232	20	06→01→06→01	20.9202

表6 出口水足迹的结构路径
Tab.6 Structural path of export water footprint (亿 m³)

顺序	传输路径	路径总值
1	01	119.9339
2	01→01→01→01→01	18.4085
3	01→01→01→12	18.1393
4	01→01→01→06	18.1315
5	01→01→01→07	18.1305
6	01→01→01	18.1246
7	01→01→06→01→01	16.5445
8	01→01→12→12	16.1506
9	01→01→12→01	16.1499
10	01→01→12	16.1051
11	12→12→12→12→12	16.0889
12	01→01→06→12	16.0733
13	01→01→06→08	16.0677
14	01→01→06→06	16.0589
15	01→01→07	16.0391
16	01→01→09	16.0313
17	01→01→08	16.0198
18	01→01→22	16.0066
19	01→01→10	16.0009
20	12→12→12→01→01	15.6355

4 结果与讨论

(1) 从整体来看,城镇居民消费和出口的水足迹最高,其次为农村居民消费,居民消费总量的高低是影响中国水足迹的主要原因;大多数水足迹较高的部门,都是以居民消费为主,水足迹的构成与大小因不同使用人群的消费倾向而不同,不同部门水足迹的构成和大小与中国的消费模式、产业结构和产业特性有很大的关系;国内消费的水足迹远高于基于中国生产的水足迹,进口水资源在一定程度上弥补了国内部分生产水资源的消耗,但中国水资源开发利用仍高于合理开发利用,水资源紧缺形势依然严峻。

(2) 生产链的前5个层级所消耗的水足迹占各总水足迹的95%左右(出口除外),其中第0层级消耗的水足迹最高,占各总水足迹的一半左右(出口除外),水资源消耗的关键路径以部门内部直接消耗为主,并从起始部门开始逐渐从生产链中损耗;水资源在经济系统的反馈循环强度较弱,水足迹随层级数的增加而下降,前3个层级的间接水足迹消耗占比较大,因此,在进行水资源管理时,不仅要考

虑各部门之间的产业关联,还要提高部门内部水资源利用率,增加生产过程中水资源系统的反馈循环程度。

(3) 从部门生产链看,部门内部水足迹在生产链总水足迹中占比最大,逐级减少,水资源在生产链中的反馈循环程度较低;部门流入和流出水足迹差值较大,绝大多数部门之间,水资源消耗是一个单向依赖的过程,只有少数存在共生的过程,部门间水资源传输的关联网络不够稳定;生产链中水资源消耗的关键路径是部门内部直接消耗和第1层级消耗,农林牧渔产品和服务、食品和烟草是生产链中水资源消耗的关键部门,生产链的末端大多属于下游制造产业和服务业;部门内部水资源的存储是生产链反馈循环的开始,但存储量并没有充分发挥促进作用,因此,需改善部门内部用水量和用水效率,并不断加强部门之间的生产关联程度。

(4) 从最终消费角度看,部门内部直接消耗水足迹在结构路径中占比最大。农林牧渔产品和服务、食品和烟草在生产链中出现频次较多,是重要的衔接结点,特别是农业部门,但高需求量和重要的衔接作用也增加了农业生产地水资源消耗的压力,由于缺乏多区域投入产出的数据,在本次研究中无法详细分析各省份在生产链中所发挥的作用。在居民消费水足迹中,生产链的最终部门大多属于下游制造业和服务业,多样化的消费需求给上游起始部门增加了水资源压力;政府消费水足迹的结构路径中,生产链的最终部门大多属于第三产业,并且高度依赖上游部门的支撑;资本形成的结构路径中,生产链最终流向的部门以第一产业和第二产业为主;出口水足迹中,农业和制造业占据较大比例,仍需加强调整中国的出口贸易结构。

参考文献(References)

- [1] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [C]// Hoekstra A Y. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade: Value of water research report series, No. 12. IHE Delft, the Netherlands, 2003: 1-244.
- [2] 马忠, 苏守娟, 龙爱华, 等. 塔里木河流域社会经济系统水循环分析 [J]. 地球科学进展, 2018, 33(8): 833-841. [Ma Zhong, Su Shoujuan, Long Aihua, et al. Water cycle analysis of social and economic system in Tarim River Basin. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(8): 833-841.]
- [3] Chen Z M, Chen G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 142-149.
- [4] Zeng Z, Liu J, Koenenman P H, et al. Assessing water footprint at river basin level: A case study for the Heihe River Basin in Northwest China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2771-2781.
- [5] 孙才志, 刘淑彬. 基于MRIO模型的中国省(市)区水足迹测度及空间转移格局 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 945-956. [Sun Caizhi, Liu Shubin. Water footprint and space transfer at provincial level of China based on MRIO model. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 945-956.]
- [6] 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.]
- [7] 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 Sinica*, 2013, 33(11): 3488-3498.]
- [8] Liu J, Sun S K, Wu P T, et al. Evaluation of crop production, trade, and consumption from the perspective of water resources: A case study of the Hetao Irrigation District, China, for 1960-2010 [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 1174-1181.
- [9] Dong H J, Geng Y, Sarkis J, et al. Regional water footprint evaluation in China: A case of Liaoning [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 215-224.
- [10] 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.]
- [11] 谭圣林, 刘祖发, 熊育久, 等. 基于多区域投入产出法的广东省水足迹研究 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1564-1570. [Tan Shenglin, Liu Zufa, Xiong Yujiu, et al. Evaluation of water footprint for Guangdong Province in an interregional input-output framework. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9): 1564-1570.]
- [12] 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 [J]. 生态学报, 2018, 38(3): 788-799. [Cao Tao, Wang Saige, Chen Bin. Virtual water anal-

- ysis for the Jing-Jin-Ji region based on multiregional input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 788-799.]
- [13] Wang Z Y, Huang K, Yang S S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 172-179.
- [14] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 135-141. [Huang Jing, Wang Xuechun, Chen Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 135-141.]
- [15] 罗奎, 李广东, 劳昕. 京津冀城市群产业空间重构与优化调控 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 179-194. [Luo Kui, Li Guangdong, Lao Xin. Spatial reconstruction and optimization of industrial development in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 179-194.]
- [16] 刘汉初, 樊杰, 张海朋, 等. 珠三角城市群制造业集聚与产业空间格局变动 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 195-206. [Liu Hanchu, Fan Jie, Zhang Haipeng, et al. Dynamics of manufacturing industry and change of its spatial pattern in the Pearl River Delta urban agglomeration. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 195-206.]
- [17] 韩昕儒, 陈永福, 钱小平. 中国目前饲料粮需求量究竟有多少 [J]. *农业技术经济*, 2014(8): 60-68. [Han Xinru, Chen Yongfu, Qian Xiaoping. What is the current demand for feed grain in China. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2014(8): 60-68.]
- [18] 孙才志, 张蕾. 中国农畜产品虚拟水区域分布空间差异 [J]. *经济地理*, 2009, 29(5): 806-811. [Sun Caizhi, Zhang Lei. Research on the primary crop-livestock product virtual water regional disparities in China. *Economic Geography*, 2009, 29(5): 806-811.]
- [19] 高超, 李学文, 许莹, 等. 淮河流域蚌埠闸以上地区夏玉米生育阶段水分供需时空变化特征研究 [J]. *地理研究*, 2019, 38(7): 1833-1846. [Gao Chao, Li Xuewen, XU Ying, et al. Spatial and temporal variations of water supply and demand during the growth stage of summer maize above the Bengbu Sluice in the Huaihe River Basin, China. *Geographical Research*, 2019, 38(7): 1833-1846.]
- [20] 金昕. 彭曼公式在作物需水计算中的应用 [J]. *江淮水利科技*, 2018(1): 28-30. [Jin Xin. Application of Penman formula in calculation of crop water requirement. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2018(1): 28-30.]
- [21] 刘春伟, 吴心语, 邱让建. 采用作物系数法和PM模型估算南京地区玉米田蒸发蒸腾量[J]. *节水灌溉*, 2016(9): 12-17. [Liu Chunwei, Wu Xinyu, Qiu Rangjian. Evaluation of evapotranspiration of maize with crop coefficient and Penman-Monteith methods in Nanjing. *Water Saving Irrigation*, 2016(9): 12-17.]
- [22] 秦娅青, 王锐, 李瑞华, 等. 河南冬小麦—夏玉米生产耗水结构及其时空差异分析: 基于水足迹视角 [J]. *资源开发与市场*, 2019, 35(8): 1037-1043. [Qin Yaqing, Wang Rui, Li Ruihua, et al. Analysis of water utilization composition and its spatial-temporal differences in winter wheat-summer maize production in Henan Province: Based on water footprint perspective. *Resource Development & Market*, 2019, 35(8): 1037-1043.]
- [23] 孙才志, 郑靖伟. 基于MRIO与SNA的中国水资源空间转移网络分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(1): 9-17. [Sun Caizhi, Zheng Jingwei. Analysis of China's water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1): 9-17.]
- [24] Defourny J, Thorbecke E. Structural path analysis and multiplier decomposition within a social accounting matrix framework [J]. *The Economic Journal*, 1984, 94: 111-136.
- [25] 张琼晶, 田聿申, 马晓明. 基于结构路径分析的中国居民消费对碳排放的拉动作用研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 377-386. [Zhang Qiongjing, Tian Yushen, Ma Xiaoming. Identifying the impetus of Chinese household consumption of carbon emissions in structural path analysis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 377-386.]
- [26] Yang Z, Dong W, Xiu J, et al. Structural path analysis of fossil fuel based CO₂ emissions: A case study for China [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(9). doi: 10.1371/journal.pone.0135727.
- [27] Guan S H, Han M Y, Wu X F, et al. Exploring energy-water-land nexus in national supply chains: China 2012 [J]. *Energy*, 2019, 185: 1225-1234.
- [28] Meng J, Liu J, Xu Y, et al. Tracing primary PM_{2.5} emissions via Chinese supply chains [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(5). doi: 10.1088/1748-9326/10/5/054005.
- [29] 王红瑞, 王军红. 中国畜产品的虚拟水含量 [J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 609-615. [Wang Hongrui, Wang Junhong. Virtual water content of livestock products in China. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 609-615.]
- [30] 雷静, 张琳, 黄站峰. 长江流域水资源开发利用初步研究 [J]. *人民长江*, 2010, 41(3): 11-14. [Lei Jing, Zhang Lin, Huang Zhanfeng. Preliminary study on development rate of water resources in Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2010, 41(3): 11-14.]

Structural path analysis of water resources consumption in China based on input-output table

SUN Caizhi¹, ZHENG Jingwei^{2*}

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

Abstract: In order to grasp the specific consumption path of water resources in the production chain and the role played by each department in the consumption path, as well as grasp the key departments that maintain water consumption in the production chain, this study used input-output models and structural path analysis to analyze the total amount and structure of water consumption in 42 sectors of China and the specific path of water consumption in the production chain based on the 2017 input-output table and related meteorological data, and adding green water consumption to agricultural water use. In this way, we can grasp the specific consumption path of water resources in the production chain and the role played by each department in the consumption path, as well as grasp the key departments that maintain water consumption in the production chain. The results show: 1) Urban residents consume and import are the sectors with the highest water footprint, followed by rural residents. Most sectors with higher water footprints are dominated by residential consumption. Imported water resources make up for the consumption of some domestic production water, but the situation of water shortage is still severe. 2) The water footprint consumption ratio of the first five levels of the production chain is about 95%, of which intra- sectoral consumption ratio is the largest. Water footprint decreases with the increase of the number of levels, and the degree of water resource cycling is weak. 3) With regard to the production chain of sectors, intra- sectoral water footprint accounts for the largest proportion, the difference between the water footprint of sectoral inflow and outflow is large, one-way dependence between sectors is common, and the association network is not stable. 4) From the perspective of final consumption, the internal water footprint of the agricultural sector has the largest proportion, and is an important connection point in the production chain. Diversified consumer demand increases the pressure on water resources in upstream sectors. The study provides a theoretical basis for adjusting water-saving policies and improving water resources allocation and management capabilities.

Keywords: water resources; water footprint; input-output models; structural path analysis; industrial chain