

DOI: 10.5846/stxb201706221136

张智雄, 孙才志. 中国人均灰水生态足迹变化驱动效应测度及时空分异. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Zhang Z X, Sun C Z. Driving effect measurements and spatial-temporal variation of the per capita gray water ecological footprint in China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

中国人均灰水生态足迹变化驱动效应测度及时空分异

张智雄¹, 孙才志^{1,2,*}

¹ 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

² 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

摘要: 将传统灰水足迹和水生态足迹方法相结合, 运用扩展的 Kaya 恒等式和 LMDI 指数分解方法对中国各省市的人均灰水生态足迹变化的驱动因素进行测度分析, 充分考虑了资本和劳动力因素, 选取经济活度效应, 资本深化效应, 资本效率效应, 足迹强度效应, 环境效率效应 5 个效应对人均灰水生态足迹变化的影响, 结合 ISODATA 聚类模型对各效应进行空间聚类, 从而分析各效应的空间特征。结果显示: 中国人均灰水生态足迹产出变化是这五种因素共同作用的结果, 资本深化效应和经济活度效应具有增量效应特点, 而环境效率效应、足迹强度效应、资本效率效应呈减量效应特点; 在各驱动效应的强弱对比中, 资本深化效应和足迹强度效应的特征较为明显。经济发展带动了科技进步也使得用水效率不断提高是足迹强度效应呈减量效应的主要原因; 而工业化阶段经济向资本密集型转变是资本效率下降的主要原因。研究对中国灰水生态变化与资本要素之间的关系进行了探讨, 对环保政策的调整及水资源可持续利用研究具有一定的参考价值。

关键词: 灰水生态足迹; Kaya 恒等式; LMDI 模型; 资本因素

Driving effect measurements and spatial-temporal variation of the per capita gray water ecological footprint in China

ZHANG Zhixiong¹, SUN Caizhi^{1,2,*}

¹ College of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

² Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: In this study, the authors apply water ecological footprint measurement methods to the field of gray water footprint research and provide a method for calculating gray water ecological footprints. Based on the extended Kaya identity and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) technique decomposition methods, we calculated the gray water ecological footprint of 31 provinces and the per capita gray water ecological footprint in China from 2000 to 2014. We then measured and decomposed the values of the driving effects of per capita gray water ecological footprint change. From these results, we selected five of the more important economic and environmental factors to apply as capital factors to gray water research. This method included measurements of the effects of the working population, capital stocks, capital output coefficients, water ecological footprint intensity, and gray water ecological footprint emission coefficients. The five driving effects were economic activity, capital deepening, capital efficiency, footprint intensity, and environmental efficiency. The values of the driving effects on changes during the time period are discussed and analyzed based on the Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques Algorithm (ISODATA) clustering model for spatial clustering of the effects. The results showed that the Chinese per capita gray water ecological footprint output changed because of the interaction of these five factors. Among them, the incremental capital deepening effect was obvious, as a large amount of capital has been invested to promote rapid

基金项目: 国家社会科学基金重点项目 (16AJY009)

收稿日期: 2017-06-22; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

development of the regional economy and to employ a rapidly growing population. Economic activity can also promote the characteristics and the size of regional economies as population growth will increase regional demands for water. The other capital deepening effect is a decline in the output efficiency of capital. With the rapid development of its economy, China is in a period of industrialization and urbanization. The economic structure has gradually changed from a population-intensive to a capital-intensive structure. Industry, especially heavy industry, had a higher initial investment and a lower output efficiency, which is why the effect of capital efficiency continues to decrease. The most obvious effect on footprint intensity was the effect of per capita gray water ecological footprint reduction. With the improvement of economic activity and advances in science and technology, the water ecological footprint intensity has been greatly reduced. As a result of the effective control of pollutant emissions, the per capita gray water ecological footprint in most provinces and cities has shown a decreasing trend. A reduction in environmental efficiency is an inevitable consequence of a decrease in the water ecological footprint intensity. With a decrease in water ecological footprint intensity, more water is reused and we can improve water efficiency in most provinces to reduce the gray water ecological footprint. This study discusses the relationship between gray water ecological changes and capital factors; the reported results have value as a reference for the adjustment of environmental policies and the sustainable utilization of water resources.

Key Words: gray water ecological footprint; Kaya identity; LMDI technique decomposition method; capital element

随着中国社会经济的快速发展和人口增长,水体污染严重和废水排放的增加已成为中国水资源面临的主要问题。统计数据显示,进入 21 世纪以来,工业废水和城镇生活污水排放量呈逐年递增的趋势,水污染状况不容忽视。鉴于此,探索中国水污染加剧的主要驱动因素,合理分析各驱动因素之间的强弱效应,可以为控制水污染状况加剧提供科学的参考依据。

Hoekstra 等在 2008 年首次提出了“灰水足迹”的概念^[1],随着研究的进一步推进,灰水足迹的涵义也进一步完善,2011 年水足迹网络的灰水足迹工作小组将灰水足迹定义为以水环境质量标准为基准,将污染负荷稀释至高于特定环境水质标准所需淡水的体积^[2]。灰水足迹的提出为水污染领域的研究提供了新的研究思路。在国外,多名专家和学者通过不同的方式测算了灰水足迹并分析了其运移情况^[3-4],而其余研究主要集中在对国家和区域以及工农业产品灰水足迹测度和分析^[5-10]。在国内,对灰水足迹以及水污染的研究已经取得了一系列成果,但目前针对灰水足迹的研究仍然处于初级阶段,国内灰水足迹研究尚处于引进消化阶段,主要是对国外研究方法的学习和应用^[11],并且研究多集中在对农畜产品灰水足迹的测度及分析方面^[12-13],2015 年后,孙才志、韩琴 等对中国 31 个省市的灰水足迹进行了较为全面的测算,并对其时空分类特性进行了分析^[14-15],并将之前广泛运用于碳排放研究的 Kaya 恒等式引入到灰水足迹研究领域^[11],将灰水足迹影响因素分为六个驱动效应来研究,推动了灰水足迹的研究进展;而近年来,国内有更多的学者将 Kaya 恒等式运用到水污染的研究领域,马丽利用 Kaya 恒等式和 LMDI 模型分析了中国工业废水变化的影响因素^[16];凌立文等基于 Kaya 恒等式与 LMDI 分解法探讨了广东省工业废水的影响因素^[17]。新方法的运用也为灰水足迹的研究提供了新的切入点。从已有的研究文献来看,目前对灰水足迹的研究主要集中在区域和产品的灰水足迹测算和灰水足迹内部因素进行研究分析方面,而不同地区的人口、面积和经济情况均有差异,只对区域灰水足迹内部因素分析评价并不能客观反映出人口、经济等因素对灰水足迹变化的影响。

本文将水生态足迹以面积为单位量化人类消耗水资源情况的方法引入灰水足迹研究中来,将量化吸收污染物所需水量转化为相应的产水面积,相较于灰水足迹以体积为量化单位的方法而言,可直观反映污染物面源污染面积大小以及区域水资源所承载的污染物压力的情况。此外,当前对灰水足迹影响因素的研究主要集中在经济、人口和水效率方面,研究这些因素时通常只考虑总人口数和 GDP 的影响,而灰水产生主要是由生产活动造成的,其中资本和劳动力是生产活动中两个关键的生产要素,但目前的研究没有考虑此类因素的成果。鉴于此,本文在测算灰水生态足迹的基础上引入扩展的 Kaya 恒等式建立因素分解模型,采用 LMDI 模型

对影响中国人均灰水生态足迹年际变化的驱动效应进行定量测算,探索资本、劳动力和用水强度等因素对人均灰水生态足迹变化的影响,以期扩展灰水生态足迹和水生态足迹研究方法。

1 研究方法数据来源

1.1 水生态足迹

水生态足迹是指一定人口和经济规模条件下维持水资源消费和自然环境进化所必需的水资源用地面积^[18]。测算方法参照文献^[19]将其分为表示生活、生产和生态用水足迹的水量生态足迹和表示水污染的灰水生态足迹。与水足迹以体积为单位相比,可更直观的展现生产生活对当地水资源占用情况。计算公式为:

$$WEF = WER + GWEF \quad (1)$$

式中,WEF 为水足迹生态,WER 为水量生态足迹,GWEF 为灰水生态足迹。水量生态足迹是对传统水足迹中绿水和蓝水足迹部分所需产水面积进行测算,计算公式为:

$$WER = \sqrt{P \times wer} = \gamma \times (WF/w) \quad (2)$$

式中,WER 为区域人均水生态足迹,WF 为区域水足迹(不包括灰水足迹), γ 为全球水资源均衡因子, w 为水资源世界平均生产能力。区域水足迹 WF 的计算方法采用之前对水足迹的研究文献^[20]中的计算方法,在此不再赘述,文献^[20]中的水污染足迹将不计入水量生态足迹的测算范围。

1.2 灰水生态足迹

之前研究文献将灰水足迹定义为以水环境质量标准为基准,将污染负荷稀释至高于特定环境水质标准所需淡水的体积^[14]。灰水生态足迹则是将稀释这些污染负荷所需淡水的体积转化为相应的产水面积。参照 Arjen Y. Hoekstra 等编著的《水足迹评价手册》^[2]中对灰水足迹计算方法,选取化学需氧量(COD)和氨氮(NH₃)为主要测算对象,将灰水生态足迹分为工业、农业、生活三个子账户,其中农业部分包括种植和养殖业两部分,生活污水与工业污水同属于点源污染且主要污染物相同,故计算同工业灰水生态足迹。计算公式为:

$$GWEF = GWEF_i + GWEF_a + GWEF_l \quad (3)$$

$$GWEF_i = \gamma \times \max\left[\left(\frac{L_{i-COD}}{C_{COD}}, \frac{L_{i-NH_3}}{C_{NH_3}}\right)/w\right] \quad (4)$$

$$GWEF_a = GWEF_f + GWEF_h = \gamma \left\{ \left[\left(\frac{\alpha \times Appl}{C_{COD}} \right) / w \right] + \max\left[\left(\frac{L_{h-COD}}{C_{COD}}, \frac{L_{h-NH_3}}{C_{NH_3}}\right)/w\right] \right\} \quad (5)$$

$$L_{i-COD} \text{ (或 } L_{i-NH_3}) = \text{畜禽数量} \times \text{饲养周期} \times \text{粪污染物含量} \times \text{流失率} \times (\text{日排粪量} + \text{日排尿量}) \quad (6)$$

式中, $GWEF_i$ 、 $GWEF_a$ 、 $GWEF_f$ 、 $GWEF_h$ 、 $GWEF_l$ 分别为工业、农业、生活、种植业、养殖业灰水生态足迹, α 为氮肥淋失率,Appl 为氮肥施用量, L_{i-COD} 、 L_{i-NH_3} 分别为区域内工业 COD、NH₃的排放浓度, L_{l-COD} 、 L_{l-NH_3} 分别为养殖业 COD、NH₃排放浓度, C_{COD} 、 C_{NH_3} 分别为国内单位面积水域 COD、NH₃排放达标浓度。

1.3 扩展的 Kaya 恒等式

Kaya 恒等式是日本学者 Yoichi Kaya 于 1989 年提出的^[21]并广泛用于碳排放方面的研究,经过多年研究扩展,现已广泛应用到能源研究领域。Kaya 恒等式将碳排放主要分解为 4 个影响因素,公式如下:

$$C = P \times \left(\frac{G}{P}\right) \times \left(\frac{E}{G}\right) \times \left(\frac{C}{E}\right) \quad (7)$$

式中, G 代表国内生产总值(GDP), E 代表能源消费; G/P 代表人均 GDP, E/G 代表能源消费强度, C/E 代表能源消费碳强度。为更好的表述人均灰水生态足迹产出的影响因素,将 Kaya 恒等式进行扩展表示为:

$$gwef = \frac{GWEF}{P} = \left(\frac{P_w}{P}\right) \times \left(\frac{CS}{P_w}\right) \times \left(\frac{G}{CS}\right) \times \left(\frac{WER}{G}\right) \times \left(\frac{GWEF}{WER}\right) = f \cdot d \cdot o \cdot w \cdot e \quad (8)$$

式中, CS 为区域资本存量, P_w 为区域劳动人口数量。本文将影响人均灰水生态足迹变化的因素分解为五个驱动效应,即: $f = P_w / P$,劳动人口占总人口比重,经济活度效应。劳动力是重要生产要素也是经济发展的推动

力,选取此效应来反映参与经济活动人口比例对人均灰水生态足迹变化的影响; $d=CS/P_w$,资本-劳动比,资本深化效应。资本是重要的生产要素,随着经济发展和社会主义工业化,经济也在向资本密集型过度,选取资本深化效应有助于分析资本因素对人均灰水生态足迹变化的影响; $o=G/CS$,产出资本比,资本效率效应。反应区域资本产出效率对人均灰水生态足迹变化的影响; $w=WER/G$,水生态足迹强度。表示区域的足迹强度效应,选取此项来表示用水强度对人均灰水生态足迹的影响; $e=GWEF/WER$,灰水生态足迹产出系数,环境效率效应,反映区域灰水生态足迹占水生态足迹的比例。本文参照单豪杰的算法^[22],运用永续盘存法计算资本存量,采用 10.96% 的折扣率,对于西藏缺失的固定资产投资价格指数数据,把靠近西藏且经济发展水平相似的新疆和青海的固定资产投资价格指数的算术平均值作为替代指标。

1.4 LMDI 分解法

对数平均迪氏指数方法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)由新加坡学者 B.W. Ang 等人提出^[23-24],最初应用于碳排放研究领域,主要用于分析能源强度变化,是目前国际上常用的因素分解模型^[23],是一种完全的、不产生残差的分解分析方法,并且 LMDI 分解法的乘积形式、加和形式都是无差异的^[24]。

根据 LMDI 分解模型,基期和第 t 年的人均灰水生态足迹变化值 $\Delta \frac{GWEF}{P}$ 称之为总效应,由经济活度效应(f_{effect}),资本深化效应(d_{effect}),资本效率效应(o_{effect}),足迹强度效应(w_{effect}),环境效率效应(e_{effect})五部分组成。经济活度效应属于就业效率水平,以期水环境治理提供良好的经济基础;资本深化效应属于资本积累效率水平,以期投资增长带动水环境改善;在资本效率效应方面,需要消耗更少的水资源换取更大的经济产值;足迹强度效应属于用水效率水平,以期用更少的用水换取更大的经济效益;环境效率效应是水效率的一种表现形式,以期更少的水资源向灰水足迹转化。各效应值为正代表该效应呈增量效应,会导致人均灰水生态足迹的增加,反之则对人均灰水生态足迹具有抑制作用。5 个驱动效应关系可以表示为:

$$\Delta \frac{GWEF}{P} = \Delta GWEF_t - \Delta GWEF_o = f_{effect} + d_{effect} + o_{effect} + w_{effect} + e_{effect} \quad (9)$$

其中:

$$f_{effect} = \frac{ef_{wgt} - ef_{wgo}}{\ln ef_{wgt} - \ln ef_{wgo}} \ln \left(\frac{f_t}{f_o} \right) \quad (10)$$

$$d_{effect} = \frac{ef_{wgt} - ef_{wgo}}{\ln ef_{wgt} - \ln ef_{wgo}} \ln \left(\frac{d_t}{d_o} \right) \quad (11)$$

$$o_{effect} = \frac{ef_{wgt} - ef_{wgo}}{\ln ef_{wgt} - \ln ef_{wgo}} \ln \left(\frac{o_t}{o_o} \right) \quad (12)$$

$$w_{effect} = \frac{ef_{wgt} - ef_{wgo}}{\ln ef_{wgt} - \ln ef_{wgo}} \ln \left(\frac{w_t}{w_o} \right) \quad (13)$$

$$e_{effect} = \frac{ef_{wgt} - ef_{wgo}}{\ln ef_{wgt} - \ln ef_{wgo}} \ln \left(\frac{e_t}{e_o} \right) \quad (14)$$

1.5 研究对象和数据来源

本文以中国 31 个省、直辖市、自治区(以下简称省市,不包含港澳台地区)2000—2014 年的统计数据为参考,测算各省市的灰水生态足迹和人均灰水生态足迹。污染物排放量、人口等数据取自《中国统计年鉴》、《中国水资源公报》、《中国环境统计年鉴》以及各省市统计年鉴;测算灰水生态足迹所需数据来源参考文献^[14-15]在此不在赘述;全球水资源均衡因子 γ 和水资源世界平均产生能力 w 参照世界自然基金会计算结果^[19],取 $\gamma=5.19$, $w=3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;选取全国平均氮肥淋失率 $\alpha=7\%$ ^[14];根据《污水综合排放标准》(GB8978—1996)中一级排放标准,选取 COD 和 NH_3 排放达标浓度分别为 60、15 mg/L ^[15]。

2 计算结果及分析

2.1 灰水生态足迹时间差异

依据公式(1)计算可知,研究期内中国的灰水生态足迹和人均灰水生态足迹总体上都经历了一个先上升

又下降的趋势,2000—2006 年中国的灰水生态足迹呈先降后增的趋势,2000 到 2002 年灰水生态足迹由 $14453.85 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 降至 $14168.04 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2006 年上升到 $15595.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$,自 2007 年起开始逐渐下降,到 2014 年已降至 $13109.44 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。这主要源于政策监管力度加大和产业水平不断升级,污染物排放和灰水产出得到了有效控制^[15]。根据图 1 可知,人均灰水生态足迹变化趋势与灰水生态足迹相近,由于人口增长率较低且基数较大,故人均灰水生态足迹受人口变化影响较小。

2.2 灰水生态足迹空间差异

各省市的灰水生态足迹整体分布见图 2,呈西高东

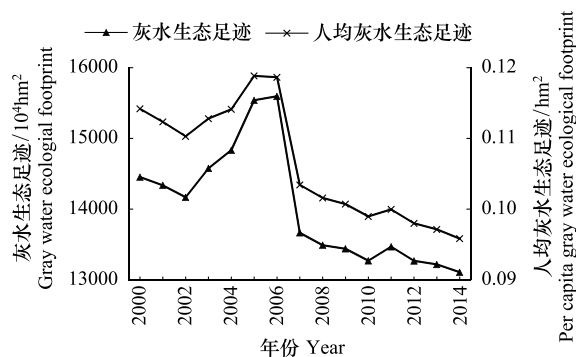


图 1 2000—2014 年中国灰水生态足迹变化图

Fig.1 The change of gray water ecological footprint and per capita gray water ecological footprint in China from 2000 to 2014

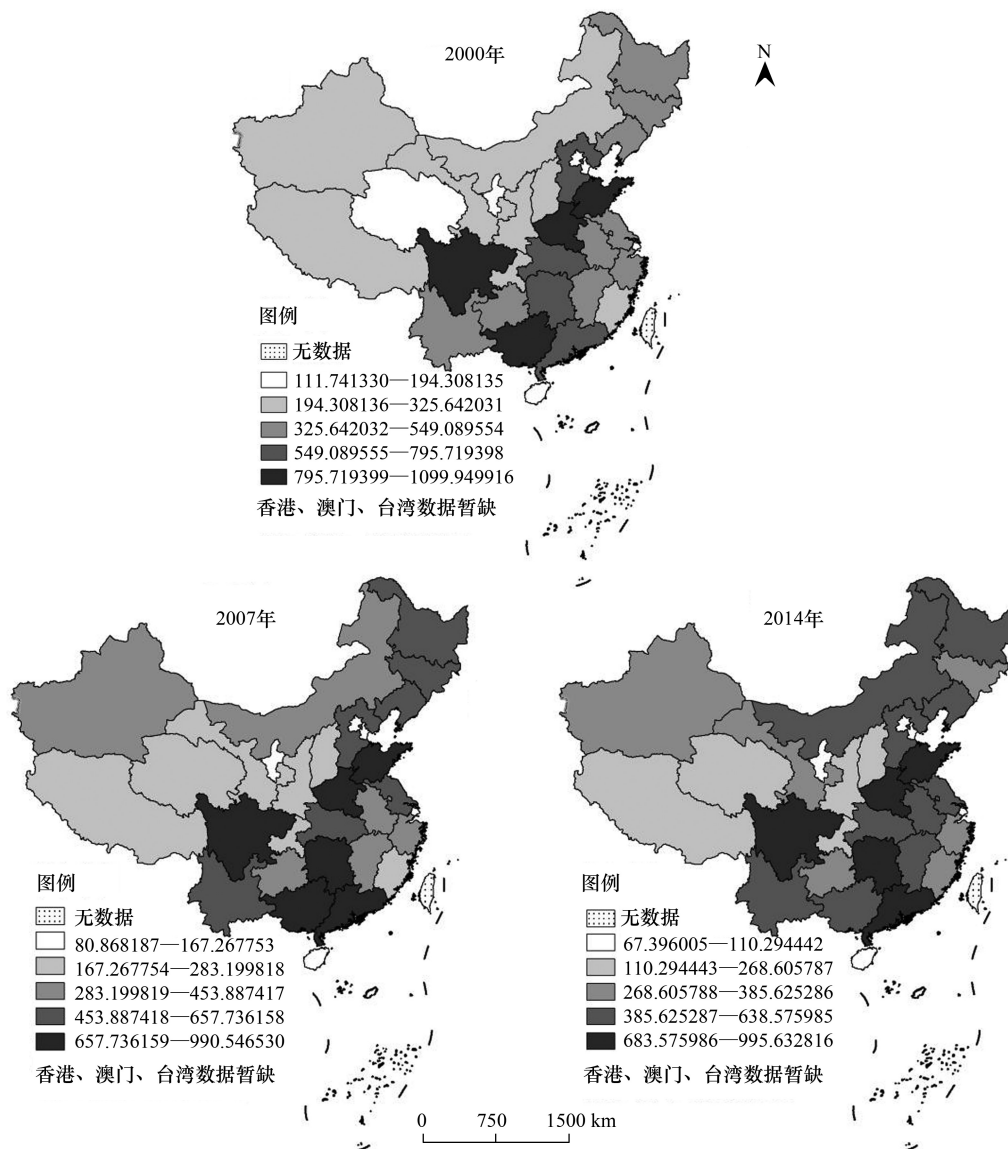


图 2 中国省际灰水生态足迹分布图 (10^4 hm^2)

Fig.2 The map of gray water ecological footprint in China

低分布。四川和河南两省 15 年的平均灰水生态足迹分别为 $1044.86 \times 10^4 \text{hm}^2$ 和 $1004.50 \times 10^4 \text{hm}^2$, 作为传统农业和人口大省, 为达到作物增产的目的不合理的增加化肥农药的施用量, 同时大量畜禽粪便不合理处置, 造成其农业灰水足迹和灰水生态足迹较高^[25-26]; 北京年平均灰水生态足迹为 $90.17 \times 10^4 \text{hm}^2$, 是 31 个省市中的最小值。东中部各省市的灰水生态足迹整体呈现先升后降的趋势, 大多数省市灰水生态足迹下降趋势较为明显, 西部的部分省市灰水生态足迹出现了增长现象, 内蒙古、云南、甘肃、青海、新疆的灰水生态足迹均有一定程度的上升。2000 年中国开始实施“西部大开发”战略, 西部经济快速发展也带来能耗和人口增长, 粮食需求也不断增加, 为达到增产而大量使用农药、化肥造成农业污染, 导致农业水环境问题日渐突出; 由于各地区科技发展程度不同, 环保门槛也不一致, 被东部地区淘汰的产业, 却被中西部地区以优惠政策引进, 导致了“东污西移”, 污染处理设备与发展速度不匹配也是灰水生态足迹增加的原因。人均灰水生态足迹的空间分布如图 3 所示, 与灰水生态足迹空间分布特征相似, 人均灰水生态足迹平均值最小的地区是北京 ($0.06 \text{hm}^2/\text{人}$), 最大的地区是西藏 ($0.88 \text{hm}^2/\text{人}$), 西部地区人口密度相对较低, 也是人均灰水生态足迹较高的原因。

3 人均灰水生态足迹产出的驱动因素分析

基于 LMDI 分解模型定量测算了经济活度效应, 资本深化效应, 资本效率效应, 足迹强度效应, 环境效率效应对全国 (见表 1) 以及各省市 (见表 2) 人均灰水生态足迹产出的贡献作用。足迹强度效应呈减量效应特点, 用水强度不断降低对灰水生态足迹的降低有着重要作用; 资本深化效应呈增量效应特点, 工业化时期大量资本投入是经济发展的源动力, 经济规模的扩大需要强大的用水量来支撑; 环境效率效应和资本效率效应呈减量效应特点, 但效应值相对较低, 灰水生态足迹降低和资本产出效率较低是二者呈减量效应的主要原因; 经济活度效应呈微弱增量效应特点, 人口的低增长率是经济活度效应值较低的主要原因。为直观分析各驱动效应的空间特征, 本文采用 ISODATA 聚类模型^[27] 将 31 个省市的测算结果按照强、中、弱驱动在空间上进行聚类 (见表 3), 并作出了各省市各个聚类分布图 (图 4), 然后对每一类驱动进行具体分析。

表 1 中国人均灰水生态足迹效应分解 ($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 1 Effect decomposition of China per gray water ecological footprint

年份 Year	经济活度效应 Economic activity	资本深化效应 Capital deepening	资本效率效应 Capital efficiency	足迹强度效应 Footprint intensity	环境效率效应 Environmental efficiency	总效应 Total
2000—2001	-0.0001	0.0118	-0.0016	-0.0116	-0.0004	-0.0018
2001—2002	0.0005	0.0120	-0.0025	-0.0079	-0.0043	-0.0020
2002—2003	0.0008	0.0134	-0.0009	-0.0158	0.0050	0.0025
2003—2004	0.0018	0.0145	0.0019	-0.0134	-0.0035	0.0013
2004—2005	0.0014	0.0138	0.0005	-0.0104	-0.0006	0.0047
2005—2006	0.0015	0.0162	0.0011	-0.0154	-0.0035	-0.0002
2006—2007	0.0016	0.0165	0.0049	-0.0238	-0.0143	-0.0152
2007—2008	0.0011	0.0176	-0.0016	-0.0143	-0.0046	-0.0018
2008—2009	-0.0005	0.0172	-0.0091	-0.0056	-0.0028	-0.0009
2009—2010	0.0009	0.0176	-0.0025	-0.0139	-0.0038	-0.0017
2010—2011	0.0025	0.0162	-0.003	-0.0121	-0.0028	0.0010
2011—2012	-0.0020	0.0189	-0.0070	-0.0094	-0.0025	-0.0020
2012—2013	0.0003	0.0151	-0.0070	-0.0037	-0.0055	-0.0009
2013—2014	-0.0009	0.0147	-0.0063	-0.0136	0.0047	-0.0013
效应均值 Effect Average	0.0006	0.0154	-0.0024	-0.0122	-0.0028	
效应标准差 Effect standard deviation	0.0012	0.0021	0.0039	0.0049	0.0046	
效应变异系数 Effect coefficient of variation	1.8713	0.1395	-1.6580	-0.4035	-1.6568	

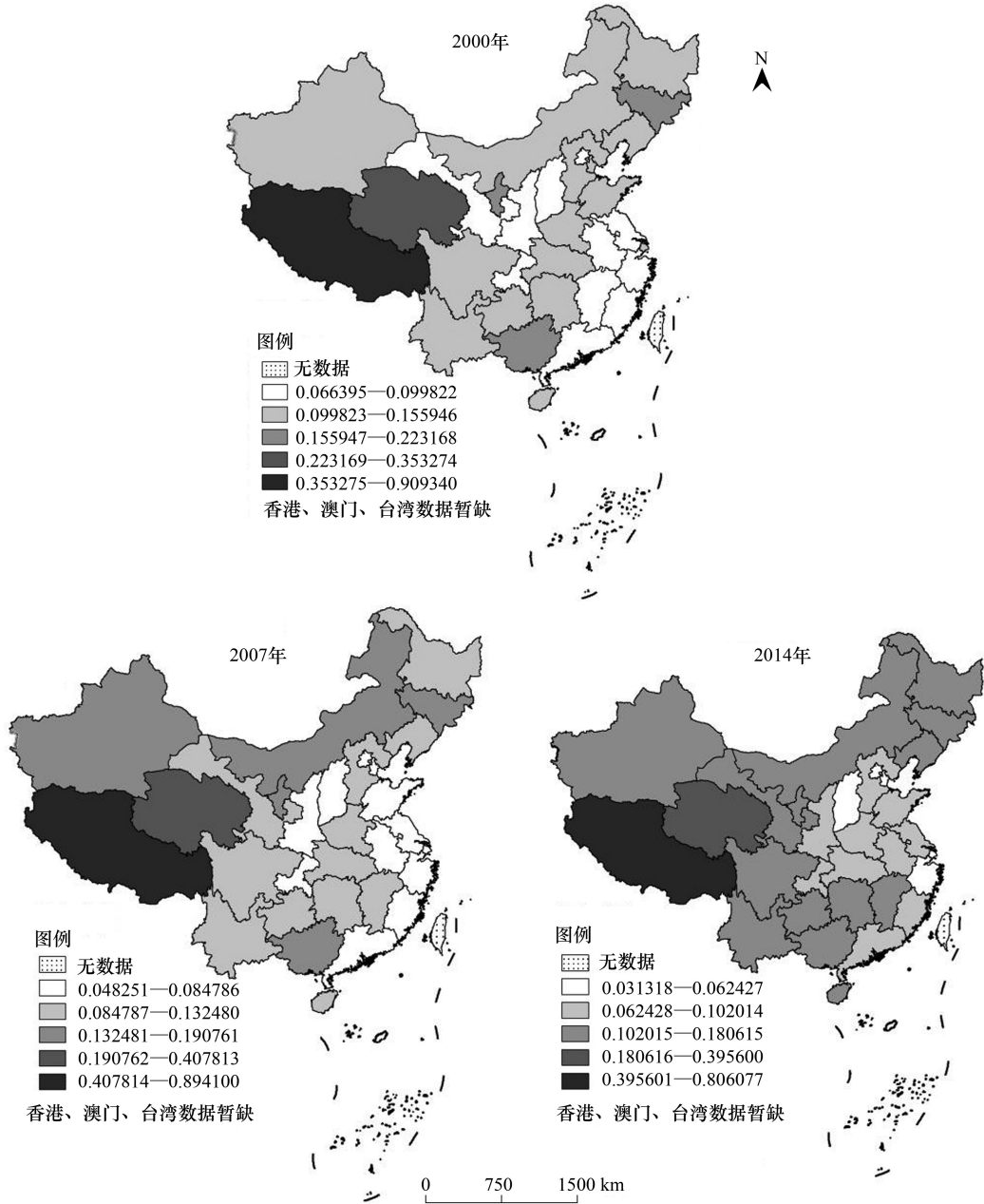


图3 中国省际人均灰水生态足迹分布图(hm²/人)

Fig.3 The map of per gray water ecological footprint in China

表2 中国各省市人均灰水生态足迹效应分解(hm²/人)

Table 2 Effect decomposition of pergray water ecological footprint all provinces in China

地区 Region	经济活跃度效应 Economic activity	资本深化效率 Capital deepening	资本效率效应 Capital efficiency	足迹强度效应 Footprint intensity	环境效率效应 Environmental efficiency	总效应 Total
北京	0.0011	0.0040	0.0020	-0.0080	-0.0032	-0.0041
天津	-0.0003	0.0116	0.0001	-0.0114	-0.0043	-0.0043
河北	0.0004	0.0125	-0.0010	-0.0101	-0.0052	-0.0034
山西	0.0006	0.0120	-0.0013	-0.0111	-0.0021	-0.0019
内蒙古	0.0014	0.0406	-0.0103	-0.0252	-0.0033	0.0032
辽宁	0.0006	0.0203	-0.0054	-0.0127	-0.0043	-0.0015

续表

地区 Region	经济活跃度效应 Economic activity	资本深化效率 Capital deepening	资本效率效应 Capital efficiency	足迹强度效应 Footprint intensity	环境效率效应 Environmental efficiency	总效应 Total
吉林	0.0010	0.0305	-0.0084	-0.0184	-0.0091	-0.0044
黑龙江	0.0015	0.0176	-0.0047	-0.0125	-0.0025	-0.0006
上海	-0.0010	0.0070	0.0013	-0.009	-0.0037	-0.0054
江苏	-0.0001	0.0112	-0.0005	-0.0086	-0.0019	0.0001
浙江	0.0009	0.0085	-0.0004	-0.0101	-0.0006	-0.0017
安徽	0.0008	0.0108	-0.0014	-0.0089	-0.0022	-0.0009
福建	0.0014	0.0099	-0.0013	-0.0090	-0.0003	0.0007
江西	0.0006	0.0158	-0.0021	-0.0122	-0.0016	0.0005
山东	0.0004	0.0142	-0.0018	-0.0111	-0.0051	-0.0034
河南	0.0008	0.0179	-0.0039	-0.0128	-0.0037	-0.0017
湖北	0.0000	0.0146	-0.0014	-0.0130	-0.0007	-0.0005
湖南	0.0009	0.0197	-0.0033	-0.0164	-0.0010	-0.0001
广东	0.0012	0.0093	0.0001	-0.0102	-0.0014	-0.0010
广西	0.0019	0.0285	-0.0054	-0.0211	-0.0090	-0.0051
海南	0.0016	0.0171	-0.0023	-0.0136	-0.0046	-0.0018
重庆	-0.0003	0.0144	-0.0006	-0.0127	-0.0009	-0.0001
四川	0.0006	0.0190	-0.0015	-0.0189	0.0000	-0.0008
贵州	0.0012	0.0166	0.0003	-0.0178	-0.0002	0.0001
云南	0.0009	0.0179	-0.0032	-0.0150	-0.0001	0.0005
西藏	0.0114	0.1671	-0.0615	-0.1219	-0.0024	-0.0073
陕西	0.0005	0.0131	-0.0002	-0.0104	-0.0038	-0.0008
甘肃	-0.0003	0.0189	-0.0033	-0.0144	0.0017	0.0026
青海	-0.0015	0.0682	-0.0105	-0.0639	0.0108	0.0031
宁夏	0.0002	0.0307	-0.0035	-0.0188	-0.0127	-0.0041
新疆	0.0012	0.0203	-0.0018	-0.0138	-0.0059	0.0001
全国 National total	0.0006	0.0154	-0.0024	-0.0122	-0.0028	-0.0014

表 3 中国人均灰水生态足迹产出变化的驱动效应聚类表 (hm²/人)

Table 3 The cluster result of per gray water ecological footprint output driving effect in China

年份 Year	效应强驱动 High drive	效应中驱动 Medium drive	效应弱驱动 Weak drive
2000—2001	0.0019/0.0924/0.0406/-0.1333/-0.0162	-0.0006/0.0316/-0.0069/-0.0130/-0.0069	-0.0028/0.0111/-0.0028/-0.0090/-0.0003
2001—2002	0.0012/0.0747/0.0321/-0.0983/-0.0337	0.0011/0.0307/-0.0084/-0.0127/-0.0055	0.0022/0.0107/-0.0030/-0.0066/-0.0008
2002—2003	0.0007/0.1681/-0.0668/-0.1437/0.0069	0.0008/0.0361/-0.0053/-0.0054/0.0097	0.0007/0.0117/0.0004/-0.0156/-0.0068
2003—2004	0.0049/0.2093/-0.1155/-0.1112/-0.0072	0.0012/0.0352/0.0005/-0.0437/-0.0014	0.0015/0.0122/0.0038/-0.0149/0.0076
2004—2005	0.0068/0.2783/-0.1604/0.0242/0.0212	0.0021/0.0307/0.0078/-0.0254/-0.0124	-0.0020/0.0125/0.0060/-0.0147/0.0016
2005—2006	0.0026/0.2307/-0.1224/-0.2447/-0.0041	0.0014/0.0373/-0.0016/-0.0285/0.0021	0.0009/0.01444/0.0001/-0.0114/-0.0019
2006—2007	0.0060/0.1694/-0.0803/-0.1514/-0.0157	0.0014/0.0406/0.0016/-0.0418/-0.0178	0.0018/0.0145/0.0020/-0.0173/-0.0084
2007—2008	0.0027/0.1863/-0.0840/7-0.0346/-0.0176	0.0003/0.0459/-0.0029/-0.0306/-0.0104	0.0010/0.0157/-0.0000/-0.0138/-0.0033
2008—2009	0.0035/0.1346/-0.0665/-0.2045/-0.0051	0.0012/0.0422/-0.0160/-0.0310/0.0036	-0.0110/0.0170/-0.0045/-0.0067/0.0009
2009—2010	0.0034/0.1461/-0.0532/-0.1177/-0.0122	-0.0002/0.0540/-0.0058/-0.0325/-0.0059	-0.0003/0.0154/0.0004/-0.0152/-0.0012
2010—2011	0.0058/0.1734/-0.0714/-0.1312/-0.0249	0.0028/0.0429/-0.0059/-0.0346/-0.0073	0.0075/0.0145/-0.0005/-0.0124/0.0038
2011—2012	-0.0050/0.1630/-0.0169/-0.1431/-0.0024	-0.0021/0.0482/-0.0181/-0.0232/-0.0036	-0.0051/0.0184/-0.0063/-0.0081/-0.0017
2012—2013	0.0000/0.1436/-0.0389/-0.1052/-0.0231	0.0003/0.0404/-0.0219/-0.0080/-0.0029	0.0008/0.0150/-0.0069/-0.0060/0.0026
2013—2014	-0.0028/0.1698/-0.0567/-0.1126/-0.0095	-0.0009/0.0401/-0.0212/-0.0379/0.0060	-0.0019/0.0151/-0.0066/-0.0102/0.0121
平均 Average	-0.0083/-0.1219/-0.0615/0.1671/0.0023	0.0006/0.0397/-0.0075/-0.0272/-0.0038	-0.0005/0.0142/-0.0012/-0.0116/0.0003

注:表中数字分别代表了经济活跃度效应,资本深化效应,资本效率效应,足迹强度效应,环境效率效应

3.1 经济活度效应

中国经济高速增长很大程度上源于劳动力的充分供给^[28], 劳动人口的增加同时也不可避免伴随着生活污水和工业废水排放的增加。经济活度效应绝对值在五个驱动效应值中最小, 年均值为 $0.0006 \text{ hm}^2/\text{人}$, 由于人口增长率较低, 经济活度效应值较低, 个别年份和省份还会随人口数量波动呈现减量效应的特点。

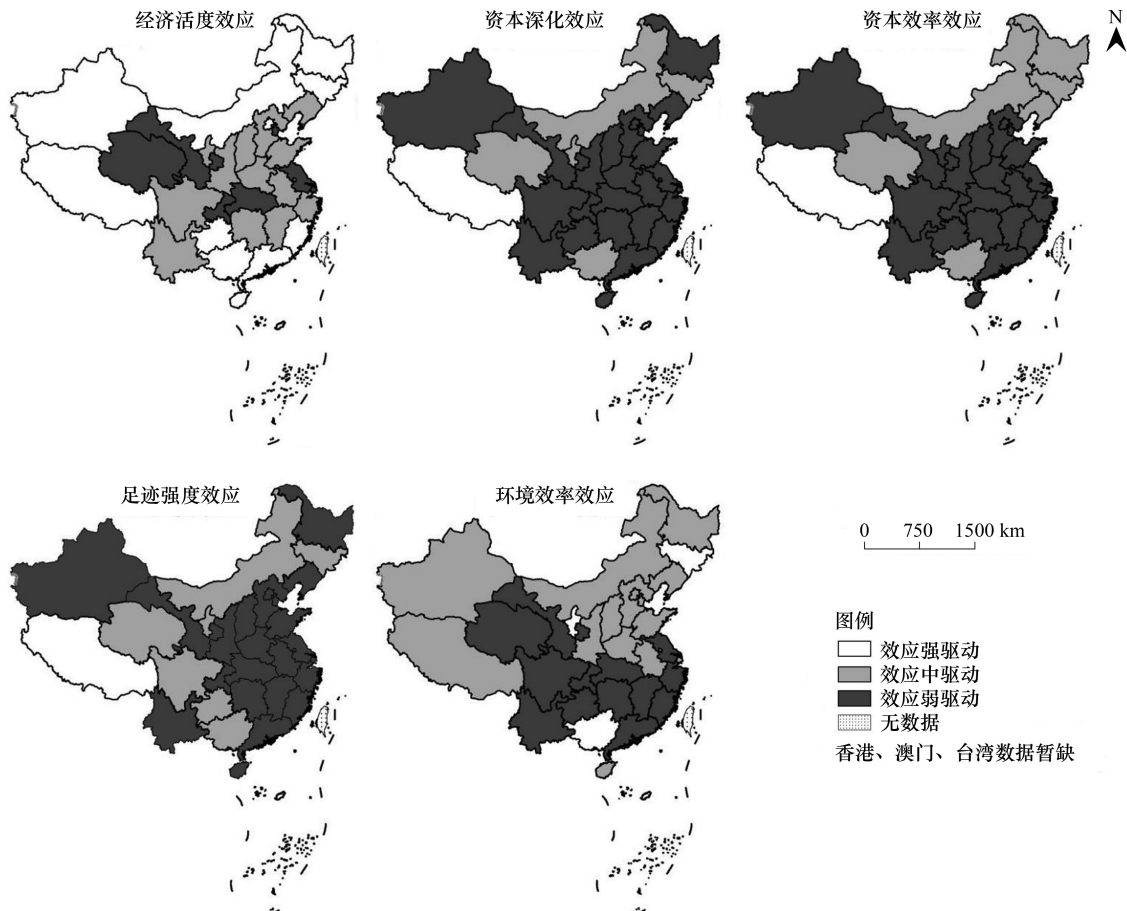


图 4 中国人均灰水生态足迹驱动效应聚类图

Fig.4 Driving effects cluster map of pergray water ecological footprint output in China

经济活度效应强驱动的地区是北京、内蒙古、吉林、黑龙江、福建、广东、广西、海南、贵州、西藏、新疆。研究期内西藏的经济活度效应年平均值为 $0.0114 \text{ hm}^2/\text{人}$, 在所有省市中效应值最高。随着经济发展, 产业规模扩大带动了劳动人口增加, 同时由于地区的基础设施较为落后, 排污和监管措施不够完善, 导致了人均灰水生态足迹的增加, 经济活度增量效应特点加剧了人均灰水生态足迹增长; 北京、吉林、黑龙江、福建、广东、海南的经济多元化发展带动了劳动人口的增长, 这些地区人口数量较高, 且人口增长率低于就业人口增长比率, 经济活度效应呈增量特点; 内蒙古、广西、贵州、新疆地处中国西部, 经济规模不断扩大和劳动人口数量增长, 加剧了水资源和水环境压力, 使得这些地区经济活度效应处于强驱动水平。

3.2 资本深化效应

经济活度效应中驱动水平的地区包括河北、山西、辽宁、浙江、安徽、江西、山东、河南、湖南、四川、云南、陕西、宁夏, 大多数位于中国的中部和中西部地区。随着经济发展, 这些地区的劳动人口数量增长率也较为平稳, 且 2014 年的地区人均灰水生态足迹较 2000 年有所降低, 增量效应特点未造成人均灰水生态足迹的增加, 故处于中等驱动水平; 云南地处于西部, 其人均灰水生态足迹有上升趋势, 增量效应的特点加剧了人均灰水生态足迹的上升, 得益于效应值较低, 故只处于中等驱动水平。

经济活度效应弱驱动水平的地区有天津、上海、江苏、湖北、重庆、甘肃、青海。这些省市的经济活度效应值呈减量效应特点。除甘肃和青海外,其余地区的人均灰水生态足迹均呈下降趋势。甘肃和青海的就业人口数量增长趋势低于人口增长比例,区域经济落后致使当地人才流失情况较为明显^[29],经济活度效应的减量特征对人均灰水生态足迹的上升没有起到抑制作用,故处于弱驱动;天津、上海、江苏、湖北、重庆五个省市是中国人口和经济规模较大的地区,且经济结构较为合理,地区劳动人口比重较为稳定,随着经济转向资本密集型,劳动人口有向其他地区转移的趋势,经济活度减量效应特点也促进了区域的人均灰水生态足迹的降低,但是由于效应绝对值很低,只能处于弱驱动水平。

3.2 资本深化效应

研究期内的资本深化效应均值为 $0.0154 \text{ hm}^2/\text{人}$,是最明显的增量效应。资本存量的大小决定了社会生产力水平乃至社会经济关系的变化^[30],资本深化是伴随工业化进程而出现的一个客观现象^[31]。随着资本存量不断增长,经济从劳动密集型向资本密集型转化,资本增速远高于就业人口,各省市都在经历着持续的资本深化过程。经济较发达地区资本深化效应值较低,表明中国经济已有向技术密集型转化的趋势。

资本深化效应强驱动的地区是西藏,研究期内的效应均值高达 $0.1671 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。西部大开发实施以来西藏的就业人口和资本投入增长迅速,由于经济基础较为薄弱且地区人口较少,需要大量的资本投入来带动经济的增长,研究期内西藏的社会固定资产投资年平均增速超过 20%,资本存量也在迅速增长,而就业人口数量增长比例则低于资本存量增长的速度,特别是 2011 年后地区的就业人口数区域稳定,资本深化效应的增量特点也越来越明显,故资本深化效应处于强驱动水平。

资本深化效应中驱动的地区包括内蒙古、吉林、江西、广西、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏。其中的大多数地区都处于中国的西部地区,西部大开发以来的资本投入增加趋势愈发明显,资本增长速度明显大于劳动力增长速度,各省市经历着持续的资本深化过程。内蒙古、江西、贵州、云南、甘肃、青海的人均灰水生态足迹呈增长趋势,资本深化效应值在所有省市中排名较靠前,由于经济基础较为薄弱,经济发展主要是靠资本投入来推动,且经济结构仍以污染较高的一、二产业为主,故地区的人均灰水生态足迹也有一定增加;而贵州的人口数量有所降低,更加加剧了这一现象,故处于中驱动水平;其余三个省市的经济结构中仍然是第二产业占主导地位,虽然人均灰水生态足迹的变化呈降低趋势,但是效应值偏高,对人均灰水生态足迹的仍起到促进增长作用,故处于中等驱动水平。

资本深化效应弱驱动的地区包括北京、天津、河北、山西、辽宁、黑龙江、上海、江苏、浙江、安徽、福建、山东、河南、湖北、湖南、广东、海南、重庆、四川、陕西、新疆。大多数处于中国的东部和中部地区,人均灰水生态足迹呈下降趋势。经济较为发达的东部地区资本深化的效应值较低,社会资本投入相对稳定,地区产业结构较为合理,地区经济有从资本密集型向技术密集型转化趋势,加之地区的人均灰水生态足迹较低,资本深化效应值也较小,故处于弱驱动水平;中部地区的效应虽然较东部地区高,产业结构也不如东部地区合理,资本投入的增长和就业人口增长相对稳定,且与强、中驱动地区相比效应值较低,地区人均灰水生态足迹呈下降趋势,故资本深化效应处于弱驱动水平。

3.3 资本效率效应

资本效率效应是三个呈减量效应特点的效应中效应值中绝对值最小的一个,只有少数省市呈现增量效应特点。目前中国正处于社会主义工业化时期,工业尤其是重工业相对其他行业要求有很高的资本投入量,而资本生产率偏低^[30],这也是社会生产总值的增加速度低于资本投入速度的主要原因。

资本效率效应强驱动的地区是西藏。研究期内西藏的资本效率效应值为 $-0.0615 \text{ hm}^2/\text{人}$,是所有省市中效应绝对值最大的省份。随着西部大开发的推进,西藏的资本投入增长迅速,生产总值也有较大的提升。但是地区基础设施的投资占据了资本投入的较大比例,虽然地区生产总值有所增加,但现阶段地区的产能还未被完全发挥,资本的利用效率不高致使资本效率减量特点明显。同时,西藏的经济基础较为薄弱,基础设施建设投资必不可少,但目前而言基础设施投资所产生的抑制作用明显占主导地位,减量效应也对当地人均灰水生态足迹降到较大的降低作用,使得资本效率效应处于强驱动水平。

资本效率效应中驱动水平的地区包括内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、广西、青海, 主要位于中国东北和西部地区, 资本效率效应呈减量效应特点, 效应值也呈逐年下降趋势, 并且产业多以工业和农业为主。内蒙古、青海的人均灰水生态足迹呈增加趋势, 西部大开发以来两地区的投资力度不断增加, 但地区正处于工业化阶段, 前期投入需求较高的工业占据了较大比例的投资, 受限于自身原因, 资本利用效率不高的同时还导致了人均灰水生态足迹上升, 减量效应虽然明显, 但只能处于中驱动水平; 其余 4 个省份人均灰水生态足迹呈波动下降趋势, 其中东三省是中国主要的工农业基地, 也是产能过剩主要集中领域, “东北振兴” 以来, 政策大多聚焦于项目投资上^[32], 投资未发挥应有的产能, 故资本效率效应处于中等驱动水平。

资本效率效应弱驱动水平的地区包括北京、天津、河北、山西、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、海南、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏、新疆。其中, 北京、天津、上海、广东、贵州 5 个省市的资本效率效应值为正, 区域的资本利用效率呈现良好状态, 除贵州人均灰水生态足迹变化不明显之外, 其余 4 个省市的人均灰水生态足迹均有较为明显的下降, 故对人均灰水足迹的变化影响较弱, 资本效率效应只处于弱驱动水平; 福建、江西、云南、甘肃的人均灰水生态足迹有一定的增加, 中西部的省份资本利用效率不高, 加之地区产业转型导致了人均灰水生态足迹上升; 其余省市的效应值与强驱动和中驱动的地区相比明显偏小, 部分省市的人均灰水生态足迹变化幅度较小, 资本效率效应对人均灰水生态足迹的影响较弱, 故处于弱驱动水平。

3.4 足迹强度效应

2000—2014 年中国 31 个省市的足迹强度效应呈明显的减量效应特点, 全国平均效应值为 $-0.0122 \text{ hm}^2/\text{人}$, 经济发展带动用水强度逐步降低和用水效率提高, 对人均灰水生态足迹降低有着积极的作用。

足迹强度效应强驱动的地区是西藏。2000 年西藏的水生态足迹强度高达 $4.89 \text{ hm}^2/10^4 \text{ 元}$, 到 2014 年下降到 $0.71 \text{ hm}^2/10^4 \text{ 元}$, 降幅达 85.38%, 并且在研究期内西藏的人均灰水生态足迹也呈波动下降的趋势, 从 2000 年的 $0.91 \text{ hm}^2/\text{人}$ 下降到 2014 年的 $0.81 \text{ hm}^2/\text{人}$, 水资源利用效率的提升对人均灰水生态足迹的减少起到了促进作用, 故西藏足迹强度效应处于强驱动水平。随着经济发展, 西藏的基础设施建设投资增多, 基础设施也不断完善, 但同时仍要看到西藏的水生态足迹强度仍然是所有省市中最高的。

足迹强度效应中驱动的地区包括内蒙古、吉林、广西、四川、贵州、青海、宁夏。青海、贵州、四川、内蒙古的水生态足迹强度降幅均排在 31 个省市的前列, 青海的水生态足迹强度降幅达 90.71%, 排在 31 个省市的第一位。与强驱动的西藏地区相比, 青海和内蒙古的人均灰水生态足迹在研究期内呈波动上升的趋势, 虽然足迹强度效应的减量值较大, 但是由于其他驱动因素的影响, 人均灰水生态足迹未能呈现持续减少趋势, 故只处于中等驱动水平; 吉林、广西、宁夏研究期内的人均灰水生态足迹有所下降, 四川和贵州的人均灰水生态足迹变化不明显, 虽然这些省市的足迹强度有了较大幅度的下降, 但受限于其他因素的影响, 人均灰水生态足迹的变化幅度较小, 故足迹强度效应处于中等驱动水平。

足迹强度效应弱驱动的地区包括北京、天津、河北、山西、辽宁、黑龙江、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、海南、重庆、云南、陕西、甘肃、新疆。北京、上海、福建、广东等经济发达省市的人均灰水生态足迹呈逐年减小趋势, 并且已经保持了较低的用水强度, 足迹强度降低的空间不大; 山西、陕西、江西等中部省市人均灰水生态足迹也低于全国平均水平, 这些省市已经意识到控制污染物排放的必要性, 尽管水生态足迹强度都有明显的下降, 但是人均灰水生态足迹降幅不明显, 故处于弱驱动水平; 云南、甘肃研究期内的人均灰水生态足迹呈增长趋势, 新疆的人均灰水生态足迹变化幅度较小, 随着经济不断发展和科技水平提升, 水生态足迹强度有了明显降低, 但是污染物排放控制设备以及农业生产方式都处于较为落后状态, 污染物排放控制措施还需要进一步完善, 足迹强度的减量效应与人均灰水生态足迹变化趋势不同, 故只处于弱驱动水平。

3.5 环境效率效应

环境效率效应呈减量效应的特点, 其全国贡献均值为 $-0.0028 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。除西部个别省市的环境效率效应

呈增量效应特点外,大多数省市都呈现出减量效应特点。水生态足迹和灰水生态足迹共同决定着环境效率效应的变化,在各省市区水生态足迹都在增长的前提下,灰水生态足迹的变化趋势尤为关键。

环境效率效应强驱动的地区是吉林、广西、青海、宁夏。其中,宁夏人均灰水生态足迹的环境效率效应绝对值在所有省市中排在第一位,吉林、广西也位居前列。研究期内 3 个省份的工业和生活灰水足迹均呈下降趋势,随着经济发展和科技水平进步,这些地区对水资源的利用效率在不断提升,灰水生态足迹占水生态足迹的比例也在逐年降低,点源污染的控制方面得到了极大地改善;青海的环境效率效应为正,且效应值较高,地区的人均灰水生态足迹也呈现上升趋势,工业灰水生态足迹的增长最为明显,农业和生活灰水生态足迹也有相应增加,研究期内青海的第二产业比重持续增大,第三产业比重却在降低,这也是地区实现工业化所必经的阶段,灰水生态足迹的上升也使得地区的环境效率效应处于强驱动效应。

环境效率效应中驱动水平的省市有北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、黑龙江、上海、安徽、山东、河南、海南、西藏、陕西、新疆。这些省份的环境效率效应呈减量特点,相对于强驱动效应的地区效应绝对值偏低,大多数省市的灰水生态足迹呈下降趋势,表明污染物的排放得到了有效的控制,灰水生态足迹占水生态足迹比例逐步降低;而内蒙古、西藏、新疆的灰水生态足迹呈增长趋势,虽然环境效率效应值为负,但减少的主要原因是水生态足迹的增长比例高于灰水生态足迹的增长比例,地区污染处理设备与产业发展速度不匹配导致灰水生态足迹增加,尤其是农业灰水生态足迹增长幅度较高,但是人口规模的扩大使得人均灰水生态足迹没有出现增长。故这些地区的环境效率效应处于中驱动水平。

环境效率效应弱驱动水平的省市江苏、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东、重庆、四川、贵州、云南、甘肃。甘肃处于中国西部,环境效率效应呈增量效应特点,人均灰水生态足迹呈增加趋势,但效应值较低,对人均灰水生态足迹的影响较弱,故将其划分为弱驱动水平;贵州和云南的环境效率效应呈减量效应特点,人均灰水生态足迹呈增加趋势,云南的灰水生态足迹呈逐年上升趋势,效应值为负主要是水生态足迹增长比例高于灰水生态足迹增长比例,贵州灰水生态足迹有小幅降低,人均灰水生态足迹增加是由于人口减少造成的,环境效率效应对人均灰水生态足迹影响较弱;其余省市人均灰水生态足迹呈降低趋势,且效应值为负,相对于前两种驱动的地区绝对值偏小,对人均灰水生态足迹影响较弱,故处于弱驱动水平。

4 结论与讨论

本文基于扩展的 Kaya 恒等式,并结合 LMDI 方法建立了影响人均灰水生态足迹变化的因素分解模型,对影响中国 31 个省市人均灰水生态足迹产出变化五个驱动效应进行了测度和分析,得到以下结论:①2000—2014 年中国人均灰水生态足迹呈先增后降的趋势,2000—2006 年呈先降后增,2007 年后呈明显下降趋势。所选研究区域中,大多数省市的人均灰水生态足迹呈下降趋势,只有西部地区部分省市人均灰水生态足迹呈增长趋势;②运用 LMDI 方法将影响人均灰水生态足迹变化的驱动效应分为经济活度效应、资本深化效应、资本效率效应、足迹强度效应、环境效率效应 5 个效应。其中资本深化效应和足迹强度效应是最主要的两个驱动效应,人均灰水生态足迹的降低应该着重于发展经济同时优化产业结构,提高用水效率。③应用 ISODATA 聚类对 5 个驱动效应进行聚类分析,分别分为效应强、中、弱驱动,各省市的各驱动效应强度有了较为明确的划分,有助于各省市根据自身特点开展节能减排工作。

本文通过对中国人均灰水生态足迹及其驱动要素的测度及分析,一方面以期更好地反映消纳降解所排放污染物所占用的区域产水面积;另一方面将 Kaya 恒等式和 LMDI 分解模型运用到灰水研究领域,试图通过因素分解的方式来找到影响灰水生态足迹变化的主要因素。在指标选择上,选取了劳动力和资本因素这两个重要的生产要素,重点分析生产活动对人均灰水生态足迹造成的影响,对已有只考虑总人口和 GDP 产出的研究起到了一定的补充和细化作用。本文也存在一些不足之处,例如在考虑资本因素时只考虑了总的资本存量,没有考虑到第一、二、三产业投入比重等,笔者会在之后研究中做进一步的细化研究。

参考文献 (References):

- [1] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [2] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. 水足迹评价手册. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 马坤, 臧传富, 译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [4] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [5] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1259-1276.
- [6] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The Green, Blue and Grey Water Footprint of Farm Animals and Animal Products. Value of Water Research Report Series No. 48. Delft, Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2010.
- [7] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [8] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401-415.
- [9] Vanham D, Bidoglio G. The water footprint of agricultural products in European river basins. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064007.
- [10] Erzin A E, Hoekstra A Y. Water footprint scenarios for 2050: a global analysis. *Environment International*, 2014, 64: 71-82.
- [11] 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. *资源科学*, 2016, 38(6): 1179-1191.
- [12] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 王玉宝. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 63-72.
- [13] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 刘建国. 华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征. *生态学报*, 2015, 35(20): 6647-6654.
- [14] 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. *生态学报*, 2016, 36(1): 86-97.
- [15] 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. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2047-2059.
- [16] 马丽. 基于 LMDI 的中国工业污染排放变化影响因素分析. *地理研究*, 2016, 35(10): 1857-1868.
- [17] 凌立文, 张大斌. 广东省工业“三废”EKC 曲线检验及影响因素研究——基于 Kaya 恒等式与 LMDI 分解法. *生态经济*, 2017, 33(6): 161-166.
- [18] 张义, 张合平, 李丰生, 郭琳. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析. *资源科学*, 2013, 35(8): 1601-1610.
- [19] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局. *生态学报*, 2017, 37(21), doi: 10.5846/stxb201608101640.
- [20] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 571-582.
- [21] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios. Presented at the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris, 1990.
- [22] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952~2006 年. *数量经济技术经济研究*, 2008, 25(10): 17-31.
- [23] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [24] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [25] 陈媛媛, 王永生, 易军, 张惠, 杨正礼. 黄河下游灌区河南段农业非点源污染现状及原因分析. *中国农学通报*, 2011, 27(17): 265-272.
- [26] 夏建国. 四川农业水资源评价及优化配置研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [27] 孙才志, 林学钰. 模糊划分有效性函数的构建与应用. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(2): 106-110.
- [28] 郑君君, 朱德胜, 关之焯. 劳动人口、老龄化对经济增长的影响——基于中国 9 个省市的实证研究. *中国软科学*, 2014, (4): 149-159.
- [29] 尹晶晶, 肖明智, 褚湜婧. 人口转变、劳动力与经济增长的研究述评. *现代管理科学*, 2015, (3): 39-41.
- [30] 蒋长流. 中国经济高速增长时期资本深化与资本生产率变动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [31] 吴海民. 资本深化带来了劳动生产率下降吗. *财经科学*, 2013, (9): 40-50.
- [32] 陈耀. 新一轮东北振兴战略要思考的几个关键问题. *经济纵横*, 2017, (1): 8-12.