

DOI: 10.5846/stxb201709291764

白天骄,孙才志.中国人均灰水足迹区域差异及因素分解.生态学报,2018,38(17): - .

Bai T J, Sun C Z.Regional inequality and factor decomposition of the per capita grey water footprint in China.Acta Ecologica Sinica,2018,38(17): - .

中国人均灰水足迹区域差异及因素分解

白天骄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:促进我国整体水资源利用率和水环境质量的提升,已成为当前亟待解决的问题。为探究生产要素和其它传统因素对人均水资源环境差异的影响,基于对中国 31 省区(不包括港、澳、台地区)2000—2014 年人均灰水足迹的测算,应用 Theil 指数和扩展的 Kaya 恒等式对其区域差异及驱动因子进行探究。结果表明:1) 近年全国人均灰水足迹差异缓幅波动,组间差异指数逐渐提升,组内差异为总体差异的主要来源,西部地区组内差异最大。2) 在单一要素方面,资本深化和技术效率为全国差异的主导因素,也分别为中、东部组内差异的主导因素;经济活度对各类差异的驱动效应最小,且西部除该效应外,都为驱动差异的重要因素。3) 相互作用成分中,除西部资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹相互作用的贡献值最高外,其它地区资本深化效应与单位资本存量灰水足迹相互作用的贡献较大。在技术效率效应与环境效率效应相互作用方面,技术效率的提升可以带动东、西部灰水足迹所占比重下降和中部灰水足迹比重提高。经济活度效应与就业人口人均灰水足迹相互作用的贡献最小。

关键词:人均灰水足迹;区域差异;Theil 指数;Kaya 恒等式;驱动因子

Regional inequality and factor decomposition of the per capita grey water footprint in China

BAI Tianjiao¹, 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: At present, there is an urgent need for solutions to enable an improvement in water resource use efficiency and water environment quality in China. Therefore, this study conducted detailed measurement of the per capita grey water footprint in 31 provinces of China (excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) from 2000 to 2014. This study explores the regional inequality and driving factors of the per capita grey water footprint to determine the influence of production and traditional factors on the inequality in per capita water resources and environment. The inequality analysis was performed using a factorial decomposition of the second Theil index of inequality. In particular, based on Kaya factors, we decomposed the per capita grey water footprint into the following five factors: environmental efficiency, technical efficiency, capital output, capital deepening, and economic activity. We found that the overall inequality of the per capita grey water footprint showed a slow fluctuation in recent years. The within-group inequality component was the main contributor to the overall inequality during the entire period, since its proportion of the total in 2014 was 59%. A slight decrease was noted in the within-group inequality in each region. In the three regions considered in this study, the within-group inequality was the largest in the western region, with the index reaching 0.0727 in 2014. The between-group inequality index of the total inequality increased annually, from 0.0067 in 2000 to 0.0449 in 2014, corresponding to an increase of 570%. In the aspect

基金项目:国家社会科学重点基金(16AJY009)

收稿日期:2017-09-29; 网络出版日期:2018-00-00

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

of single factors, capital deepening and technical efficiency are the dominant factors in the total and within-group inequality of the per capita grey water footprint of the central and eastern regions, respectively. Economic activity was the weakest driver of all inequality components. In addition to the economic activity, the other factors were vital for driving the within-group inequality of the per capita grey water footprint in the western region, among which technical efficiency was the strongest driver; the relative weight of this factor was 63.61%. The interaction component results showed that the contribution value of the interaction component between the capital output effect and the grey water footprint per unit GDP was the largest for the western region within-group inequality, and that between the capital deepening effect and the grey water footprint per unit of capital stock was greater in the other regions. In terms of the interaction component between the technical and environmental efficiency effects, the improvement in technical efficiency can lead to a decrease in the proportion of grey water footprint in the eastern and western regions and an increase in the proportion of grey water footprint in the central region. The contribution of the interaction component between economic activity and the per capita grey water footprint of the employment population was minimal.

Key Words: per capita grey water footprint; regional inequality; Theil index; Kaya identity; driving factors

中国人均水资源占有量仅为世界平均水平的 $1/4$ ^[1],随着经济社会快速发展,水资源短缺与水环境恶化形势加剧,全国 $2/3$ 的城市存在缺水问题^[2],2000—2014 年人均污水排放量增幅达 59.8%^[3],2014 年主要水库和湖泊中,分别约有 37.3%和 76.9%处于富营养状态^[4]。灰水足迹^[5-6]能够将实体水资源消耗与水污染程度联系起来,以“稀释水”的形式量化水体污染程度,全面刻画水污染对环境的影响,这一概念由 Hoekstra 等于 2008 年首次提出,被定义为以自然本底浓度和现有的水质标准为基准,将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水体积。我国各地人口数量及经济技术发展差距使区域异质性较高,为客观对比各地水污染负荷情况,需消除各地人口数差异对灰水足迹的影响,因此探究人均灰水足迹区域差异及其原因,对我国整体水资源利用效率和水环境质量的提升、有针对性的制定水环境改善措施具有重要意义。

当前有关差异性的研究中,Theil 指数作为研究各级差异对总差异贡献的重要方法,近年在水资源环境领域得到广泛应用^[7-12],如:Bhattacharya 等^[7]利用 Theil 指数分析了 188 个国家内部和各国之间的人均可用水量差异;Malakar 等通过 Theil 指数等方法量化评估了印度城市当前存在的供水不平等现象^[8],及 30 个国家的家庭用水差异^[9];马海良等^[10]应用 Theil 指数等方法对中国各省水资源利用差异进行了研究;孙才志等^[12]借助 Theil 指数探究了中国近 11 年水足迹强度发展空间格局的变化规律。但该方法只能反映区域差异的大小,不能反映导致差异因素的贡献值。相反,Kaya 恒等式能够反映驱动因素的贡献值,但无法反映区域差异。

为解析差异的主要驱动因素,现有大量将 Kaya 恒等式与 Theil 指数相结合在碳排放领域的研究^[13-19],如:Duro 等^[13]利用 Theil 指数和 Kaya 分解模型分析了全球人均碳排放量差异的原因,认为收入差距为主要驱动因子;Padilla 等^[15]同样应用如上方法对欧盟人均 CO_2 排放量差异的演变及其解释因素进行了研究;查冬兰^[16]借鉴 Theil 指数和 Kaya 因子,深入探究了能源消耗导致的地区间人均 CO_2 排放的差别及其成因;胡尧^[18]利用 Theil 指数量化长江经济带人均碳足迹差异,并借助 Kaya 分解模型考察了人均 GDP、能源强度等因素对差异的影响;王克等^[19]综合运用 Theil 指数 Kaya 分解方法,对中国各省碳排放差异变化及其影响因素进行了研究。综观上述文献可知,目前缺乏对水资源环境差异随时间变化驱动因素的探究。

鉴于此,本文将 Theil 指数和 Kaya 恒等式耦合起来,在测度 2000—2014 年中国 31 省区(不包括港、澳、台地区)人均灰水足迹空间差异的基础上,首次将生产要素中最关键的资本和劳动力要素引入人均灰水足迹驱动机制的研究,解析环境效率、技术效率、资本产出、资本深化和经济活度因素对各级差异的驱动效应。为我国在经济社会快速发展的同时,推动水资源利用效率的提高和水环境的改善,缩小地区差距探寻有效方式。

1 研究方法

1.1 灰水足迹测算

本文应用文献^[20-21]中的灰水足迹计算方法,对 2000—2014 年中国 31 个省区的灰水足迹进行测算。

1.1.1 农业灰水足迹

由于残留的化肥、农药及养殖污水的无序排放等是农业面源污染的主要来源,通过对各类主要污染物的测算后得出氮为造成农业灰水足迹的最大污染物,因此本文选取氮元素的值作为评价指标并采用面源污染公式进行计算。其公式如下:

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

式中, GWF_{agr} 为农业灰水足迹(m^3/a), α 为氮肥进入单位水体的比例,变量 Appl 表示氮肥施用量(kg/a), C_{max} 表示污染物水质标准浓度(kg/m^3); C_{nat} 表示容纳水体的自然本底浓度(kg/m^3)。

1.1.2 工业灰水足迹

较农业灰水足迹,工业源废水直接排入水体,故可直接测算工业废水中主要污染物排放量,据《中国环境统计年鉴》显示,COD 和氨氮(NH_4^+-N)是排放污水的主要污染物,因此采用 COD 和氨氮作为衡量指标计算工业灰水足迹。

$$\text{GWF}_{\text{ind}(i)} = \frac{L_{\text{ind}(i)}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} - W_{\text{ed1}} \quad (2)$$

$$\text{GWF}_{\text{ind}} = \max(\text{GWF}_{\text{ind}(\text{COD})}, \text{GWF}_{\text{ind}(\text{NH}_4^+-\text{N})}) \quad (3)$$

式中, $\text{GWF}_{\text{ind}(i)}$ 表示以第 i 类污染物为标准的工业灰水足迹(m^3/a), $L_{\text{ind}(i)}$ 表示第 i 类工业污染物的排放负荷(kg/a), GWF_{ind} 表示工业灰水足迹总量(m^3/a), W_{ed1} 表示工业废水排放量(m^3/a)。

1.1.3 生活灰水足迹

生活污水和工业污水同属点源污染,其关键污染物与工业污水相同,因此生活灰水足迹 $\text{GWF}_{\text{dom}(i)}$ (m^3/a) 的计算公式为:

$$\text{GWF}_{\text{dom}(i)} = \frac{L_{\text{dom}(i)}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} - W_{\text{ed2}} \quad (4)$$

$$\text{GWF}_{\text{dom}} = \max(\text{GWF}_{\text{dom}(\text{COD})}, \text{GWF}_{\text{dom}(\text{NH}_4^+-\text{N})}) \quad (5)$$

式中, $L_{\text{dom}(i)}$ 表示第 i 类生活污水污染物的排放负荷(kg/a), GWF_{dom} 表示生活灰水足迹总量(m^3/a), W_{ed2} 表示生活废水排放量(m^3/a)。

1.1.4 地区总灰水足迹

将农业灰水足迹、工业灰水足迹和生活灰水足迹求和,可得总灰水足迹。其计算公式如下:

$$\text{TGWF} = \text{GWF}_{\text{agr}} + \text{GWF}_{\text{ind}} + \text{GWF}_{\text{dom}} \quad (6)$$

式中,TGWF 为总灰水足迹(m^3/a)。

1.2 差异及因素分解

Theil 指数^[22]由 Theil Henri 于 1967 年提出,该方法考虑了人口加权影响,它是可微分的,对称的,尺度不变的,并且满足庇古-道尔顿标准^[23]。因此,为了解地区间人均灰水足迹差异的主要驱动来源,本文将 Theil 指数定义为:

$$T(g, f) = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \ln\left(\frac{g_i}{\bar{g}}\right) \quad (7)$$

式中, g_i 表示地区 i 的人均灰水足迹, $g_i = \text{GWF}_i / P_i$ (地区 i 的灰水足迹/地区 i 的人口数); f_i 代表地区 i 的人口在全国人口中所占比重; \bar{g} 为人均灰水足迹的全国平均值。该指数被称为人口加权 Theil 指数,其下限为零,

上限取决于样本大小。值接近于零表示较为均衡,随着该值增长,差异程度也逐渐提高。

以 Kaya 恒等式作为参考,进一步分析导致人均灰水足迹差异的影响因素,包括:经济活度效应 $a = P_2/P_1$ (就业人口数/总人口数),期望提升就业率为水环境治理提供良好的经济基础;资本深化效应 $d = CS/P_2$ (CS 为资本存量),期望增加资本积累带动水环境改善;资本产出效应 $o = GDP/CS$,期望更少的资本换取更大的经济效益;技术效率效应 $c = WF/GDP$ (WF 为水足迹),期望消耗更少的水资源换取更大的经济产值;环境效率效应 $e = GWF/WF$,期望更少的水资源向灰水足迹转化。

$$g_i = \frac{GWF_i}{P_{1i}} = \frac{P_{2i}}{P_{1i}} \times \frac{CS_i}{P_{2i}} \times \frac{GDP_i}{CS_i} \times \frac{WF_i}{GDP_i} \times \frac{GWF_i}{WF_i} = a_i \times d_i \times o_i \times c_i \times e_i \quad (8)$$

为测算各因素对差异的贡献,在每个地区定义了 5 个虚拟的人均灰水足迹矢量,各矢量中只允许一个因子的值偏离平均值:

$$g_i^a = a_i \times \bar{d} \times \bar{o} \times \bar{c} \times \bar{e} \quad (9)$$

$$g_i^d = \bar{a} \times d_i \times \bar{o} \times \bar{c} \times \bar{e} \quad (10)$$

$$g_i^o = \bar{a} \times \bar{d} \times o_i \times \bar{c} \times \bar{e} \quad (11)$$

$$g_i^c = \bar{a} \times \bar{d} \times \bar{o} \times c_i \times \bar{e} \quad (12)$$

$$g_i^e = \bar{a} \times \bar{d} \times \bar{o} \times \bar{c} \times e_i \quad (13)$$

式中, $\bar{a}, \bar{d}, \bar{o}, \bar{c}$ 和 \bar{e} 分别代表 a_i, d_i, o_i, c_i 和 e_i 的全国平均值。

应用 Theil 指数计算与各因素相关的差异程度:

$$I(g^r, f) = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \ln\left(\frac{g_i^r}{g_i}\right), r = a, d, o, c, e \quad (14)$$

如果 a, d, o, c, e 五个要素间相对独立,则 (15) 式是成立的。

$$T(g, f) = \sum_{r=1}^5 I(g^r, f) \quad (15)$$

但往往各因素间存在相互作用的关系,使 (15) 式并不成立。所以 Remuzgo 等^[15]推导出如下各因素的阶乘分解公式:

$$T(g, f) = \sum_{r=1}^5 I(g^r, f) + \sum_{r=1}^4 \ln\left(\frac{\bar{g}}{g^r}\right) \quad (16)$$

为解释相互作用项的含义,对其进行如下表述:

$$\ln\left(\frac{\bar{g}}{g^a}\right) = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{a,doce}}{\bar{g}^a}\right) = \text{inter}(a, doce) \quad (17)$$

$$\ln\left(\frac{\bar{g}}{g^d}\right) = \ln\left(1 + \frac{\bar{a} \cdot \sigma_{d,oce}}{\bar{g}^d}\right) = \text{inter}(d, oce) \quad (18)$$

$$\ln\left(\frac{\bar{g}}{g^o}\right) = \ln\left(1 + \frac{\bar{a} \cdot \bar{d} \cdot \sigma_{o,ce}}{\bar{g}^o}\right) = \text{inter}(o, ce) \quad (19)$$

$$\ln\left(\frac{\bar{g}}{g^c}\right) = \ln\left(1 + \frac{\bar{a} \cdot \bar{d} \cdot \bar{o} \cdot \sigma_{c,e}}{\bar{g}^c}\right) = \text{inter}(c, e) \quad (20)$$

式中, $\sigma_{a,doce}$ 代表变量 a 和 $d \cdot o \cdot c \cdot e$ 间的加权协方差,

$$\sigma_{a,doce} = \sum_{i=1}^n p_i (a_i - \bar{a}) (d_i o_i c_i e_i - adoc\bar{e}) \quad (21)$$

式中, $i = 1, \dots, n$, 权重 $p_i = P_{2i}/P_2$, $\sigma_{a,doce}$ 为经济活度效应与就业人口人均灰水足迹间的协方差, $\sigma_{d,oce}$ 表示资本深化效应与单位资本存量灰水足迹间的协方差, $\sigma_{o,ce}$ 为资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹间的协方差, $\sigma_{c,e}$ 为技术效率效应与环境效率效应间的协方差; $\text{inter}(a, doce)$ 表示因子 a 和 $d \cdot o \cdot c \cdot e$ 之间的相互作用, $\text{inter}(d,$

oce), $\text{inter}(o, ce)$ 和 $\text{inter}(c, e)$ 的含义与之同理。

Theil 指数也可以分解为组内差异 $T_w(g, f)$ 和组间差异 $T_b(g, f)$ 。组间和组内差异项对总差异的分解式如下:

$$T(g, f) = T_w(g, f) + T_b(g, f) = \sum_{h=1}^H fh \cdot Th(g, f) + \sum_{h=1}^H fh \cdot \ln\left(\frac{\bar{g}}{g_h}\right) \quad (22)$$

式中, H 表示区域数量, f_h 代表区域 h 在全国人口中所占份额, $T_h(g, f)$ 为区域 h 内的差异, \bar{g}_h 表示区域 H 的人均灰水足迹平均值。

2 数据来源

人口数和 GDP 取自《中国统计年鉴》, 就业人口数取自各省市统计年鉴。水足迹和测算来源与孙才志等^[24]一致。氮肥施用量来源于《新中国五十年农业统计资料》和《中国环境统计年鉴》, 农业部门的氮肥淋失率采用全国平均氮肥淋失率 7%^[25], 畜禽饲养数量取自于《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》, 饲养周期、日排泄量、单位排泄物中 COD 和总氮的含量、单位排泄物中污染物进入水体的流失率取自《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告》; 工业和生活污水和污染物排放量来源于《中国环境统计年鉴》。本文假设受纳水体的自然本底浓度 C_{nat} 为 0^[6], 污染物浓度达标排放标准采用《污染物综合排放标准》(GB8978—1996) 中的一级排放标准, 其中 COD 和氮的达标排放浓度分别为 60 mg/L 和 15 mg/L。

为深入分析各因素对人均灰水足迹影响程度的地区差异, 本文参照中国根据各地区经济、科技的发展水平和土地、水资源等自然条件划分的三大经济带对数据分组: 东部地区(北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南), 中部地区(山西、内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南), 西部地区(广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆)。由于香港、澳门特别行政区和台湾省相关数据的缺乏, 本文未对这些地区的数据进行计算。

3 实证研究

3.1 人均灰水足迹分析

由表 1 可知, 15a 间我国各省区人口平稳增长, 随着灰水足迹的年际波动变化, 全国人均灰水足迹 2002 年降至 379.60 m³/人后开始增长, 至 2006 年达到 15a 最大值 405.68 m³/人。中国加入世贸组织后, 各产业贸易额快速增长, 水环境压力也随之增大, 2006 年起, 《煤炭工业污染物排放标准》和“中央一号文件”的陆续颁布, 加强了对重点排污行业废水排放和农业面源污染的管治, 推动了人均灰水足迹自 2007 年起逐年下降, 截止 2014 年已降至 319.44 m³/人。东、中部地区人均灰水足迹的变动趋势与全国均值一致, 而西部在人口增长的同时, 大部分省区灰水足迹近年也有所增加, 导致西部人均灰水足迹于 2013—2014 年大幅提升。从均值来看, 西部人均灰水足迹最大, 中部大于东部。人均灰水足迹最大省区为西藏, 其次为青海, 两地年均值分别为 2602.86 m³/人和 1116.41 m³/人。西藏和青海作为经济欠发达地区, 各产业发展仍处在初级阶段, 对水环境的破坏较少, 灰水足迹 15a 均值较低, 分别为 74.42×10⁸ m³ 和 61.58×10⁸ m³, 但由于两省人口较少, 导致人均灰水足迹偏高。北京年均灰水足迹为各省最低值 19.18×10⁸ m³, 而人口数已在 2011 年超过 2000 万, 造成北京人均灰水足迹最小, 年均值仅为 122.31 m³/人。

3.2 全国人均灰水足迹差异因素分解

由表 2 和图 1 可知, 改革开放以来, 经济发展带动水资源消耗量快速增长, 而各地治污能力差距增大, 2001—2010 年全国人均灰水足迹差异逐年提升, 增幅达 154%, 随后缓幅波动, 2012 年差异指数为 15 年最高值 0.1166。在各时间段, 资本深化效应和技术效率效应是造成差异的主因。2000—2004 年资本深化效应所占份额最大, 随着西部大开发和振兴东北老工业基地等战略的逐步实施, 欠发达地区资本积累和就业率快速增长, 各地资本深化差距减小, 2004 年起该效应大幅下降, 截止 2014 年其指数和贡献率降幅分别达 57% 和

77%。2005年以来,技术效率效应指数呈先增长再下降的趋势,贡献率近年也出现大幅下降,但仍为人均灰水足迹差异的贡献主体,新技术作用下资源利用率的提高可以对水环境的改善产生直接影响,我国发达地区与欠发达地区的产业发展分别侧重技术密集型产业和资源、劳动力密集型产业,地区间技术差距逐渐增大,对水污染差异影响较大。资本产出效应和环境效率效应的贡献率较小,且前者指数增幅较小,贡献率略有下降,后者指数维持波动增长,15年增幅达205%,贡献率也随之增长29%,地区间用水效率差距增大带动人均灰水足迹差异提升,水资源向灰水足迹的转化量也正逐年增加。经济活度效应是总体差异的最小贡献因素,其变幅最小。各省人口数量小幅增长,就业人口数在大部分地区逐年提升,经济活度的提高对各地水环境治理的影响差距减小。

表1 中国31个省市(自治区)人均灰水足迹/(m³/人)

Table 1 The per capita grey water footprint in China

地区 Region	2000年	2002年	2004年	2006年	2008年	2010年	2012年	2014年	均值 Mean
东部地区 Eastern region	342.21	334.31	327.46	322.47	268.31	236.96	227.11	215.84	284.96
北京	242.69	209.69	170.87	122.22	92.79	59.36	45.75	43.47	122.31
天津	363.14	249.37	324.51	315.20	238.14	214.78	206.11	144.15	252.56
河北	427.03	412.55	433.56	452.52	338.41	302.13	296.69	256.56	363.48
辽宁	407.59	378.60	374.23	436.37	403.82	400.07	386.56	326.81	392.63
上海	286.63	297.83	204.98	194.52	157.45	79.37	46.36	62.05	169.77
江苏	272.46	294.50	301.95	308.29	275.59	253.98	235.86	225.03	274.49
浙江	276.60	255.56	240.64	227.78	198.69	161.95	151.02	159.89	206.65
福建	270.42	244.28	265.41	270.89	242.42	236.59	244.29	254.33	253.73
山东	438.41	416.17	397.61	367.28	291.39	264.76	257.93	236.18	333.77
广东	280.93	305.96	277.38	256.81	218.74	182.21	176.40	197.53	238.41
海南	458.57	409.11	473.55	476.47	405.55	396.80	396.55	382.62	419.62
中部地区 Central region	397.95	385.47	406.38	434.07	382.72	377.30	367.13	357.95	388.12
山西	290.39	284.00	312.06	317.31	251.19	225.17	212.53	186.56	261.29
内蒙古	475.65	462.99	606.52	713.60	704.06	688.43	667.34	672.69	623.70
吉林	603.79	542.44	621.74	638.73	544.52	534.79	521.39	470.50	559.17
黑龙江	442.88	434.15	453.89	460.68	448.64	455.64	453.24	434.95	447.37
安徽	337.99	319.38	292.31	287.89	251.20	256.51	255.99	269.52	281.51
江西	332.35	321.54	344.27	345.89	302.90	303.91	297.65	320.74	321.64
河南	434.84	417.51	423.36	466.27	381.88	375.44	359.31	348.56	398.49
湖北	376.97	368.84	368.06	394.01	370.21	377.11	369.45	372.18	375.62
湖南	375.96	388.69	427.51	476.07	416.54	393.66	381.44	349.75	402.85
西部地区 Western region	462.06	435.56	450.77	494.64	433.32	444.26	436.18	488.30	451.10
广西	656.28	538.54	566.72	637.02	512.74	531.83	509.75	403.48	535.95
重庆	282.34	271.52	285.84	315.65	276.83	287.58	284.97	299.58	288.21
四川	437.66	420.26	415.56	449.01	406.84	415.90	402.74	395.58	418.25
贵州	382.56	356.96	378.03	418.48	328.45	359.55	336.15	365.47	360.21
云南	436.22	417.74	426.58	436.26	407.19	416.77	419.96	480.87	428.02
西藏	2617.5	2606.71	2714.84	2801.05	2713.87	2540.26	2440.04	2359.03	2602.86
陕西	328.7	323.01	347.26	358.3	297.41	294.42	292.74	294.01	316.13
甘肃	306.16	324.52	340.73	386.84	369.63	383.48	375.6	432.36	368.35
青海	1037.19	1060.57	1000.31	1097.91	1181.98	1197.19	1112.92	1156.94	1116.41
宁夏	763.55	563.81	466.42	698.07	623.06	580.63	552.48	574.07	613.27
新疆	527.47	562.77	650.47	709.27	567.47	568.95	619.84	636.39	600.45
全国 National averages	393.09	379.6	388.26	405.68	350.19	336.26	326.5	319.44	362.04

以上未含中国香港、澳门和台湾地区数据;限于页面宽度,表中只列出部分年份计算结果

由表 2 可知,在相互作用因素方面,资本深化效应与单位资本存量灰水足迹相互作用对全国人均灰水足迹差异的贡献率降幅已达 77%。其负面特征表明,资本深化程度较低的地区,单位资本存量产生灰水足迹也较多。另一方面也表明,加强对经济落后地区资本投入,可减小全国人均灰水足迹差异。资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹相互作用对全国差异的贡献值显著提升,且由正值转变为负值。说明在其它条件不变的情况下,一个省区资本产出程度越低,其单位 GDP 灰水足迹与其它省区比越高。因此,提高欠发达地区资本效率有利于全国人均灰水足迹均衡性提升。在正向关联因素中,经济活度效应与就业人口人均灰水足迹相互作用产生的灰水足迹对全国差异的贡献率存在小幅提升。说明经济活度较高的地区,单位就业人口产生的灰水足迹较多,但其指数较低、影响小。技术效率效应与环境效率效应相互作用对全国差异现象的贡献率出现小幅回落,指数略有提高,说明单位 GDP 水足迹较高的地区,灰水足迹在水足迹中所占比重也较大。因此,扶持落后地区水资源利用和水环境技术发展,有利于提升我国整体人均灰水足迹均衡性。

表 2 全国人均灰水足迹差异的因素分解

Table 2 Factorial decomposition of total inequality of the per capita grey water footprint

年份 Year	$T(g,f)$	$I^a(g,f)$	$I^d(g,f)$	$I^o(g,f)$	$I^e(g,f)$	$I^f(g,f)$	Inter (a,doce)	Inter (d,oce)	Inter (o,ce)	Inter (c,e)
2000	0.0459 (100.00)	0.0066 (14.41)	0.1225 (266.88)	0.0108 (23.44)	0.1016 (221.27)	0.0169 (36.73)	0.0009 (2.02)	-0.2526 (-550.28)	0.0029 (6.30)	0.0364 (79.23)
2005	0.0627 (100.00)	0.0053 (8.41)	0.1185 (189.04)	0.0125 (20.02)	0.1315 (209.82)	0.0169 (26.99)	0.0075 (11.98)	-0.2556 (-407.91)	-0.0212 (-33.90)	0.0473 (75.55)
2010	0.1113 (100.00)	0.0090 (8.05)	0.0784 (70.41)	0.0170 (15.26)	0.1389 (124.73)	0.0324 (29.13)	0.0077 (6.95)	-0.1922 (-172.64)	-0.0547 (-49.10)	0.0748 (67.20)
2014	0.1091 (100.00)	0.0063 (5.79)	0.0567 (51.95)	0.0240 (21.96)	0.1086 (99.59)	0.0516 (47.33)	0.0061 (5.63)	-0.1389 (-127.34)	-0.0806 (-73.88)	0.0752 (68.97)

$T(g,f)$: Theil index (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^a(g,f)$: The degree of inequality Economic activity effect (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^d(g,f)$: The degree of inequality Capital deepening effect (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^o(g,f)$: The degree of inequality Capital output effect (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^e(g,f)$: The degree of inequality Technical efficiency effect (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^f(g,f)$: The degree of inequality Environmental efficiency effect (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $Inter(a,doce)$: Inter (Economic activity effect, Capital deepening effect Capital output effect Technical efficiency effect Environmental efficiency effect); $Inter(d,oce)$: Inter (Capital deepening effect, Capital output effect Technical efficiency effect Environmental efficiency effect); $Inter(o,ce)$: Inter (Capital output effect, Technical efficiency effect Environmental efficiency effect); $Inter(c,e)$: Inter (Technical efficiency effect, Environmental efficiency effect); 系数值下方括号内为百分比

3.3 组内和组间差异因素分析

由表 3 可知,组内和组间两个成分的指数在研究期间都有所增长。组内差异于近年出现小幅波动回落,但仍为总体差异的主要影响成分,说明各效应对各区域内部的影响存在很大差异,差异性长期增长后,随着各分区内部省区经济社会发展的分化逐渐减小,人均灰水足迹差异也逐渐缩小。组间差异指数由 2000 年的 0.0067 逐渐提升至 2014 年的 0.0449,增幅达 570%,且从图 2 可知,该成分在总体差异中的重要性也在逐年提高,组内差异的重要性则逐年下降,可见当前经济社会发展加剧了区域间人均灰水足迹差异。

表 3 全国人均灰水足迹差异的组间和组内差异分解

Table 3 Decomposition of total inequality of the per capita grey water footprint in the within- and between-group inequality components

年份 Year	$T(g,f)$	$T_w(g,f)$	$T_b(g,f)$	年份 Year	$T(g,f)$	$T_w(g,f)$	$T_b(g,f)$
2000	0.0459	0.0392	0.0067	2009	0.1004	0.0685	0.0319
2003	0.0490	0.0391	0.0099	2012	0.1166	0.0785	0.0381
2006	0.0751	0.0563	0.0187	2014	0.1091	0.0642	0.0449

以下内容如表 4、表 5 和表 6 所示。

在单一要素方面,首先,资本深化效应和技术效率效应是差异的主导因素。15 年间各省资本存量都存在大幅增长,劳动力变化相对较小,资本深化对组间和组内差异的影响程度分别减少了 74% 和 12%,其贡献率也有所下降,表明国家对中、西部扶持力度的增大可以对区域间水环境质量差距的减小发挥更积极的作用。在组内差异方面,该效应对东部人均灰水足迹差异的影响程度逐渐下降,在中部则逐渐提升,在西部变化较小。说明东部资本投入的增加已逐渐对水环境发挥效用;中部部分省区劳均资本存量虽大幅增长,但缺乏合理的规划应用,资源低效利用加剧。技术效率效应的组内差异程度增加了 60%,在组间差异方面呈现先增长再下降的趋势,其组内贡献率反复波动而组间贡献率逐渐下降。说明该因素对各分区内人均灰水足迹差异的影响程度更高,提升区域内技术效率较低省区水资源利用率有利于组内均衡性的提升。从各分区组内差异来看,东部地区指数有所提升,而贡献率出现大幅下降;中部指数低,且变幅较小;西部指数长期稳定,但由于西部 GDP 持续增长,而重庆、四川、青海等省水足迹于 2014 年出现大幅下降,使西部组内差异的技术效率效应大幅增加,其贡献率与 2012 年相比提高 24.02%,为各因素最大值。

其次,环境效率效应在两组成分中都维持波动增长;经济活度效应的指数和贡献率在组内和组间差异因素中都为最低值,且存在小幅波动,以上两者都与全国差异结果情况相似。在环境效率组内效应方面,东部差异指数小幅提升,但贡献率变化较小;西部指数逐渐提高;与东、西部地区相比,中部省际发展程度差距和灰水足迹比重差异较小,其贡献率大幅下降,指数也在增长后小幅回落。东、中部发展过程中水环境治理制度和技术的逐步完善,使经济活度效应在各分区人均灰水足迹差异的指数都较小,且呈现反复波动,贡献率在东、中部降幅略大。资本产出效应的组间差异指数较低,而组内差异有所提高。从各分区组内结果来看,该效应指数在东部变化小,贡献率已有所下降;西北省区资本产出水平显著下降,造成该效应对中、西部人均灰水足迹差异的驱动效应增强,对中部差异的贡献率 15 年增幅达 248%,对西部差异的贡献率也逐渐增长。

在相互作用的成分中,首先,资本深化效应与单位资本存量灰水足迹相互作用对组内和组间人均灰水足迹差异的影响程度都有所下降,资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹相互作用近年在两组差异中的作用都有

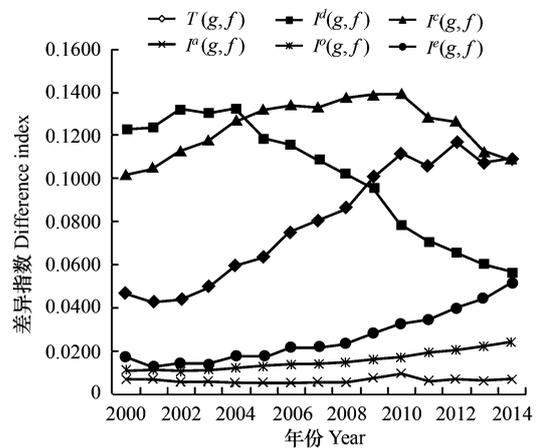


图 1 全国人均灰水足迹差异的因素变化趋势

Fig. 1 Factorial changing trends of total inequality of the per capita grey water footprint

$T(g, f)$: Theil index (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^e(g, f)$: The degree of inequality^{Economic activity effect} (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^l(g, f)$: The degree of inequality^{Capital deepening effect} (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^o(g, f)$: The degree of inequality^{Capital output effect} (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^t(g, f)$: The degree of inequality^{Technical efficiency effect} (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population); $I^e(g, f)$: The degree of inequality^{Environmental efficiency effect} (Per capita grey water footprint, Regional population proportion in the national population)

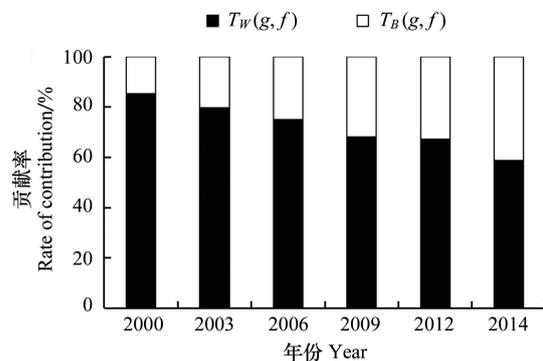


图 2 全国人均灰水足迹差异的组间和组内差异贡献率

Fig. 2 Contribution of total inequality of the per capita grey water footprint in the within- and between-group inequality components

表 4 人均灰水足迹组内差异的因素分解
Table 4 Factorial decomposition of the within-group inequality component of the per capita grey water footprint

年份 Year	$T_w(g, f)$	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^g$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^d$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^c$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^e$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^f$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^g$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^d$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^c$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^e$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot I_h^f$ (g, f)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot interh$ (a, doce)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot interh$ (d, oce)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot interh$ (o, ce)	$\sum_{h=1}^3 f_h \cdot interh$ (c, e)
2000	0.0392 (100.00)	0.0066 (16.83)	0.0399 (101.79)	0.0079 (20.22)	0.0276 (70.25)	0.0146 (37.17)	0.0014 (3.51)	-0.0813 (-207.25)	0.0066 (16.77)	0.0160 (40.71)					
2003	0.0391 (100.00)	0.0050 (12.75)	0.0396 (101.29)	0.0083 (21.30)	0.0315 (80.46)	0.0107 (27.31)	0.0054 (13.79)	-0.0808 (-206.44)	0.0020 (5.06)	0.0174 (44.49)					
2006	0.0563 (100.00)	0.0051 (9.01)	0.0388 (68.82)	0.0104 (18.54)	0.0362 (64.26)	0.0151 (26.89)	0.0095 (16.81)	-0.0776 (-137.81)	-0.0042 (-7.38)	0.0230 (40.86)					
2009	0.0685 (100.00)	0.0067 (9.84)	0.0384 (56.14)	0.0138 (20.12)	0.0359 (52.47)	0.0193 (28.13)	0.0107 (15.62)	-0.0630 (-92.02)	-0.0133 (-19.48)	0.0200 (29.18)					
2012	0.0785 (100.00)	0.0064 (8.20)	0.0352 (44.87)	0.0183 (23.30)	0.0389 (49.59)	0.0259 (33.03)	0.0074 (9.44)	-0.0502 (-64.04)	-0.0264 (-33.62)	0.0229 (29.23)					
2014	0.0642 (100.00)	0.0063 (9.83)	0.0350 (54.51)	0.0213 (33.27)	0.0442 (68.87)	0.0268 (41.73)	0.0048 (7.50)	-0.0514 (-80.10)	-0.0307 (-47.85)	0.0079 (12.26)					

系数值下方括号内为百分比

表 5 人均灰水足迹组间差异的因素分解
Table 5 Factorial decomposition of the between-group inequality component of the per capita grey water footprint

年份 Year	$T_B(g, f)$	$I^d(g, f)$	$I^c(g, f)$	$I^e(g, f)$	$I^f(g, f)$	$I^{d, oce}$	$I^{o, ce}$	$I^{c, e}$
2000	0.0067 (100.00)	0.0000 (0.18)	0.0826 (1237.72)	0.0028 (42.33)	0.0740 (1109.40)	-0.1743 (-2612.21)	-0.0016 (-23.28)	0.0211 (316.79)
2003	0.0099 (100.00)	0.0004 (3.84)	0.0907 (916.84)	0.0028 (28.77)	0.0858 (868.20)	-0.1907 (-1928.87)	-0.0104 (-105.19)	0.0273 (275.69)
2006	0.0187 (100.00)	0.0001 (0.57)	0.0763 (407.63)	0.0030 (15.85)	0.0975 (520.87)	-0.1866 (-996.58)	-0.0174 (-92.82)	0.0380 (203.07)
2009	0.0319 (100.00)	0.0005 (1.45)	0.0567 (177.76)	0.0021 (6.68)	0.1030 (322.73)	-0.1660 (-520.31)	-0.0262 (-82.26)	0.0486 (152.30)
2012	0.0381 (100.00)	0.0000 (0.00)	0.0300 (78.59)	0.0019 (5.02)	0.0874 (229.11)	-0.1173 (-307.50)	-0.0315 (-82.66)	0.0543 (142.27)
2014	0.0449 (100.00)	0.0000 (0.02)	0.0217 (48.29)	0.0026 (5.80)	0.0644 (143.49)	-0.0981 (-218.36)	-0.0395 (-87.91)	0.0685 (152.48)

注:系数值下方括号内为百分比

表 6 各分区人均灰水足迹组内差异因素分解

Table 6 Factorial decomposition of regional inequality of the per capita grey water footprint

年份 Year	$T(g,f)$	$I^e(g,f)$	$I^c(g,f)$	$I^o(g,f)$	$I^d(g,f)$	$I^a(g,f)$	Inter (<i>a,doce</i>)	Inter (<i>d,oce</i>)	Inter (<i>o,ce</i>)	Inter (<i>c,e</i>)
东部 Eastern region										
2000	0.0272 (100.00)	0.0063 (23.18)	0.0663 (243.82)	0.0079 (28.95)	0.0453 (166.72)	0.0169 (62.14)	-0.0034 (-12.53)	-0.1502 (-552.83)	0.0111 (40.83)	0.0271 (99.72)
2003	0.0284 (100.00)	0.0048 (16.94)	0.0611 (215.51)	0.0068 (24.01)	0.0534 (188.38)	0.0109 (38.38)	0.0013 (4.63)	-0.1464 (-516.18)	0.0056 (19.61)	0.0308 (108.72)
2006	0.0534 (100.00)	0.0038 (7.08)	0.0561 (105.12)	0.0075 (14.02)	0.0606 (113.51)	0.0161 (30.20)	0.0077 (14.43)	-0.1475 (-276.06)	0.0077 (14.32)	0.0413 (77.38)
2009	0.0722 (100.00)	0.0064 (8.84)	0.0409 (56.62)	0.0080 (11.03)	0.0597 (82.74)	0.0218 (30.19)	0.0117 (16.17)	-0.1095 (-151.66)	-0.0028 (-3.86)	0.0360 (49.94)
2012	0.0990 (100.00)	0.0062 (6.25)	0.0291 (29.38)	0.0072 (7.24)	0.0652 (65.86)	0.0384 (38.73)	0.0025 (2.54)	-0.0767 (-77.41)	-0.0138 (-13.90)	0.0409 (41.31)
2014	0.0694 (100.00)	0.0063 (9.06)	0.0257 (37.05)	0.0075 (10.80)	0.0663 (95.42)	0.0312 (44.96)	-0.0031 (-4.44)	-0.0683 (-98.39)	-0.0171 (-24.59)	0.0209 (30.12)
中部地区 Central region										
2000	0.0261 (100.00)	0.0081 (30.85)	0.0181 (69.16)	0.0044 (16.83)	0.0073 (27.78)	0.0112 (42.84)	0.0044 (16.88)	-0.0261 (-99.82)	0.0016 (6.13)	-0.0028 (-10.66)
2003	0.0300 (100.00)	0.0065 (21.58)	0.0174 (58.04)	0.0026 (8.81)	0.0082 (27.30)	0.0106 (35.24)	0.0077 (25.63)	-0.0195 (-65.01)	-0.0007 (-2.46)	-0.0027 (-9.14)
2006	0.0489 (100.00)	0.0077 (15.80)	0.0176 (35.98)	0.0052 (10.66)	0.0119 (24.40)	0.0148 (30.25)	0.0121 (24.69)	-0.0096 (-19.69)	-0.0062 (-12.74)	-0.0046 (-9.34)
2009	0.0609 (100.00)	0.0092 (15.18)	0.0342 (56.12)	0.0168 (27.56)	0.0128 (21.10)	0.0147 (24.19)	0.0146 (24.01)	-0.0141 (-23.09)	-0.0154 (-25.32)	-0.0120 (-19.75)
2012	0.0563 (100.00)	0.0079 (14.03)	0.0437 (77.53)	0.0272 (48.34)	0.0135 (23.97)	0.0128 (22.67)	0.0132 (23.35)	-0.0275 (-48.82)	-0.0235 (-41.63)	-0.0109 (-19.43)
2014	0.0512 (100.00)	0.0075 (14.57)	0.0481 (93.83)	0.0300 (58.52)	0.0153 (29.78)	0.0105 (20.46)	0.0104 (20.34)	-0.0376 (-73.45)	-0.0197 (-38.53)	-0.0131 (-25.51)
西部地区 Western region										
2000	0.0741 (100.00)	0.0051 (6.93)	0.0301 (40.64)	0.0127 (17.11)	0.0283 (38.13)	0.0157 (21.14)	0.0044 (5.93)	-0.0530 (-71.47)	0.0065 (8.77)	0.0243 (32.82)
2003	0.0669 (100.00)	0.0033 (4.99)	0.0366 (54.72)	0.0180 (26.86)	0.0292 (43.62)	0.0105 (15.75)	0.0085 (12.65)	-0.0631 (-94.21)	0.0002 (0.28)	0.0237 (35.34)
2006	0.0708 (100.00)	0.0036 (5.12)	0.0395 (55.78)	0.0220 (31.06)	0.0300 (42.30)	0.0141 (19.91)	0.0088 (12.47)	-0.0579 (-81.83)	-0.0199 (-28.17)	0.0307 (43.36)
2009	0.0722 (100.00)	0.0041 (5.70)	0.0400 (55.38)	0.0194 (26.80)	0.0270 (37.32)	0.0210 (29.04)	0.0041 (5.67)	-0.0504 (-69.83)	-0.0278 (-38.46)	0.0349 (48.38)
2012	0.0739 (100.00)	0.0049 (6.62)	0.0341 (46.06)	0.0247 (33.44)	0.0293 (39.60)	0.0229 (30.91)	0.0078 (10.60)	-0.0369 (-49.95)	-0.0509 (-68.88)	0.0382 (51.61)
2014	0.0727 (100.00)	0.0048 (6.57)	0.0328 (45.08)	0.0327 (45.04)	0.0463 (63.61)	0.0412 (56.63)	0.0104 (14.33)	-0.0417 (-57.36)	-0.0680 (-93.45)	0.0142 (19.55)

系数值下方括号内为百分比

所提升,以上两者结果都与其全国差异结果相似。此外,两者对组间差异的影响都大于对组内差异的影响。说明提高资本深化和产出水平较低的中、西部地区资本投入量和资本利用率,更有利于缓解分区灰水足迹不均衡状况,促进我国整体均衡性提升。从各分区组内结果来看,资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹相互作用项指数在各分区都逐渐由正值转为负值。其中,西部地区该成分贡献率近年大幅提升,超过资本深化效应

与单位资本存量灰水足迹相互作用项成为主导因素,东、中部则都以后者为主导,且中部指数呈先下降再上升的趋势。说明西部发展对资本投入的依赖性减弱,随着 GDP 的加速增长,产业发展对水环境的影响也在逐渐增强;东、中部侧重发展资本密集型产业,资本深化程度的提高对水环境的驱动作用更强。因此,提高西部资本效率和东、中部资本投入有利于各分区组内灰水足迹减少。

其次,经济活度效应与就业人口人均灰水足迹相互作用对组内和组间两类差异的影响都较小,对组内差异的影响程度略高,但近年有所下降。反映出就业率提高,单位就业人口产生的灰水足迹随之增长,易造成分区内部人均灰水足迹差距扩大,因此各省在提高就业率的同时,更应注重资源利用技术的提升。中、西部长期建立在劳动力和自然资源基础上的传统发展模式不利于水污染形势改善,因此从组内结果来看,该成分对中、西部差异作用的指数为正,贡献率都存在小幅提升;东部则出现正负变动,且指数较小,对地区差异影响小。技术效率效应与环境效率效应相互作用项的组间差异指数增幅达 225%,而贡献率由 316.79%降至 152.48%;在组内差异中呈先增长再下降的趋势;在东、西部的差异指数为正,贡献率有所下降;在中部则为负值,贡献率略有提升。这反映出缩小区域间水资源利用率差异更有益于提升我国整体人均灰水足迹均衡性;在东、西部地区单位 GDP 水足迹减少的同时,灰水足迹在水足迹中所占比重也会下降。

4 结论

(1) 全国人均灰水足迹差异逐年提升后缓幅波动,其中组内差异的贡献率高于组间差异。西部地区人均灰水足迹的组内差异最大,中部最小,近年各分区组内差异都存在小幅下降。

(2) 在单一要素方面,全国人均灰水足迹差异的主要因素为资本深化和技术效率,地区间技术差距逐渐增大,2005 年以来,后者为差异的最大驱动因素;资本产出效应和环境效率效应近年增幅明显;经济活度为各类差异的最小驱动因素。

在东部地区,技术效率效应为人均灰水足迹差异的主因,环境效率的作用略有提高,资本深化的作用已逐渐减弱;中部地区资本产出效应大幅提升,资本深化效应为差异的主导因素;西部地区除经济活度效应外,都为减小人均灰水足迹差异的重要因素,其中技术效率效应贡献最大。

(3) 相互作用成分结果表明,在全国范围,资本深化和资本产出水平较低的地区,单位资本存量和单位 GDP 产生灰水足迹更多;经济活度和技术效率较高的地区,单位就业人口产生的灰水足迹较多,灰水足迹在水足迹中所占比重也较大。资本深化效应与单位资本存量灰水足迹相互作用的贡献最大,经济活度效应与就业人口人均灰水足迹相互作用的贡献最小。

东、中部以资本深化效应与单位资本存量灰水足迹的相互作用为主要成分,西部近年则以资本产出效应与单位 GDP 灰水足迹相互作用为主要成分,提高东、中部资本投入和西部资本效率有利于人均灰水足迹减少。技术效率的提升可以带动东、西部地区灰水足迹所占比重下降和中部灰水足迹比重提高。中、西部省区在提高就业率的同时,更应注重资源利用技术的均衡提升。

参考文献 (References):

- [1] 陈家琦,王浩,杨小柳. 水资源学. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 张中绵. 对福州市建设现代化城市水利的探讨. 水利水电技术, 1999, 30(12): 8-9.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2001—2015. 北京: 中国统计出版社, 2001-2015.
- [4] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2015. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [5] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [6] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. 水足迹评价手册. 刘俊国, 曾昭, 韩乾斌, 译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] Bhattacharya J, Sinha A. Inequality in per capita water availability: a Theil's second measure approach. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(1): 136-144.
- [8] Malakar K, Mishra T, Patwardhan A. Inequality in water supply in India: an assessment using the Gini and Theil indices. Environment, Development and Sustainability, 2017, doi: 10.1007/s10668-017-9913-0.

- [9] Malakar K, Mishra T. Application of Gini, Theil and concentration indices for assessing water use inequality. *International Journal of Social Economics*, 2017, 44(10): 1335-1347.
- [10] 马海良, 王若梅, 訾永成. 中国省际水资源利用的公平性研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(12): 70-77.
- [11] 孙才志, 刘乐. 中国产业用水增长质量的时空分异分析. *资源科学*, 2011, 33(1): 56-63.
- [12] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [13] Duro J A, Padilla E. International inequalities in per capita CO₂ emissions: a decomposition methodology by Kaya factors. *Energy Economics*, 2006, 28(2): 170-187.
- [14] Remuzgo L, Sarabia J M. International inequality in CO₂ emissions: A new factorial decomposition based on Kaya factors. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 15-24.
- [15] Padilla E, Duro J A. Explanatory factors of CO₂ per capita emission inequality in the European Union. *Energy Policy*, 2013, 62(9): 1320-1328.
- [16] 查冬兰, 周德群. 地区能源效率与二氧化碳排放的差异性——基于 Kaya 因素分解. *系统工程*, 2007, 25(11): 65-71.
- [17] 路畅. 全国区域环境公平测度与影响因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [18] 胡尧. 基于碳足迹测定的长江经济带低碳发展水平省际差异研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2015.
- [19] 王克, 姚幸颖, 刘琦媛. 基于 Theil 指数 KAYA 分解的中国碳排放差异性分析. *环境保护科学*, 2014, (5): 90-96.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Theil H. *Economics and Information Theory*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967.
- [23] Cowell F A. Intermediate and other Inequality Measures in Distributional Analysis Discussion Paper 42. STICERD, London School of Economics, London WC2A 2AE, 1998.
- [24] 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.
- [25] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6.