

河南省不同产业碳水足迹效率研究

杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 肖连刚, 曹连海, 王 帅, 杨青林

(华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046)

摘要: 碳水关联分析是当前区域可持续发展研究的重要方向之一。从区域碳水耦合视角开展产业碳水足迹效率研究不仅有助于揭示资源利用强度和效率对产业碳排放的影响机制, 而且对于全球化背景下区域产业转型中的节水和碳减排具有重要的实践意义。采用2012年河南省投入产出表及各产业取水量和能源消费数据, 利用投入产出分析对不同产业的碳水足迹效率进行了对比研究。主要结论如下: (1) 碳足迹和水足迹存在着行业不匹配现象。其中, 农业水足迹最大, 是水足迹最小的木材业的2333倍; 采掘业碳足迹最大, 是碳足迹最小的食品业的273倍。 (2) 不同产业碳水足迹效率具有较大的差异。一般来说, 足迹较大的产业其足迹效率偏低。 (3) 产业碳水足迹效率的差异主要受产业属性、水能消耗强度、能源结构、企业技术水平及产业关联情况等因素的影响。 (4) 建议未来河南省应结合不同产业的特点及水能关联情况制定差别化的节水与碳减排政策, 加强制度约束和法律监管, 推动企业水能资源高效利用, 进一步增强区域适应和减缓气候变化的能力。

关键词: 投入产出分析; 碳足迹; 水足迹; 效率; 产业

碳足迹指某种活动引起的 (或某种产品生命周期内积累的) 直接或间接的 CO_2 排放量^[1], 水足迹指一个国家、一个地区或一个人在一定时期内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量^[2]。作为衡量人类活动对环境影响程度的重要指标, 碳足迹和水足迹近年来成为地理学、环境科学与生态学等多学科交叉的热点研究领域之一^[3]。近年来, 国内外学者针对碳足迹和水足迹开展了大量的相关研究。比如, 在碳足迹研究领域, 一些学者采用投入产出模型^[4]和生命周期评价^[5]等方法, 从省区^[6]、城市^[4]、国际贸易^[7]、土地利用^[8]和农业生产^[9]等视角开展了碳足迹的定量评价; 在水足迹研究方面, 国内外学者主要采用生命周期评价^[10-11]、虚拟水^[12]和投入产出分析^[13]等方法开展了不同空间尺度的水足迹研究^[14-15], 为评价人类活动对水环境的影响及区际间虚拟水流动提供了重要的理论视角和方法。但由于因经济发展带来的环境问题日益严峻, 单一足迹指标难以全面评价区域内资源环境的压力。实质上碳、水是地表系统密切相关的要素, 一方面水资源的开发利用需要消耗能源, 不可避免地产生碳排放, 另一方面能源的开采、利用等过程也会消耗大量的水资源。水、能要素的组合强度和利用效率不同, 导致了不同产业活动中水资源利用效率和碳排放效率的差异。近年来, 为揭示多种要素的耦合作用与碳排放的关系, 国内外一些

收稿日期: 2018-07-27; 修订日期: 2018-10-12

基金项目: 教育部人文社科项目 (17YJCZH257); 河南省自然科学基金项目 (182300410103); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划 (2017GGJS078); 华北水利水电大学研究生创新课题 (YK2018-20)

作者简介: 杨文娟 (1991-), 女, 河南中牟人, 硕士, 研究方向为水能关联与碳排放。

E-mail: angwenjuan@126.com

通讯作者: 赵荣钦 (1978-), 男, 河南孟津人, 博士, 教授, 研究方向为土地利用与碳排放研究。

E-mail: zhaorq234@163.com

学者从“水—能”关联^[16-17]、“水—能—碳”关系^[18-19]、“水—土—能—碳”耦合作用^[20]和足迹家族^[21-22]等不同视角开展了区域的多要素耦合研究。比如,赵荣钦等^[20]建立了区域“水—土—能—碳”耦合作用研究的框架,分析了要素耦合关系及其影响机制,并以中国不同省区为例探讨了农业“水—土—能”关联及其对碳排放的影响^[23];Wakeel等^[24]从水循环系统中能源消费的角度对当前国际上“水—能”关联研究进行了总结,并提出了未来的研究趋势;Wang等^[25]采用生态网络分析和投入产出分析探讨了城市系统的碳水关联。以上研究为探索区域多要素耦合作用提供了重要理论视角和参考借鉴。

总体而言,前期的足迹家族、碳水关联等研究主要是从区域视角开展的,而对于区域内部不同产业碳水足迹效率的关联研究还需要进一步加强。从区域碳水耦合视角开展产业碳水足迹效率研究不仅有助于揭示资源利用强度和效率对产业碳排放的影响机制,而且对于全球化背景下区域产业转型中的节水和碳减排具有重要的实践意义。河南省是我国的粮食主产区,也是重要的资源、能源型工业基地,在经济社会发展过程中面临着水资源约束、能源效率低下等问题,因此,如何走出一条节水、节能和低碳的道路是当前和今后一段时期内河南省面临的突出问题。本文采用2012年河南省投入产出表及各产业取水量和能源消费数据,利用投入产出分析对不同产业的碳水足迹效率进行对比研究,并提出不同产业节水和碳减排策略。本研究可以为面向节水和碳减排双重目标的区域产业结构调整提供理论指导,并为河南省产业转型发展中节水节能政策的制定提供决策参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源及处理过程

投入产出表最早由Leontief教授提出并应用在经济领域。我国自1987年开始每5年(逢2年、7年)通过调查编制全国的投入产出基本表,基本表后的3年(逢5年、0年)编制基本表的延长表^[26]。美国学者将各产业的资源消耗作为投入的一部分,与投入产出表中各产业的投入与产出构成价值—实物混合的投入产出模型。本文的数据来源主要有:(1)2012年河南省投入产出表;(2)河南省各产业的取水量和能源消费量,这些数据主要来自《2012年河南省水资源公报》、《2013年河南省统计年鉴》和《2013年中国统计年鉴》等。

需要说明的是:(1)个别部门关联性和相似性比较大,因此将投入产出表中的部门进行合并。大部分学者采用的是三次产业合并的方法^[2,27],也有一些学者采用细分行业的方法进行研究,比如分为7个^[25-26]、8个^[28]、11个^[29]、19个^[30]或41个^[7]等不同的产业类型,总体来看,细化产业分类使研究结果更具产业针对性。本文在此基础上,结合河南省的行业特点,将2012年河南省投入产出表中的42个部门合并成19个产业(表1)。(2)各产业取水量数据的获取和处理方法如下:农业和工业的数据直接来自《河南省水资源公报》和《2013年河南省统计年鉴》;由于统计年鉴中没有专门统计建筑业和服务业取水量的数据,借鉴中国投入产出学会课题组^[31]和关爱萍^[32]的研究,采用河南省服务业产值占全国的比重推算得出服务业的取水量,建筑业的取水量由总取水量减去其他产业取水量得到;这两个产业的能源消费数据也采用同样的推算方法得到。(3)由于本研究采用的是竞争型投入产出表,因此,流向本国生产领域的进口产品分为生产国内最终消费品

表1 2012年河南省投入产出表合并过程
Table 1 Item details of sector combination of input-output table of Henan province

| 合并后的产业 | 2012年河南省投入产出表的部门划分 | 合并后的产业 | 2012年河南省投入产出表的部门划分 |
|--------|--------------------|--------|--------------------|
| 农业 | 农林牧渔产品和服务 | 其他工业 | 其他制造产品 |
| 采掘业 | 煤炭采选产品 | | 废品废料 |
| | 石油和天然气开采产品 | | 金属制品、机械和设备修理服务 |
| | 金属矿采选产品 | 电热水供应业 | 电力、热力的生产和供应 |
| | 非金属矿和其他矿采选产品 | | 燃气生产和供应 |
| 食品业 | 食品和烟草 | | 水的生产和供应 |
| 纺织业 | 纺织品 | 建筑业 | 建筑 |
| 服装业 | 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品 | 商业及餐饮业 | 批发和零售 |
| 木材业 | 木材加工品和家具 | | 住宿和餐饮 |
| 造纸业 | 造纸印刷和文教体育用品 | 货运邮电业 | 交通运输、仓储和邮政 |
| 石油业 | 石油、炼焦产品和核燃料加工品 | | 信息传输、软件和信息技术服务 |
| 化工业 | 化学产品 | 其他服务业 | 金融 |
| 非金属制品业 | 非金属矿物制品 | | 房地产 |
| 冶金加工业 | 金属冶炼和压延加工品 | | 租赁和商务服务 |
| 金属制品业 | 金属制品 | | 科学研究和技术服务 |
| 机电制造业 | 通用设备 | | 水利、环境和公共设施管理 |
| | 专用设备 | | 居民服务、修理和其他服务 |
| | 交通运输设备 | | 教育 |
| | 电气机械和器材 | | 卫生和社会工作 |
| | 通信设备、计算机和其他电子设备 | | 文化、体育和娱乐 |
| | 仪器仪表 | | 公共管理、社会保障和社会组织 |

的中间投入和生产出口品的中间投入两部分，本文在计算时没有将出口的中间投入严格区分，对此计算结果会有一定的偏差。

1.2 碳排放核算方法

借鉴IPCC的计算方法，河南省不同产业能源消费碳排放的计算公式^[33]为：

$$CE_{energy-i} = Q_{energy-i} \times H_{energy-i} \times (C_{energy-i} + M_{energy-i})$$
 (1)

式中： $CE_{energy-i}$ 为第*i*种能源的碳排放量； $Q_{energy-i}$ 为第*i*种能源的消费量； $H_{energy-i}$ 为第*i*种能源的净发热值； $C_{energy-i}$ 为第*i*种能源的碳排放系数； $M_{energy-i}$ 为第*i*种能源的CH₄排放系数。其中 $C_{energy-i} = A_i \times B_i$ ； A_i 为缺省碳含量； B_i 为缺省氧化碳因子。

1.3 投入产出分析

1.3.1 投入产出分析中的基本系数

单位直接消耗系数指第*j*产业生产单位价值量消耗第*i*产业的价值量，记作：

$$a_{ij} = x_{ij} / x_j (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (2)

式中： a_{ij} 为单位直接消耗系数； x_{ij} 为第*j*个产业获得第*i*个产业的产值； x_j 为第*j*产业获得的总产值；*n*为产业个数。

单位完全消耗系数是指第*j*产业生产单位价值量直接和间接消耗的第*i*产业价值量的总和，记作 $b_{ij}(i, j = 1, 2, \cdots, n)$ ，其矩阵计算方法为：

$$B = A(I - A)^{-1} \quad (3)$$

式中: n 阶矩阵 $A=(a_{ij})$ 为直接消耗系数矩阵; $B=(b_{ij})$ 为完全消耗系数矩阵; I 为单位矩阵。

1.3.2 基于投入产出分析的碳足迹计算方法

各产业单位碳排放系数计算公式为:

$$a_j^c = c_j/x_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: a_j^c 为第 j 个产业的单位直接碳排系数; c_j 为第 j 个产业的碳排放量。

各产业单位完全碳排放系数矩阵计算方法为:

$$B_{cx} = A_{cx}(I - A)^{-1} \quad (5)$$

式中: A_{cx} 为单位直接碳排放系数矩阵; B_{cx} 为单位完全碳排放系数矩阵。

将 A_{cx} 对角化处理, 左乘列昂惕夫逆矩阵 $(I - A)^{-1}$, 得到碳排放完全需求矩阵 T :

$$T_{n \times n} = (I - A)^{-1} \hat{A}_{cx} \quad (6)$$

借鉴其他学者计算碳足迹的思路, 本文取投入产出表中最终使用的直接和间接的碳排放作为 2012 年河南省各产业碳足迹, 设 CF 为碳足迹, F 为最终使用, 碳足迹计算方法为最终使用向量对角化矩阵左乘碳排放完全需求矩阵, 其矩阵计算方法为:

$$CF = TF \quad (7)$$

碳足迹影响力系数是某产业增加单位最终使用时对其他产业的碳排放的需求波及程度, 反映该产业对国民经济发展的影响程度, 大于 1 说明该产业影响力大于所有产业的平均水平, 小于 1 则相反。设 U 是碳足迹影响力系数矩阵, 在 U 中元素 U_{ij} 表示第 i 产业对第 j 产业的影响力; INF_j 为第 j 产业的碳足迹影响力系数, 则有:

$$U_{1 \times n} = A_{cx}(I - A)^{-1} \quad (8)$$

$$INF_j = \sum_{i=1}^n u_{ij} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

碳足迹感应力系数是各产业增加单位最终使用时, 此产业的碳排放受到的需求感应程度, 其数值大小的含义同上。设 V 是碳足迹感应力系数矩阵, V_{ij} 表示第 j 产业受到第 i 产业的感应力; IND_j 为产业 j 的足迹感应力系数, 设 s_{ij} 是求 V_{ij} 的中间矩阵, 则有:

$$s_{ij} = x_{ij}/x_j (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$V_{1 \times n} = A_{cx}(I - S)^{-1} \quad (11)$$

$$IND_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

1.3.3 基于投入产出分析的水足迹计算方法

单位直接取水系数指某产业单位产值或增加值投入对水资源的直接取用量, 其计算方法为:

$$a_j^{hx} = h_j/x_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$a_j^{hz} = h_j/z_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中: a_j^{hx} 为以产值表示的第 j 产业单位直接取水系数; a_j^{hz} 为以增加值表示的第 j 产业单位直接取水系数; A_{hx} 和 A_{hz} 为它们的矩阵表示形式; \hat{Z} 为以各产业增加值总量为元素的对角矩阵; \hat{X} 为以各产业总产出为元素的对角矩阵。

则 a_j^{hx} 、 a_j^{hz} 的矩阵表达方式为:

$$A_{hx} = H\hat{X}^{-1} \quad (15)$$

$$A_{hz} = H\hat{Z}^{-1} \quad (16)$$

单位完全取水系数是某产业每增加单位产值（增加值），所有产业累计单位直接和间接的取水量，其矩阵计算方法为：

$$B_{hx} = A_{hx}(I - A)^{-1} \quad (17)$$

$$B_{hz} = B_{hx}\hat{X}\hat{Z}^{-1} \quad (18)$$

式中： b_j^{hx} 为以产值表示的第 j 产业单位完全取水系数； b_j^{hz} 为以增加值表示的第 j 产业单位完全取水系数。

2 结果分析

2.1 不同产业碳水足迹分析

碳水在产业活动中关系密切，水资源的开发利用需要消耗能源而产生碳排放，能源的开采、运输、终端使用等过程需要消耗水资源，但是产业的碳足迹和水足迹存在着行业不匹配的现象（图1）。河南省是农业大省，农作物的灌溉需要消耗大量的水资源，导致农业水足迹（200.93亿t）最大，约占总水足迹的50%，是木材业的2333倍；同时地下水的抽取和远距离输水等过程需要消耗能源，且小于水资源消耗强度，因此农业碳足迹（434.72万t）只占约0.9%。工业中能源密集型产业（采掘业、石油业、化工业和冶金加工业等），在能源、水资源等自然资源的开采和运输等过程要消耗大量能源，同时燃料在提炼和生产过程中的冷凝、蒸汽加热等工艺也需要消耗水资源，但能源消耗强度大于水资源消耗强度，因此该类产业碳足迹大于水足迹。其他工业包含有废气废水的处理等过程，该过程需要大量能源和水资源的投入，导致该产业碳水足迹都较大。建筑业的房屋桥梁建造过程中投入的来自上游产业的水泥等物料，能带来大量的虚拟水，所以建筑业水足迹大（35.22亿t），碳足迹小。第三产业是水资源的终端消费者，水足迹约占总量的25%，同时水资源在终端使用的能源消耗在水的生命周期中所占比重较大，其碳足迹占总量的6%。另外，货运邮电业在交通工具的运输过程中能源消耗强度大，其碳足迹要大于其他第三产业。

2.2 不同产业碳水足迹效率分析

2.2.1 不同产业碳水足迹效率的对比分析

不同产业碳水足迹效率差异较大。一般来说，足迹较大的产业其足迹效率偏低（图1、

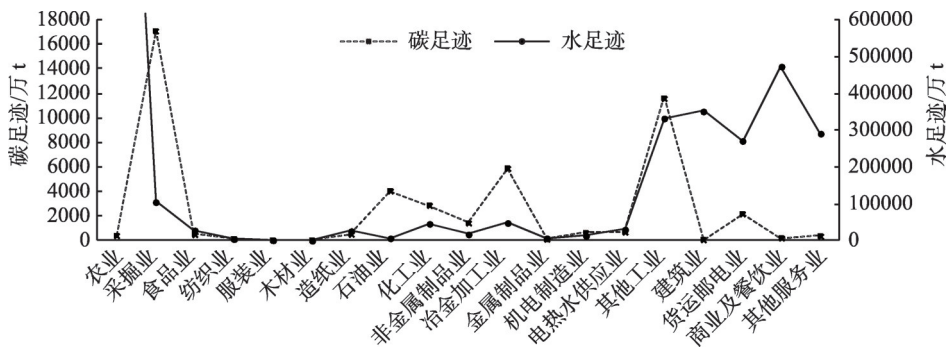


图1 2012年河南省各产业碳水足迹分析

Fig. 1 Carbon and water footprint of different industries of Henan province in 2012

图2)。河南省农业水足迹最大,水足迹效率最小(0.003万元/t)。木材业主要包含家居制造业,水资源投入少,水足迹效率最高(2.17万元/t),约是农业的653倍。机电制造业的水资源和能源需求量小,并且能源投入以利用效率较高的电力为主,从而碳足迹效率高;建筑业碳足迹效率(59.29万元/t)最高,约是碳足迹效率最低的其他工业的208倍,建筑业中房屋桥梁建造过程的直接取水和来自上游产业的虚拟水造成其水足迹较大、水足迹效率低。近年来河南省经济发展迅速,对资源需求日益增长,能源密集型产业发展迅猛,但不可避免地存在着资源利用效率低和粗放发展的问题,导致碳足迹效率较低。河南省第三产业发展尚不完善,水足迹效率偏低,碳足迹效率较高,木材业的水足迹效率约是商业及餐饮业的301倍,其他服务业的78倍。货运邮电业是水资源和能源的终端消耗者,水资源从开采、净化、运输到终端使用的过程都会消耗大量能源,导致该产业碳水足迹较大,碳水足迹效率偏低。商业及餐饮业和其他服务业在水资源终端使用中存在浪费严重的现象,加之来自上游产业的虚拟水使得其水足迹较大,水足迹效率不高。

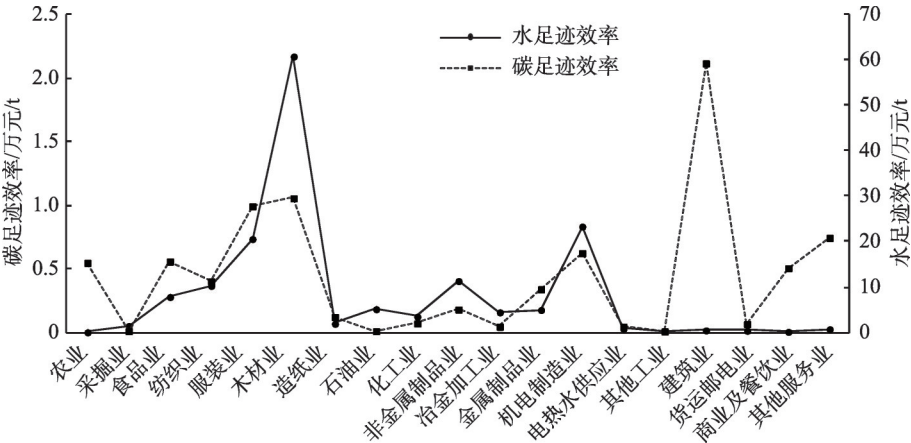


图2 2012年河南省各产业碳水足迹效率分析

Fig. 2 Carbon and water footprint efficiency of different industries of Henan province in 2012

2.2.2 基于碳水足迹效率对比的行业类型划分

产业碳水足迹效率存在着行业不匹配的现象,根据碳水足迹效率值(万元/t)的大小,将碳足迹效率分为高($C_H>15$)、中($5<C_M<15$)、低($C_L<5$),水足迹效率分为高($W_H>0.5$)、中($0.1<W_M<0.5$)、低($W_L<0.1$)。据此,可将河南省不同产业分为7种类型: C_HW_H 、 C_HW_M 、 C_MW_H 、 C_MW_M 、 C_HW_L 、 C_MW_L 、 C_LW_M 、 C_LW_L (表2)。

C_HW_H 包括机电制造业、木材业和服装业,这3个产业处于产业链的下游,并且生产投入的能源和水资源较少,因此碳水足迹小,效率高; C_HW_M 是其他服务业和食品业,这两个产业水足迹不大,但是生产和

表2 2012年河南省各产业碳水足迹效率对比

Table 2 Comparison of industrial carbon and water efficiency of Henan province in 2012

| 类型 | 产业 |
|----------|---------------------------|
| C_HW_H | 服装业、木材业、机电制造业 |
| C_HW_M | 食品业、其他服务业 |
| C_MW_M | 纺织业、非金属制品业、金属制品业 |
| C_HW_L | 农业、建筑业 |
| C_MW_L | 商业及餐饮业 |
| C_LW_M | 石油业、化工、冶金加工业 |
| C_LW_L | 采掘业、造纸业、电热水供应业、其他工业、货运邮电业 |

注: C_H 表示碳足迹效率高, W_H 表示水足迹效率高, C_M 表示碳足迹效率中等, W_M 表示水足迹效率中等, C_L 表示碳足迹效率低, W_L 表示水足迹效率低。

终端使用中水资源利用不合理,产值低,导致水足迹效率不高,食品业在水加热和冷却等过程中需要消耗能源而产生碳排放,但碳足迹小,碳足迹效率高; $C_M W_M$ 是纺织业、金属制品业和非金属制品业,金属制品业和非金属制品业生产中所要求的高温冶炼等工艺能源需求大,同时这两个产业也是河南省的传统产业,不可避免地存在设备老化等现象,能源利用效率不高。纺织业处于产业链的上游,受政策影响成为河南省的传统产业,产品附加值低,水资源和能源利用效率不高; $C_H W_L$ 是农业和建筑业,河南省是农业大省,由于灌溉方式的影响,水足迹大且产品附加值低,建筑业发展迅速,施工现场等用水量增大并且浪费严重,导致这两个产业水足迹效率较低,相对于需要高温高压的工业来说,这两个产业碳足迹小,碳足迹效率高; $C_M W_L$ 是商业及餐饮业,该产业主要是水资源的终端消费者,与发达地区相比河南省的餐饮业发展不成熟,所以水足迹效率低,水资源在终端使用过程中能源消耗量所占比重较大,因此该产业水能关联程度大,在低水足迹效率情况下导致碳足迹效率也不高; $C_L W_M$ 主要有石油业、化工行业和冶金加工业等资源能源密集型产业,该类产业碳足迹大,碳足迹效率较低,另外,能源使用过程中的热电冷却、排放物控制等过程不可避免地消耗水资源,由于设备落后、老化等现象,造成水足迹效率较低; $C_L W_L$ 包括采掘业、造纸业、电热水供应业、其他工业、货运邮电业等,由于对能源的依赖比较大,并受生产工艺、设备条件等的影响,这些产业的碳水足迹效率均较低。

2.3 不同产业碳水足迹效率的影响因素分析

河南省不同产业碳水足迹效率的差异主要受产业属性、产业关联与产业影响力、水能消耗强度、能源结构、企业技术水平、水能关联情况及消费理念等因素的影响。

(1) 产业属性从根本上决定了产业的水能投入及碳水足迹效率。以农业为例,农作物的灌溉就决定了农业水足迹大、碳足迹小的特点,加之农产品的附加值低,使得农业水足迹效率低,碳足迹效率高。第三产业生产投入以服务为主,能源投入量少并以电力为主,产出大,所以其他服务业碳足迹效率高。

(2) 从产业关联的角度来看,产业影响力的不同也导致了碳水足迹效率的差异。产业的碳足迹和水足迹的影响力系数和感应力系数表明了产业之间的影响与关联程度。碳足迹影响力系数大于1,说明产业碳足迹影响力大于所有产业的平均水平,容易拉动其他产业产生碳排放;碳足迹影响力系数小于1,说明碳足迹影响力小于所有产业的平均水平,其他产业产生碳排放时该产业容易受到影响而产生碳排放。水足迹影响力和感应力系数的含义与碳足迹相似。大多数能源密集型产业通过向下游产业提供能源而影响其下游产业的碳排放,碳足迹影响力系数较大(图3),因此在制定碳减排政策时要考虑到上下游产业之间碳足迹的转移。其他服务业投入以服务为主,碳水足迹影响力和感应力系数较低。服装业的碳足迹感应力系数与水足迹影响力系数大于1,这是由于服装业的部分原材料来自石油业与纺织业的化工产品,石油业容易拉动服装业产生碳排放,而服装业容易拉动纺织业产生水资源消耗。

(3) 水、能资源消耗强度直接决定了不同产业碳水足迹效率的高低(图4),一般来说,水能消耗强度越高的产业碳水足迹效率越低。产业的单位完全碳排放系数大于单位直接碳排放系数,单位取水系数亦有此规律。单位取水系数和单位碳排放系数都比较大的产业,其相应的足迹效率也较低,比如单位完全取水系数较大的农业(267.71 t/万元)、其他工业(105.21 t/万元)、商业及餐饮业(102.99 t/万元)等产业水足迹效率较低,单位

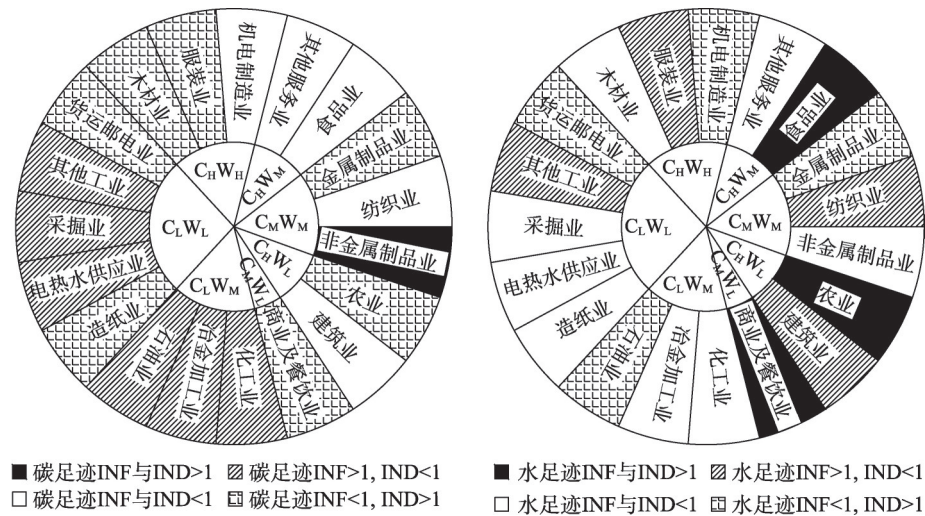


图3 基于INF和IND的2012年河南省各产业碳水足迹效率对比分析

Fig. 3 Comparison of industrial carbon and water footprint efficiency of Henan province in 2012 based on INF and IND

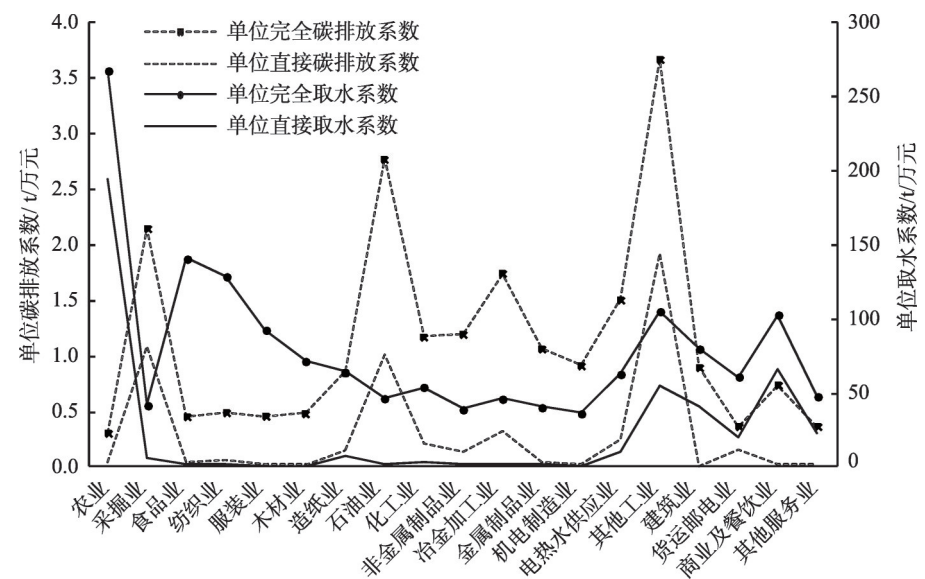


图4 2012年河南省各产业单位碳排放系数和单位取水系数分析

Fig. 4 Per unit carbon emission and water consumption coefficient of different industries of Henan province in 2012

碳排放系数较大的其他工业（3.67 t/万元）、石油业（2.77 t/万元）、采掘业（2.15 t/万元）、冶金加工业（1.75 t/万元）的碳足迹效率也都较低。单位取水系数和单位碳排放系数均较小的机电制造业和木材业，碳水足迹效率均较高。

（4）能源结构和产业技术水平直接影响产业碳水足迹效率。化石能源投入比例较高的采掘业、电热水供应业、石油业等产业碳足迹效率较低；河南省油改电和其他水利设施完善工程，有利于农业碳水足迹效率的提高；造纸业、商业及餐饮业和建筑业等产业存在着输水设施老化及工艺落后等现象，导致水足迹效率偏低。

（5）水资源和能源在产业活动中联系紧密，产业水能关联对碳水足迹效率具有深刻

的影响。农业灌溉的抽水过程需要能源的投入,而产生碳排放,目前河南省油改电的灌溉措施有利于提高农业用水过程中的碳足迹效率;电热水供应业在高温加热、冷却、输水、水资源的配置和终端使用等过程需要能源的投入而产生碳排放;冶金加工业、金属制品业和食品业等在利用能源进行加热后的冷却、蒸汽加热等过程也需要水资源的投入。因此,多数产业活动能源与水资源的利用相互影响,进而影响产业的碳水足迹效率。

(6) 另外,居民消费理念对碳水足迹效率也有一定的影响。由于终端产品中带有大量的隐含碳和虚拟水,因此,消费理念决定了对产品的需求类型和规模,并进一步影响不同产业的碳水足迹效率。

2.4 政策建议

结合本文的研究,建议河南省在未来产业发展中应注意以下方面:(1) 对于水足迹效率低的农业而言,可采用喷灌、滴灌技术、完善农田水利设施等措施提高水资源利用效率。(2) 对于碳足迹效率较低的采掘业、石油业、冶金加工业和其他工业等能源密集型产业来说,应通过优化能源结构、提高能源效率、引进新的工艺和设备等措施降低碳排放强度,提高能源利用效率。(3) 对于水足迹效率较低的电热水供应业、造纸业和建筑业等行业而言,应重点通过水的再生循环技术、节水设备及加强污水处理等措施降低工业生产的水足迹。(4) 对第三产业而言,则应采取多样化的政策措施。一方面要大力宣传、提倡节水低碳的消费方式;另一方面可以采用阶梯水价、节水节能设备提高水能资源的利用效率。(5) 在制定节水碳减排政策时不仅要考虑到产业链中不同行业之间的依赖关系,也要从水能关系的角度推动节水和碳减排双重目标的实现。(6) 加强产业节水和碳减排的制度约束,完善相关的法律法规并加强监管,采用奖惩相结合的措施,推动企业水能资源利用效率的提升。

3 结论与讨论

本文采用2012年河南省投入产出表及各产业取水量和能源消费数据,利用投入产出分析对不同产业的碳水足迹效率进行了对比研究,并提出了不同产业节水和碳减排的策略。主要结论如下:(1) 碳足迹和水足迹存在着行业不匹配的现象。农业水足迹大、碳足迹小;第二产业总体来说水足迹较小,能源密集型工业(比如采掘业、石油业、化工业和冶金加工业)碳足迹较大;第三产业水足迹较大而碳足迹较小。(2) 不同产业碳水足迹效率具有较大的差异。一般来说,碳水足迹较大的产业其碳水足迹效率偏低。其中,农业水足迹最大而水足迹效率最小,碳足迹较低而碳足迹效率较高。(3) 产业碳水足迹效率的差异主要受产业属性、水能消耗强度、能源结构、企业技术水平及产业关联情况等因素的影响。(4) 建议未来河南省应结合不同产业的特点及水能关联情况制定差别化的节水与碳减排政策,加强制度约束和法律监管,推动企业水能资源高效利用,进一步增强区域适应和减缓气候变化的能力。

需要说明的是,本文仅仅对不同产业的碳水足迹效率进行了对比分析,并基于产业类型划分提出了不同产业节水和碳减排的策略。未来应加强以下方面的研究:(1) 不同产业“水—能—碳”的关联。碳水关系实质上取决于“水—能”关联的程度,因此,应该进一步分析不同产业生命周期过程中“水—能”耦合关系,并探讨其对碳排放效率的影响机制。(2) 不同产业之间的碳流通及其效率。产业之间的关联是通过隐含碳的载体

——原料、产品和物资等的流通来实现的, 因此探讨不同产业之间的碳流通, 能够进一步定量评价产业之间的关联程度, 推动产业系统协同减排策略的制定。(3) 不同产业碳足迹的权衡问题。由于不同产业碳足迹及其效率具有较大的差异, 出于节水和碳减排的目标需要制定相关政策以推动企业水能资源高效利用, 但在未来产业发展过程中, 节水和碳减排目标的确定以及权衡是需要进一步思考的问题, 应该在保证经济社会正常运行前提下制定不同产业差别化的对策。

参考文献(References):

- [1] RIBAU J P, SOUSA J M C, SILVA C M. Reducing the carbon footprint of urban bus fleets using multi-objective optimization. *Energy*, 2015, 93: 1089-1104.
- [2] 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. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488. [CAI Z H, SHEN L X, LIU J G, 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.]
- [3] CHEN W M, WU S M, LEI Y L, et al. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 321-333.
- [4] LIN J Y, HU Y C, ZHAO X F, et al. Developing a city-centric global multiregional input-output model (CCG-MRIO) to evaluate urban carbon footprints. *Energy Policy*, 2017, 108: 460-466.
- [5] TANG C C, ZHONG L S, NG P, et al. Factors that influence the tourism industry's Carbon emissions: A tourism area life cycle model perspective. *Energy Policy*, 2017, 109: 704-718.
- [6] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1057. [ZHAO R Q, HUANG X J, ZHONG T Y. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1057.]
- [7] 魏本勇, 方修琦, 王媛, 等. 基于投入产出分析的中国国际贸易碳排放研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(4): 413-419. [WEI B Y, FANG X Q, WANG Y, et al. Estimation of carbon emissions embodied in international trade for China: An input-output analysis. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2009, 45(4): 413-419.]
- [8] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹. *地理研究*, 2010, 29(9): 1639-1649. [ZHAO R Q, HUANG X J. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu province. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1639-1649.]
- [9] AL-MANSOUR F, JEJCIC V. A model calculation of the carbon footprint of agricultural products: The case of Slovenia. *Energy*, 2017, 136: 7-15.
- [10] ALI B, KUMAR A. Development of life cycle water footprints for oil sands-based transportation fuel production. *Energy*, 2017, 131: 41-49.
- [11] PFISTER S, BOULAY A M, BERGER M, et al. Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA". *Ecological Indicators*, 2017, 72: 352-359.
- [12] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1022-1034. [LIU M, XU X Y, WANG H R, et al. Water footprint and spatial-temporal analysis of Hebei province based on virtual water theory. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 1022-1034.]
- [13] 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. *生态学报*, 2013, 33(11): 3488-3498. [WANG Y Y, WANG H X, ZHANG X. China water footprint trend analysis based on input-output tables. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11): 3488-3498.]
- [14] BARTOCCI P, FANTOZZI P, FANTOZZI F. Environmental impact of Sagrantino and Grechetto grapes cultivation for wine and vinegar production in central Italy by means of life cycle assessment, carbon footprint, water footprint, ecological footprint. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 569-580.
- [15] ZHAO D D, YU T, LIU J G, et al. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 919-928.

- [16] MILLER L, CARRIVEAU R. Balancing the carbon and water footprints of the Ontario energy mix. *Energy*, 2017, 125: 562-568.
- [17] SHAIKH M A, KUCUKVAR M, ONAT N C, et al. A framework for water and carbon footprint analysis of national electricity production scenarios. *Energy*, 2017, 139: 406-421.
- [18] ROTHAUSEN S, CONWAY D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, 2011, 1(4): 210-219.
- [19] RODRÍGUEZ N, ARMENTERAS D, RETANA J. National ecosystems services priorities for planning carbon and water resource management in Colombia. *Land Use Policy*, 2015, 42(42): 609-618.
- [20] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628. [ZHAO R Q, LI Z P, HAN Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [21] 樊胜岳, 麻亮亮. 中国大陆足迹家族的环境库兹涅茨曲线分析. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1452-1462. [FAN S Y, MA L L. Environmental Kuznets curve analysis of the footprints family in mainland China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1452-1462.]
- [22] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. *生态学报*, 2015, 35(6): 1647-1659. [FANG K. Footprint family: Concept, classification, theoretical framework and integrated pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1647-1659.]
- [23] ZHAO R Q, LIU Y, TIAN M M, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus. *Land Use Policy*, 2018, 72: 480-492.
- [24] WAKEEL M, CHEN B, HAYAT T, et al. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. *Applied Energy*, 2016, 178: 868-885.
- [25] 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. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [26] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5): 28-34. [SUN J W, CHEN Z G, ZHAO R Q, et al. Research on carbon emission footprint of China based on input-output model. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5): 28-34.]
- [27] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析: 以2002年江苏省经济为例. *生态学报*, 2006, 26(4): 1285-1292. [LAI L, HUANG X J, LIU W L, et al. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: A case study of Jiangsu province in 2002. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1285-1292.]
- [28] FANG D L, CHEN B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city. *Applied Energy*, 2017, 189: 770-779.
- [29] SU B, ANG B W, LI Y Z. Input-output and structural decomposition analysis of Singapore's carbon emissions. *Energy Policy*, 2017, 105: 484-492.
- [30] 严婷婷. 河北省水资源投入产出分析. 北京: 首都师范大学, 2009. [YAN T T. Water resource input-output analysis of Hebei province. Beijing: Capital Normal University, 2009.]
- [31] 中国投入产出学会课题组. 国民经济各部门水资源消耗及用水系数的投入产出分析: 2002年投入产出表系列分析报告之五. *统计研究*, 2007, 24(3): 20-25. [Researching Group of Chinese Input-output Association. Input-output analysis of water resources consumption and water input coefficient in national economic sectors: The fifth of researching report series on input-output tables of 2002. *Statistical Research*, 2007, 24(3): 20-25.]
- [32] 关爱萍. 南水北调工程受水区经济效应评价: 以河南省为例. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2008, 8(6): 29-36. [GUAN A P. Evaluation on the economic effects of the water imported areas in the South-to-North Water Transfer Project: Taking Henan province for example. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2008, 8(6): 29-36.]
- [33] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770. [ZHAO R Q, HUANG X J, PENG B Z. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(6): 758-770.]

Industrial carbon and water footprint efficiency of Henan province based on input-output analysis

YANG Wen-juan, ZHAO Rong-qin, ZHANG Zhan-ping, XIAO Lian-gang,
CAO Lian-hai, WANG Shuai, YANG Qing-lin

(School of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water
Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Water-carbon nexus is one of the important research fields of regional sustainable development. Studies on industrial carbon and water footprint efficiency from the perspective of water-carbon coupling not only help reveal the impact mechanism of the resource consumption intensity and efficiency on industrial carbon emissions, but also have great significant practical meanings for reducing water and carbon emissions in regional industrial transformation under the background of globalization. By the method of input-output analysis, input-output table of Henan in 2012 and industrial water and energy consumption data were applied to discuss industrial carbon and water footprint efficiency in this paper. The conclusions are as follows: (1) Carbon and water footprints of different industries are unmatched. The agricultural water footprint is the largest, which is 2333 times of the water footprint of lumbering. The carbon footprint of extractive industry is the largest, which is 273 times of food industry. (2) There are obvious differences among industrial water and carbon footprint efficiency. In general, the water/carbon footprint efficiency is lower in the industries with higher water/carbon footprint. (3) The different water/carbon footprint efficiency among different industries were mainly influenced by industry attribute, water and carbon consumption intensity, energy structure, technological level and relationship between industries, etc. (4) In the future, Henan province should make differentiated water-saving and carbon emission reduction policies in industrial development by combining the characteristics of different industries and the water-energy nexus, strengthening institutional constraint and legal supervision, promoting water and energy efficiency of enterprises, and enhancing regional adaptation and mitigation capacity under climate change.

Keywords: input-output; carbon footprint; water footprint; efficiency; industries