

# 中国省际水足迹空间转移网络特征研究

阎晓东<sup>1</sup> 孙才志<sup>21</sup>

(1. 辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029;

2. 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)

**【摘要】:** 水资源短缺已经严重影响到人类的生存和中国的可持续发展, 分析各地区水资源情况是解决水资源问题的关键。论文利用 2007 和 2012 年区域间投入产出表, 计算中国 30 个地区(未分析西藏、香港、澳门和台湾地区)水足迹转移量, 并结合源-汇系统理论, 从源-汇地分析水资源网络地区间流动格局。最后, 构建生态网络分析模型, 深入分析地区间水足迹的控制、依赖关系以及水资源网络的芬恩循环指数和系统鲁棒性, 结果表明: (1) 水足迹输出量较大的地区为黑龙江和新疆地区, 水足迹输入量较大的地区多为经济规模较大的地区, 如江苏、浙江、广东和山东等。(2) 在源地系统中, 黑龙江等八省区是重要的水足迹源点, 多数源点省区的水足迹外向度系数有减小的趋势, 各地区对水足迹存在强烈的竞争关系。汇地系统中, 汇聚力系数较大的地区为江苏、浙江、山东和广东; 北京和天津的依赖度系数很大, 多数地区的依赖度系数呈现减小的趋势。(3) 黑龙江、新疆等地区对其他地区具有较强的控制关系, 北京、天津等地区对其他地区具有较强的依赖关系。(4) 水资源网络的循环性较差, 2007 和 2012 年仅有江苏和广东地区的贡献率较高; 另外, 整个水资源网络的系统鲁棒性偏向于冗余度更高、效率更低的一侧。各地区水足迹转移和空间格局分析可为解决水资源问题提供理论依据, 同时为地区和产业水资源合理利用提供理论支持。

**【关键词】:** 源-汇系统 生态网络分析模型 水足迹

**【中图分类号】:** TV213 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0602-12

水资源是重要的经济和自然资源, 是人类社会生存发展的重要基础, 水资源问题已成为世界许多国家社会经济可持续发展的战略性问题<sup>[1]</sup>。当今世界, 水资源短缺和水质污染严重制约着经济的发展。2016 年, 全国水资源总消耗量为 3192.9 亿 m<sup>3</sup>, 而人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4 左右, 同年, 中国有 8 个省区的人均水资源量低于 500m<sup>3</sup>, 已经突破缺水的临界线, 水资源短缺的矛盾逐步加剧。水足迹的提出为水资源的研究提供了新的视角, 从产品角度核算人类对水资源的真实需求<sup>[2]</sup>, 将经济和社会的发展与水资源的消耗相结合, 可直观呈现人类活动与水资源之间的联系<sup>[3,4]</sup>。

目前, 对于水足迹的定量分析方法有两种, 分别是自下而上的方法, 如生产树法和自上而下的方法, 如投入产出法<sup>[5,6]</sup>。其中, 投入产出法是 Leontief 等<sup>[7]</sup>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, 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。投入产出分析不仅能反映不同部门间的关系和区域间贸易联系, 还能够区分不同区域产品生产技术的差异性<sup>[8]</sup>, 因此, 得到了非常广泛的应用。刘雅婷等<sup>[5]</sup>和蔡振华等<sup>[9]</sup>分别对北京和甘肃的行业用水特征进行评价, 李方一等<sup>[10]</sup>和谭圣林等<sup>[11]</sup>分别基于单一年份的投入产出模型对虚拟水贸易进行测算。吴兆丹等<sup>[12]</sup>和黄悦<sup>[13]</sup>基于多区域投入产出模型

**作者简介:** 阎晓东(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源评价与管理. E-mail: xdzz0404@163.com

孙才志, E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

**基金项目:** 国家社会科学重点基金项目(19AJY010)

对中国 30 个地区虚拟水空间流动进行测算，但是却没有站在网络视角下对水资源要素进行分析，而源汇系统理论和生态网络分析(ENA)模型可以很好的解决这一问题。国外学者采用投入产出模型对西班牙<sup>[14]</sup>、南非<sup>[15]</sup>、加利福尼亚和伊利诺斯<sup>[16]</sup>用水紧张的国家 and 地区进行研究，分析其经济生产部门用水行为，丰富了虚拟水研究领域。

源-汇系统最开始出现在能源的空间流动当中，部分学者从源-汇角度讨论了煤炭资源空间流动和形成机制<sup>[17,18]</sup>，省际间石油流转的源-汇系统、流场和节点结构以及驱动机制<sup>[19,20]</sup>，分析了天然气的流动类型、集散特征与格局演化<sup>[21]</sup>和电力的空间格局及其演变特征<sup>[22]</sup>。总体来看，源-汇系统多运用在能源流转当中，对其他资源类流转研究相对甚少。因此，本文引入源-汇系统，为水足迹的空间流动研究提供了新的思路。

生态网络分析(ENA)是由 Hannon<sup>[23]</sup>最先提出来的，用来探究系统内部的整体属性，辨识内部区域或产业之间的作用关系，被广泛应用在经济系统当中<sup>[24,25]</sup>。控制分配系数和依赖分配系数可以表征由于资源流动引起的生产部门或地区间的控制依赖关系<sup>[26]</sup>。芬恩循环指数和系统鲁棒性可以表示整个网络系统的循环利用率和系统效率与冗余之间的平衡关系。近年来，有不少学者利用 ENA 分析了能源-水耦合网络<sup>[27~29]</sup>的结构特点，也有部分学者将 ENA 引入到能源网络<sup>[30,31]</sup>系统当中，本文将 ENA 引入到水足迹空间流动当中。

基于此，本文基于 2007 和 2012 年区域间投入产出表，以省区为研究单位，运用区域间投入产出模型构建了中国 30 地区的水资源流动网络，与此同时，结合物流场理论，从源-汇地角度分析水资源网络地区间水足迹流动格局。最后，构建生态网络分析模型，深入分析地区间水足迹的控制、依赖关系以及系统的循环性和鲁棒性，对判定和衡量各地区水足迹特征，建立节水型社会提供参考依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 水足迹空间流动分析

#### 1.1.1 水足迹投入产出模型的构建

水足迹投入产出模型构建是在多区域投入产出模型的基础上，加入各地区各产业水资源消耗量，具体计算方式参考孙才志等<sup>[32]</sup>，公式如下：

(1) 各省区各部门的直接消耗系数：

$$A = [a_{ij}^{hk}], \quad a_{ij}^{hk} = \frac{x_{ij}^{hk}}{X_j^k} \quad (1)$$

式中：A 为直接消耗矩阵； $a_{ij}^{hk}$  为直接消耗系数； $x_{ij}^{hk}$  表示 k 区域 j 部门对 h 区域 i 部门产品的投入和使用； $X_j^k$  表示 k 区域 j 部门的总产出。

(2) 各省区各部门的直接用水系数：

$$\sigma = [\sigma_j^k], \quad \sigma_j^k = \frac{W_j^k}{X_j^k} \quad (2)$$

式中： $\sigma$  为直接用水系数矩阵； $\sigma_j^k$  为 k 地区 j 部门的直接用水系数； $W_j^k$ 、 $X_j^k$  分别代表 k 地区 j 部门的直接用水量和总产出。

完全用水系数，满足最终需求的产品在整个生命周期中单位用水量，本文用直接用水系数与列昂惕夫逆矩阵相乘得到：

$$\delta = [\delta_j^k], \delta_j^k = \sum_k \sum_j \sigma_j^k [I - A^{kk}]^{-1} \quad (3)$$

### 1.1.2 水足迹空间流动计算方式

作为缓解水危机的一种新途径，研究者们从不同尺度揭示了贸易中体现的水足迹特征和虚拟水流量，从而从不同角度给出了缓解水危机的政策含义<sup>[33,34]</sup>，具体计算公式如下：

居民消费水足迹：

$$W_{hc} = \delta (y_{hc-r} + y_{hc-u}) \quad (4)$$

政府消费水足迹：

$$W_g = \delta y_{gc} \quad (5)$$

固定资本形成水足迹

$$W_f = \delta y_{cf} \quad (6)$$

式中： $y_{hc-r}$ 、 $y_{hc-u}$ 、 $y_{gc}$  和  $y_{cf}$  分别指的是农村居民消费支出、城镇居民消费支出、政府消费支出和固定资本形成； $\delta$  为完全用水系数。

### 1.2 水足迹源-汇点强度刻画

源点强度是利用物流场强度指标刻画的<sup>[22,35]</sup>，本文采取影响力系数 ( $II^k$ ) 和外向度系数指标 ( $EI^k$ )。影响力系数定义为源点的水足迹输出量 ( $O^k$ ) 与全国省际间水足迹总流量 ( $E_T$ ) 的比值，表明源点在全国水资源市场的重要程度；外向度系数定义为源点的水足迹输出量与该地区水足迹总供应量 ( $P^k$ ) (包含该地区水足迹输出量和本地区消费自身水足迹量) 的比值，表明区域水足迹输出量占供应量的份额。当  $II^k$  和  $EI^k$  较高时，可视为 k 区域为重要源点。计算方式参考马丽等<sup>[22]</sup>，具体计算公式为：

$$II^k = \frac{O^k}{E_T} \quad (7)$$

$$EI^k = \frac{O^k}{P^k} \quad (8)$$

本文选取汇聚力系数(CF<sup>k</sup>)和依赖度系数(DI<sup>k</sup>)指标对汇点强度进行刻画。其中汇聚力系数定义为汇点的水足迹输入量(D<sup>k</sup>)与全国省际间水足迹总流量的比值,表明汇点在全国水资源市场的重要程度;依赖度系数定义为汇点的水足迹输出量与该地区水足迹总消费量(C<sup>k</sup>)(包含该地区水足迹输入量和本地区消费自身水足迹量)的比值,表明区域水足迹输入量占总消费量的份额。当CF<sup>k</sup>和DI<sup>k</sup>较高时,可视为k区域为重要汇点。计算公式为:

$$CF^k = \frac{D^k}{E_T} \quad (9)$$

$$DI^k = \frac{D^k}{C^k} \quad (10)$$

### 1.3 水足迹网络结构分析

物流场理论中的依赖度可以看出一个地区的整体依赖性,但它不能反映地区之间的依赖程度,生态网络模型(ENA)可以很好的解决这一问题。使用ENA的控制分配系数(CA)和依赖分配系数(DA)来量化区域或行业之间的控制依赖关系<sup>[36, 37]</sup>。通过分析区域和产业之间的控制和依赖关系,可以识别各地区或各产业之间的整合和调控关系。除此之外,本文加入芬恩循环指数(FCI)和系统鲁棒性(SR)探索水资源网络的循环利用率、系统效率与冗余之间的平衡关系<sup>[28, 38]</sup>。

积分流用于解释一个区域在整个系统配置过程中对另一个区域的影响,定义为N或N',N和N'是代谢物质流的无量纲积分矩阵,计算方式参考彭焜等<sup>[38]</sup>,具体计算公式如下:

$$N = (n_{ij}) = \sum_{n=0}^{\infty} G^n = (I - G)^{-1} \quad (11)$$

$$N' = (n'_{ij}) = \sum_{n=0}^{\infty} G'^n = (I - G')^{-1} \quad (12)$$

其中, N=(n<sub>ij</sub>),为代谢物质流的积分无量纲矩阵; G=[G<sub>ij</sub>]为代谢物质流的直接无量纲矩阵; G'=[G'<sub>ij</sub>]为代谢物质流的间接无量纲矩阵;  $G'_{ij} = \frac{f_{ij}}{T_i}$ ,  $G_{ij} = \frac{f_{ij}}{T_j}$ , f<sub>ij</sub>指从i地区流向j地区的水足迹, T<sub>i</sub>为i部门的输入或输出。

结合矩阵N和N',通过控制分配系数(CA)和依赖分配系数(DA)来量化区域间水资源的控制依赖性。具体计算公式如下:

$$CR = (cr_{ij}) \equiv n_{ij} - n_{ji} \quad (13)$$

$$CA = (ca_{\bar{j}}) \equiv \begin{cases} \frac{n_{ij} - n_{j\bar{i}}}{\sum_{i=1}^m n_{ij} - n_{j\bar{i}}} & n_{ij} - n_{j\bar{i}} > 0 \\ 0 & n_{ij} - n_{j\bar{i}} \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$DA = (da_{\bar{i}}) \equiv \begin{cases} \frac{n_{\bar{j}} - n_{\bar{j}\bar{i}}}{\sum_{j=1}^m n_{\bar{j}} - n_{\bar{j}\bar{i}}} & n_{\bar{j}} - n_{\bar{j}\bar{i}} > 0 \\ 0 & n_{\bar{j}} - n_{\bar{j}\bar{i}} \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中  $cr_{ij}$  表示区域  $i$  和区域  $j$  之间的控制差异, 如果  $cr_{ij} > 0$  表示区域  $i$  依赖  $j$  地区, 如果  $cr_{ij} \leq 0$  表示区域  $i$  控制  $j$  地区<sup>[39,40]</sup>。

FCI 可以表示水足迹流动的循环率, 具体计算公式如下:

$$FCI = \sum_{i=1}^n \left( \frac{n_{ii} - 1}{n_{ii}} T_i \right) / TST \quad (16)$$

其中 TST 为整个系统的总输入或总输出,

$$TST = \sum_{i=1}^n T_i。$$

系统的效率与冗余之间对于实现系统网络的平衡具有非常重要的意义。系统的鲁棒性(SR)可以表示为水足迹流动效率和冗余之间的关系, 进而表示整个网络系统的可持续性, 是由网络的发展能力(C)和上升性(A)计算得到的, 具体的 C、A 以及 SR 的计算过程如下:

$$C = -TST^2 \sum_{i,j} \frac{f_{ij}}{TST} \ln \frac{f_{ij}}{TST} \quad (17)$$

$$A = TST^2 \sum_{i,j} \frac{f_{ij}}{TST} \ln \frac{f_{ij} TST}{T_i T_j} \quad (18)$$

$$SR = -\frac{A}{C} \ln \frac{A}{C} \quad (19)$$

## 1.4 数据来源

### 1.4.1 投入产出表的数据来源及处理

本文的分析基于 2007 和 2012 年中国区域间投入产出表。2007 和 2012 年区域间投入产出表均来自于刘卫东等<sup>[41,42]</sup>, 2012 年中国区域间投入产出表包含西藏地区, 将其剔除, 并按照产业划分标准将 2007 和 2012 年中国区域间投入产出表合并为 17 个部门。如表 1 所示:

#### 1.4.2 各地区分产业直接用水系数所需数据及处理

各地区农业用水数据来自于《2007 年中国水资源公报》和《2012 年中国水资源公报》<sup>[43]</sup>。工业用水数据来源于《2007 年中国环境年鉴》和《2012 年中国环境年鉴》<sup>[44]</sup>。中国统计年鉴上的城市生活用水由居民生活用水和公共用水两部分(含第三产业及建筑业等用水)组成。本研究采取城市生活用水量与城市居民生活用水量的差值表示第三产业和建筑业的用水量。城市生活用水数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[45]</sup>;城市居民日常生活用水采用以下方法计算, 将《城市居民生活用水量标准》(GB/T50331-2002)<sup>[46]</sup>中各地区的日均用水量与 2008 和 2013 年的《中国统计年鉴》<sup>[45]</sup>中的城市用水人口相乘求得。工业、第三产业细分下的用水数据依据各地区投入产出表中水的生产供应业在不同部门的投入比例<sup>[47]</sup>计算得出。通过以上数据计算各地区水足迹以及水足迹转移问题。

表 1 产业分类

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		

## 2 结果分析

### 2.1 中国省际水足迹转移分析

为了便于研究, 本文将选取水足迹输入(输出)较大的 8 个地区, 得到中国区域间水足迹转移流向关系图(图 1), 分别以不同的颜色代表 8 个地区, 根据流量的宽度, 识别出各地区之间的流量, 关系带以水资源流量的大小权衡并对应相应的资源转移地区。

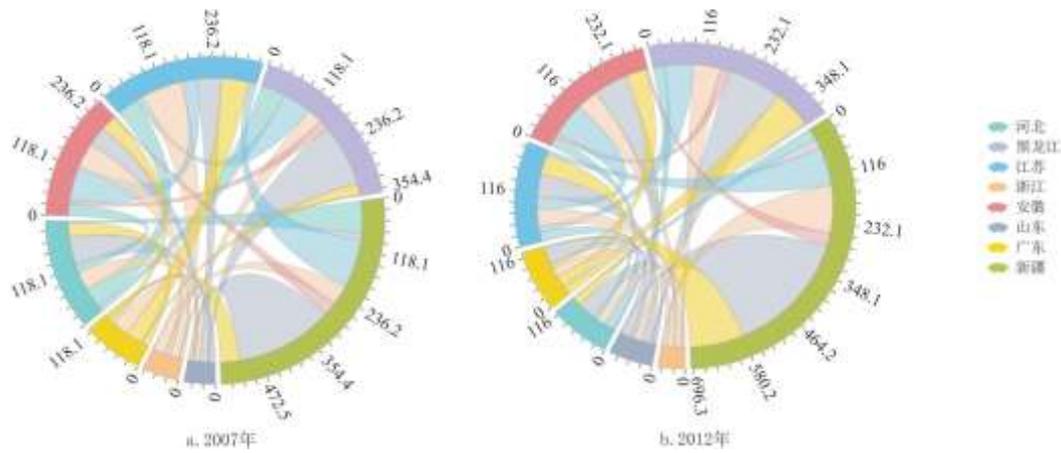


图 1 2007 和 2012 年中国各地区水足迹流动(亿  $m^3$ )

注：图中的数字表示各地区的水足迹总量。

### (1) 2007 年水足迹转移特征分析

根据图 1(a) 所示的地区间的水资源相互作用，可以发现黑龙江和新疆是主要的水资源供应地区，浙江、山东和广东是主要的水资源消费地区。此外，河北和江苏地区既是主要的水资源供应地区也是主要的水资源消费地区，两个地区的总供应量分别为 252.14、354.22 亿  $m^3$ ，总消费量分别为 259.97、391.75 亿  $m^3$ 。黑龙江和新疆向图中其他 6 个地区的水资源输入总量分别为 187.70 和 287.87 亿  $m^3$ ，占两个地区水足迹输出总量的比例分别为 47.03% 和 47.85%。

### (2) 2012 年水足迹转移特征分析

根据图 1(b) 所示的地区间水资源相互作用，可以发现除了黑龙江、新疆和江苏外，安徽地区水资源总输出在 2012 年有所增加，达到了 309.46 亿  $m^3$ ，江苏、浙江、山东和广东依旧是水足迹较高的地区，而河北地区 2012 年的供应量和消费量都有所减少。此外，黑龙江和新疆向其他 6 个地区的水资源输入比例也有所提高，占两个地区水足迹输出总量的比例分别为 48.6% 和 52.4%，从整个系统来看，黑龙江和新疆的总水足迹输出量占全国总水足迹输出量的 1/4 左右，是整个水资源网络系统的中枢部分。

### (3) 中国省际水足迹转移特征

结合 (a) 和 (b) 来看，水资源输出量较大的地区为黑龙江和新疆地区，这两个地区的农业部门直接水资源消耗系数(单位产值的水资源消耗)较大，而农业又是水资源消费量最大的部门，这也与刘雅婷<sup>[5]</sup>、李丽莉<sup>[48]</sup>的观点相同；水资源输入量较大的地区多为经济规模较大的地区，如江苏、浙江、广东和山东等。另外，交通也是一个不可忽视的因素，例如，安徽 2007 年输出路径最大的三条分别是安徽-江苏，安徽-浙江，安徽-山东等。

## 2.2 中国省际水足迹流动格局特征及演变

### 2.2.1 水足迹源地体系

运用式 (7)、式 (8) 计算出不同省区的影响力系数和外向度系数，对源点及其强度，以及水足迹的主要源地体系进行分析(表 2)。

(1) 水足迹影响力系数

河北、内蒙古、黑龙江等 8 省区是重要的水足迹源点。2007 年这八个地区的影响力系数均在 5% 以上，水足迹输出量之和占到全国省际间水足迹流量的 59.47%，其中黑龙江、江苏和新疆地区的影响力系数均在 8% 以上，3 个地区的水足迹总输出量均超过 300 亿 m<sup>3</sup>，是整个系统的中枢部分。北京、天津、海南、青海和宁夏 5 个地区的影响力系数均在 1% 以内，北京和天津地区接收其他地区的水足迹较少，海南、青海和宁夏为偏远地区，所以水足迹输入量也较少。其他地区的影响力系数在 1%~5% 之间，各地区影响力系数相差不大。2012 年，除河北和内蒙古外，其他 6 个省区的影响力系数均在 5% 以上，河北的影响力系数从 5.74% 降到 2.88%，内蒙古的影响力系数从 5.61% 降到 3.52%，除此之外，江苏的影响力系数也有减少的趋势。影响力系数在 1% 以内的地区也有所改变，除天津外，其他地区均有增加的趋势，2012 年只有天津和宁夏地区的影响力系数小于 1%。特别注意的是西北地区的影响力系数有显著增加的趋势，这是经济发展后各地区交通便利的结果。

表 2 2007 和 2012 年各省水足迹源点和汇点强度变化

地区	2007 年				2012 年			
	II	EI	CF	DI	II	EI	CF	DI
北京	0.31	31.28	4.12	85.99	0.61	46.71	3.41	83.14
天津	0.61	47.56	4.19	86.07	0.41	36.14	2.51	77.69
河北	5.74	56.63	5.92	57.38	2.88	30.25	3.28	33.06
山西	1.00	34.81	1.46	43.70	1.02	33.61	2.17	51.96
内蒙古	5.61	61.36	1.03	22.55	3.52	35.53	3.75	37.01
辽宁	2.00	33.53	3.06	43.49	1.52	21.85	5.08	48.27
吉林	2.88	67.87	3.30	70.76	2.12	31.05	1.40	22.94
黑龙江	9.09	59.44	1.65	20.96	9.38	50.51	1.89	17.05
上海	1.87	39.64	6.28	68.77	2.08	39.74	3.96	55.71
江苏	8.07	29.18	8.93	31.31	6.61	23.15	8.68	28.36
浙江	1.90	25.47	7.71	58.05	1.66	20.04	7.89	54.40
安徽	6.02	56.33	3.00	39.14	7.01	44.34	3.06	25.80
福建	2.01	24.25	2.62	29.45	2.53	26.80	2.83	29.04
江西	3.44	35.03	1.59	19.95	4.37	33.85	2.34	21.53
山东	1.76	15.58	10.90	53.37	2.56	19.98	14.39	58.35
河南	3.57	32.92	5.97	45.07	3.75	28.45	5.86	38.37
湖北	2.85	24.46	2.70	23.47	2.56	15.71	2.00	12.69
湖南	5.34	42.36	1.81	19.90	5.45	32.76	2.15	16.13

广东	4.48	26.64	10.34	45.61	3.87	22.58	9.02	40.44
广西	5.89	51.88	1.68	23.53	5.87	42.28	1.69	17.45
海南	0.31	19.50	0.16	11.21	1.60	73.78	0.73	56.31
重庆	1.02	35.69	1.92	51.08	1.27	37.89	2.66	56.16
四川	2.59	29.43	2.40	27.86	1.63	14.24	2.08	17.49
贵州	2.03	53.13	1.03	36.54	1.83	43.95	0.99	29.71
云南	1.81	34.87	1.54	31.37	2.47	39.23	1.73	31.23
陕西	1.70	57.82	2.28	64.82	2.01	47.69	2.11	48.84
甘肃	1.20	30.27	0.78	22.13	2.68	49.50	0.80	22.73
宁夏	0.23	21.64	0.33	28.48	0.36	32.75	0.23	23.54
青海	0.97	35.47	0.40	18.51	1.08	33.49	0.45	17.51
新疆	13.71	67.68	0.92	12.32	15.31	56.50	0.84	6.66

## (2) 水足迹外向度系数

河北、内蒙古和吉林等 9 个地区的外向度系数较高，即地区外输水足迹在本地水足迹总供应量中占据比例较高(50%以上)。2007 年外向度系数最高的地区是吉林省，外输水足迹占到本地水足迹总供应量的 67.87%，其次是内蒙古和新疆的外向度系数达到了 60%以上；以吉林省为例，吉林省的水足迹输出量为 126.50 亿  $m^3$ ，该地区的水足迹来自本地区的数值为 59.89 亿  $m^3$ ，输出量是消费量的 2.1 倍左右，这是该地区外向度系数较高的直接原因。2012 年海南取代吉林成为水足迹外向度系数最高的省份，外向度系数较高的省份从之前的 9 个减少为 3 个，其中，海南的外向度系数从之前的 19.50% 增长到 73.78%，增幅较大。海南消耗本地区的水足迹从 2007 年的 56.19 亿  $m^3$  减少到 2012 年的 25.07 亿  $m^3$ ，但是水足迹输出量从 13.62 亿  $m^3$  增长到 70.53 亿  $m^3$ ，这是外向度系数增大的直接原因。另外，多数源点地区的水足迹外向度系数有减少的趋势，外向度系数增加的源点地区有 9 个，且除了海南外，其他地区的外向度系数增幅很小，各地区满足本地区的生产，消耗的水足迹较多，而输出量变少或者增幅减少，表明区域间为了经济发展对水足迹有强烈的竞争关系。

## 2.2.2 水足迹汇地体系

水资源输入量反映了区域之间调入的情况。运用式(9)、式(10)计算各省的汇聚力系数和依赖度系数，对水足迹汇点及其特征进行分析(表 2)。

### (1) 水足迹汇聚力系数

从汇聚力系数分析来看，2007 年的汇聚力系数较大的地区为江苏、浙江、山东和广东，四个地区汇聚力系数均在 7% 以上，且总和为 37.88%；其次，河北、上海和河南的汇聚力系数相对较大，均在 5% 以上；另外，汇聚力系数相对较小的地区多数在偏远地区，例如海南、甘肃、青海、宁夏和新疆，汇聚力系数均在 1% 以内。2012 年汇聚力系数较大地区的格局没有变化，其中，浙江有小幅增加，山东增加较多，表明浙江和山东在全国水足迹市场的份额增强。除了以上 4 个地区，河北、上海和河南的汇

---

聚力系数均呈现减少的趋势，而辽宁的汇聚力系数从 3.06%增加到 5.08%；另外，海南、甘肃、青海、宁夏和新疆地区的汇聚力系数仍在 1%以内。

## (2) 水足迹依赖度系数

从汇点的依赖度系数来看，2007 年的依赖度系数较大的地区为北京和天津，均为发达地区，这与地区的经济发展有着直接的联系，经济发展伴随着物品和商品的流转，依赖度系数也会相对其他地区较高。依赖度系数较小的地区多为偏远地区，如海南、青海、新疆等。2012 年多数地区的依赖度系数有减少的趋势，仅有山西、内蒙古、辽宁等八个地区有增长的趋势，除海南外，其他几个地区的增幅较小，各地区对水足迹消耗的竞争关系是导致依赖度系数减少的直接原因。

### 2.3 区域间水足迹网络特征及演进规律

#### 2.3.1 水资源网络地区间动力学分析

将水足迹消费与 ENA 结合起来，通过地区间的水足迹关系，显示了各地区的控制和依赖关系(图 2)。其中， $ca_{ij}$ 表示区域  $i$  对区域  $j$  的控制强度， $da_{ij}$ 表示区域  $j$  对区域  $i$  的依赖性。

#### (1) 2007 年中国水足迹控制依赖关系

如图 2(a)所示，图 2(a)a 中显示 2007 年地区间的控制分配关系，地区 5(内蒙古)、地区 8(黑龙江)和地区 30(新疆)对于大多数地区的控制关系较强，尤其是新疆地区。控制关系最突出的是新疆对内蒙古和黑龙江的控制，分别为 100%和 87.86%，原因是内蒙古和黑龙江对大多数地区都有控制关系，唯独对新疆地区有很强的依赖性，故而显示出新疆地区对以上两个地区存在控制关系，且控制关系较强。图 2(a)b 中显示 2007 年地区间的依赖分配系数，地区 1(北京)和 2(天津)对多数地区都存在很强的依赖关系。依赖关系最突出的是北京对天津、地区 11(浙江)和地区 15(山东)的依赖，分别为 94.90%、91.98%和 96.93%。

#### (2) 2012 年中国水足迹控制依赖关系

图 2(b)所示，图 2(b)a 中显示 2012 年地区间的控制分配系数，同样，黑龙江和新疆对多数地区控制关系较强。控制关系最突出的是新疆对黑龙江和广西的控制，控制分配系数分别为 100%和 81.53%。图 2(b)b 中显示 2012 年地区间的依赖分配系数，北京和天津依然对多数地区都存在很强的依赖关系。依赖关系最突出的是天津对北京、浙江和山东的依赖，分别为 100%、52.35%和 56.57%。同时，北京对浙江和山东的依赖关系也很突出，依赖分配系数分别为 47.65%和 40.66%。

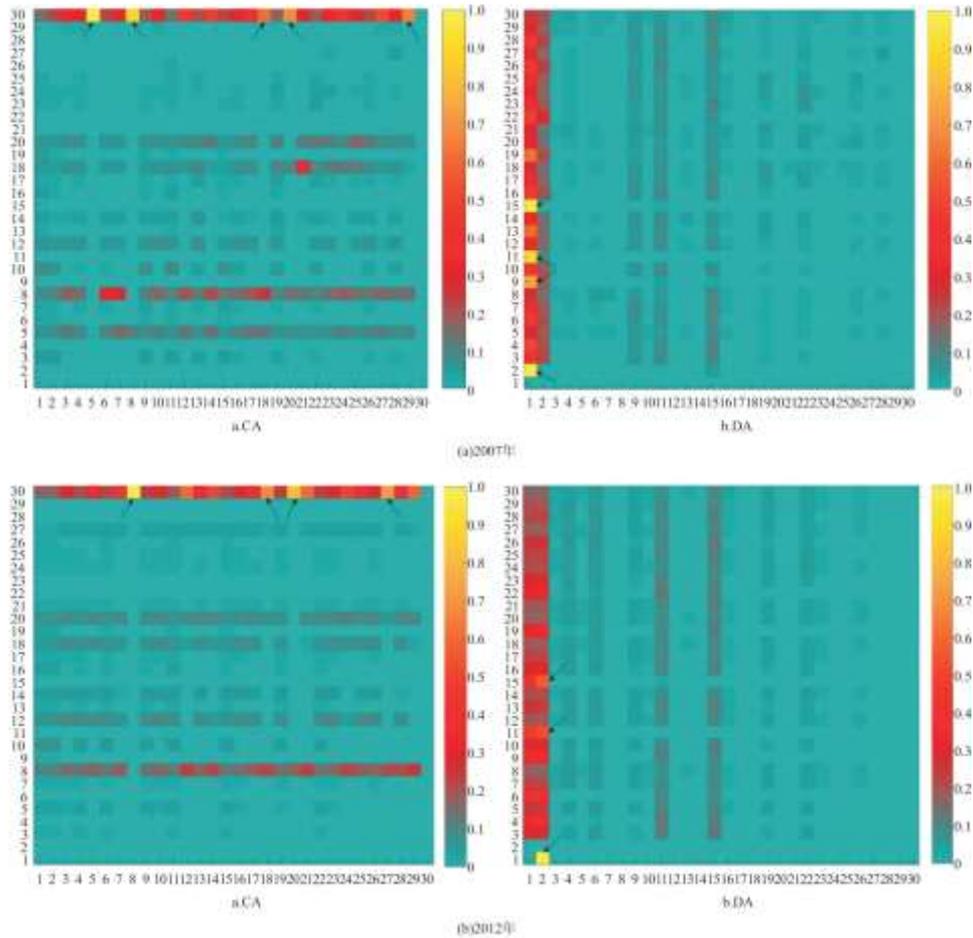


图 2 2007 年和 2012 年水足迹网络地区间的控制和依赖关系

注：(1)图中：深绿色代表最小值，黄色代表最大值，红色代表中间值，其他颜色散布在他们之间，以缓冲从一个值到下一个值的过渡；(2)数字 1~30 代表 30 个地区，它们分别是 1:北京；2:天津；3:河北；4:山西；5:内蒙古；6:辽宁；7:吉林；8:黑龙江；9:上海；10:江苏；11:浙江；12:安徽；13:福建；14:江西；15:山东；16:河南；17:湖北；18:湖南；19:广东；20:广西；21:海南；22:重庆；23:四川；24:贵州；25:云南；26:陕西；27:甘肃；28:青海；29:宁夏；30:新疆。

### (3) 中国省际水足迹关联影响程度分析

CA 和 DA 等指标通过网络的方式揭露了水资源对于地区之间关联影响的程度。与此同时，能够直观地观察到，水资源系统中的控制和依赖关系在 2007 年和 2012 年变化大致是相同的，只是存在变化程度的差异。可以初步推断出网络系统随着时间的变化地区间动力学关系的影响是相似的，为水资源安全政策的提出提供理论依据。

## 2.3.2 地区间水足迹网络系统属性

### (1) 水资源网络循环特征分析

FCI 可以表示整个网络系统的循环流强度比例。为了研究水足迹流动带来的影响，本文分析 2007 和 2012 年的水资源网络循环情况，结果如图 3 所示。2007 年，水资源网络中地区间循环的水足迹为水通量(水资源网络中所有流入或流出地区的水资源)



### 3.1 结论

本研究使用多区域投入产出模型构建了中国 30 地区 2007 和 2012 年水足迹流动网络，核算了最终使用(包含居民消费、政府消费和固定资本形成)所隐含的水足迹流动情况。与此同时，结合源-汇系统理论，从源-汇地分析水资源网络地区间水足迹流动格局。最后，构建生态网络分析模型，深入分析地区间水足迹的控制、依赖关系以及水资源网络系统的循环性和鲁棒性，主要结论如下：

(1)从水足迹流动分析来看，水资源输出量较大的地区为黑龙江和新疆地区，这与地区的产业部门有直接关系，这两个地区的农业部门直接水资源消耗系数较大，农业又是水资源消费量最大的部门；而水资源输入量较大的地区多为经济规模较大的地区，如江苏、浙江、广东和山东等。另外，交通也是一个不可忽视的因素，相邻地区的水足迹转移量较大，其他地区的水足迹转移呈现出变化，这是产业结构变化的必然结果。

(2)通过运用物流场理论分析，源地系统中，黑龙江、江苏和新疆等 8 省区是重要的水足迹源点，2007 年这 3 个地区的影响力系数在 8%以上。另外，多数源点省区的水足迹外向度系数有减小的趋势，各地区对水足迹消耗有强烈的竞争关系。汇地系统中，汇聚力系数较大的地区为江苏、浙江、山东和广东，2007 和 2012 年这 4 个地区汇聚力系数均在 7%以上。另外，北京和天津的依赖度系数很大，多数地区的依赖度系数呈现减小的趋势，各地区对水足迹的竞争关系是导致依赖度系数减小的直接原因。

(3)通过将 MRIO 与 ENA 相结合，通过 CA 和 DA 研究了区域间的主要关联影响。例如，黑龙江、新疆等地对其他地区具有较强的控制关系，北京、天津等地对其他地区具有较强的依赖关系，说明北京和天津的生活、生产活动更加依赖于黑龙江和新疆等地区，也更容易受到黑龙江和新疆地区波动的影响。控制和依赖关系可以作为调整区域间经济关系的指导，将资源管理与区域联系相结合，为资源协同管理和区域可持续发展提供理论基础。

(4)通过 FCI 可以看出，2007 和 2012 年整个水资源网络系统的循环性较差，这两年里仅有江苏和广东的贡献率较高，其贡献率总和占 30%左右，表明江苏和广东地区循环性较好，部门之间联系较为密切。北京、天津等地区的贡献率较低，虽然 2012 年有增长的趋势，但贡献率仍在 1%以内，远低于自然生态系统，具有较大的提升空间，这就需要各地区各部门之间加强联系；通过 SR 可以看出，2007 和 2012 年系统的 SR 相差不大，整个水资源网络的效率偏低，处于高冗余低效率的不可持续的状态，这就需要加强部门间商品和服务的流动。如何进一步分析和挖掘水资源网络系统动力学关系带来的变化，是水资源网络进一步探索的重要方向。

### 3.2 讨论

(1)本研究以中国 30 个地区 2007 和 2012 年水足迹为研究对象，得出了一些有价值的规律，但存在 2 点不足：

①由于采用投入产出表方法，投入产出表为 5 年更新一次，致使数据的时效性不足。

②2007 年区域间投入产出表中没有西藏地区，因此在分析水足迹时未加入其中。

(2)根据上述结论，做出如下展望：

①农业的用水系数高于其他产业，因此应适当调整产业结构缓解水资源匮乏地区的水资源压力，若大力发展农业，必然会占据其他产业发展时所需的水资源，也限制了其他产业的发展，因此，应从农业内部用水效率和用水结构调整，发展节水型农业。

---

②构建节水型经济网络体系，不仅要考虑产业的直接耗水，还要考虑产业关联产生的间接用水，一些产业的直接耗水量很低，但却对整个经济网络体系用水间接带动很大，应合理调配产业间联系，控制此类产业的输出。

③对于产业结构不合理的地区，应进行产业结构调整，建立科学合理的节水型产业结构，同时，也要完善不合理的地区间产业间贸易结构。对于水资源短缺的地区，应提高节水技术，进出口低耗水产品，对于没有足够水资源生产的产品，应从低耗水地区购买，以缓解产业不足带来的水资源短缺问题。

④为了解决水资源短缺问题，各个地区要面对“生产者”和“消费者”双重责任。如果只由生产者承担减少水资源的责任，则难以体现消费端的用水责任，若只由消费者承担责任，生产者在生产过程中可能会出现高耗水情况，对“消费者”不公平。作为调出地的地区有义务主动减少自身用水，同时“消费者”也要合理选择水资源利用效率更高的“生产者”。在今后研究中要密切关注产业用水特征及水资源流动网络结构，对于全面缓解水资源短缺和优化水资源网络结构具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1]赵雪雁,高志玉,马艳艳,等. 2005-2014年中国农村水贫困与农业现代化的时空耦合研究[J]. 地理科学, 2018, 38(5):717-726.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]吴兆丹, UPMANU L, 王张琪, 等. 基于生产视角的中国水足迹地区间差异:“总量-结构-效率”分析框架[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(12):85-94.
- [5]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.
- [6]ZHAO X, CHEN B, YANG Z F. National water footprint in an input-output framework: A case study of China 2002[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(2):245-253.
- [7]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.
- [8]钟章奇, 吴乐英, 陈志建, 等. 区域碳排放转移的演变特征与结构分解及减排对策分析——以河南省为例[J]. 地理科学, 2017, 37(5):773-782.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]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.

- 
- [12]吴兆丹, 赵敏, UPMANU LALL. 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):62-69.
- [13]黄悦. 中国各省出口中的虚拟水和增加值研究——基于多区域投入产出模型[D]. 中国地质大学(北京), 2017.
- [14]DUARTE R, SANCHEZ-CHOLIZ J, BIELSA J. Water use in the Spanish economy:An input-output approach[J]. *Ecological Economics*, 2002, 43(1):71-85.
- [15]HASSAN R M. Economy-wide benefits from water-intensive industries in South Africa:Quasi-input-output analysis of the contribution of irrigation agriculture and cultivated plantstions in the crocodile river catchment[J]. *Development Southern Africa*, 2003, 20(2):171-195.
- [16]MUBAKO S, LAHIRI S, LANT C. Input-output analysis of virtual water transfers:Case study of California and Illinois[J]. *Ecological Economics*, 2013, 93:230-238.
- [17]王宜强, 赵媛. 中国煤炭资源流源、汇地空间格局演变与内部空间差异研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(10):1153-1160.
- [18]王宜强, 赵媛. 中国省域煤炭资源空间流动形成机制的主导要素解析[J]. *资源科学*, 2015, 37(4):0723-0732.
- [19]赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源-汇系统空间格局特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(4):455-466.
- [20]杨足膺, 赵媛, 黄克龙. 中国石油资源空间流动的驱动机制分析[J]. *地理研究*, 2014, 33(5):863-875.
- [21]王宜强, 赵媛. 中国天然气资源流动类型、集散特征与格局演化[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(2):248-259.
- [22]马丽, 张博. 中国省际电力流动空间格局及其演变特征[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2):348-358.
- [23]HANNON B. The structure of ecosystems[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1973, 41(3):535-546.
- [24]黄茹莉, 徐中民. 从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势[J]. *生态学报*, 2010, 30(24):7038-7044.
- [25]穆献中, 朱雪婷. 城市能源代谢生态网络分析研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4223-4232.
- [26]ZHANG Y, ZHENG H M, YANG Z F, et al. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China[J]. *Energy Policy*, 2015, 86:651-663.
- [27]WANG S G, CHEN B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis:A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Applied Energy*, 2016, 178:773-783.
- [28]CHEN S Q, CHEN B. Urban energy-water nexus:A network perspective[J]. *Applied Energy*, 2016, 184:905-914.
- [29]WANG S G, LIU Y T, CHEN B. Multiregional input-output and ecological network analyses for regional energy-water nexus within China [J]. *Applied Energy*, 2018, 227:353-364.

- 
- [30]ZHANG Y,ZHENG H M,YANG Z F,et al.Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration:combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis[J].Journal of Cleaner Production,2016,114:243-256.
- [31]CHEN S Q,CHEN B.Urban energy consumption:Different insights from energy flow analysis,input-output analysis and ecological network analysis[J].Applied Energy,2015,138:99-107.
- [32]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.
- [33]DONG H J,GENG Y,HAO D,et al.Virtual water flow feature of water-rich province and the enlightenments:Case of Yunnan in China[J].Journal of Cleaner Production,2019,235:328-336.
- [34]赵丹丹. 基于投入产出和“生态网络”的京津冀水足迹演变趋势与水资源调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [35]王志国. 物流场论及其在经济分析中的应用[J]. 地理学报, 1990, 45(1):90-101.
- [36]CHEN S,CHEN B.Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions:A case study of Vienna,Austria[J].Environmental Science & Technology,2012,46(8):4498-4506.
- [37]ZHANG Y,LI S,FATH B D,et al.Analysis of an urban energy metabolic system:Comparison of simple and complex model results[J].Ecological Modelling,2011,223(1):14-19.
- [38]彭焜, 朱鹤, 王塞鸽, 等. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协调管理研究——以湖北省为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9):1514-1528.
- [39]FANG D L,CHEN B.Ecological network analysis for a virtual water network [J].Environmental Science & Technology,2015,49(11):6722-6730.
- [40]YANG S Y,FATH B,CHEN B.Ecological network analysis of embodied particulate matter 2.5-Acase study of Beijing[J].Applied Energy,2016,184:882-888.
- [41]刘卫东, 陈杰, 唐志鹏, 等. 中国 2007 年 30 省区市区间投入产出表编制理论与实践 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [42]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.
- [43]中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007,2012.
- [44]国家环境保护部. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境出版社, 2008,2013.
- [45]国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008,2013.
- [46]GB/T 50331-2002. 城市居民生活用水量标准[S].

---

[47]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.生态学报,2018,38(3):788-799.

[48]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.