

# “中四角”水生态足迹地区差异的动态演进 及其“空间-动力”因素研究

胡绵好<sup>1</sup> 袁菊红<sup>2</sup> 陈拉<sup>11</sup>

(1. 江西财经大学 生态文明研究院, 江西 南昌 330032;

2. 江西财经大学 艺术学院, 江西 南昌 330032)

**【摘要】:** 基于生态足迹理论, 利用 Kernel 核密度估计法和 Theil 指数分解法分别探讨了 2010—2019 年“中四角”水生态足迹动态演进规律及其区域差异变动的内在机制。结果表明: 研究期内, “中四角”和长株潭城市群水生态足迹区域分布出现轻微极化现象, 武汉城市群出现多极化现象, 环鄱阳湖城市群无极化现象, 江淮城市群出现极化现象; “中四角”水生态足迹 Theil 指数呈周期波动下降趋势。在“空间”意义上, 组内差异是影响“中四角”区域差异变动的决定因素; 在“动力”意义上, 产出资本比是导致“中四角”组内差异变动的关键因素; 在不同时段, 导致“中四角”水生态足迹组内差异变动的“空间”因素和“动力”因素具有一定差异性。

**【关键词】:** “中四角” 水生态足迹 泰尔指数 区域差异 空间分解

**【中图分类号】:** X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)06-174-09

水资源是城市群生态环境和社会经济可持续发展不可代替的资源要素、生态条件及安全保障。近年来, 城市群已成为我国新型城镇化推进的重要模式, 但随着社会经济的不断发展及城市群在城市化推进过程中出现的人口增长, 人口密度及城市化率的提高, 对水资源需求日益增加, 使水环境污染和水资源短缺等现象加剧, 最终导致水资源供需矛盾日趋尖锐。水资源亦已逐渐成为制约城市群区域社会—经济—生态可持续发展的重要因素。因此, 科学协调城市群区域经济发展与水资源利用之间的关系, 优化配置水资源, 对推进新型城镇化进程和实现水资源与经济社会的协调发展具有重要意义。

生态足迹(ecological footprint)方法是衡量区域可持续发展状态, 测度人类活动对自然生态系统影响的一种方法, 直观且操作性强, 但其并未完全考虑自然生态系统提供资源、消纳废弃物的能力, 不仅忽略了对地下水资源、水资源的测算, 也很少涉及有关污染的生态足迹折算<sup>[1]</sup>。近几十年来生态足迹方法得到了不断改进和完善, 将其引入到水资源账户中, 衍生的水生态足迹概念及其相关研究模型已成为研究区域水资源利用状况和评估区域可持续发展能力的重要方法<sup>[2]</sup>。水生态足迹(water ecological footprint)是用来计算一定人口和经济规模条件下维持人类生产生活的的水资源消费和消纳水污染所必需的生物生产性面积, 是将水资源相关消耗折算成水资源用地面积<sup>[3]</sup>, 因其概念比较具体, 计算方法简便易行, 现已被广泛应用。如利用水生态足迹模型在无锡市<sup>[4]</sup>、北京市<sup>[5]</sup>、太原市<sup>[3]</sup>、重庆市<sup>[6]</sup>、张家口市<sup>[7]</sup>、甘肃省<sup>[8]</sup>、中原城市群<sup>[9]</sup>等水资源可持续利用与经济发展

**作者简介:** 胡绵好, 博士, 副教授, 研究方向为水污染控制、环境与水资源经济学等。E-mail: yankeul@163.com

**基金项目:** 江西省社会科学基金项目“用水总量和强度双控下环鄱阳湖城市群工业废水排放绩效及减排潜力研究”(20GL14); 江西省高校人文社会科学项目“区域工业废水重心转移路径及减排潜力测度研究——以环鄱阳湖生态城市群为例”(JC20101); 江西省教育厅项目“水足迹视角下环鄱区水资源利用效率测度、空间溢出效应及收敛机制研究”(GJJ180265); 教育部人文社会科学规划项目“‘中四角’绿色水资源利用效率空间分异、趋同机制及标杆管理研究”(20YJAZH037)

方面做了大量研究。同时，结合环境压力模型(STIRPAT)或LMDI分解模型对贵阳市<sup>[10]</sup>、成都市<sup>[11]</sup>、河南省<sup>[12]</sup>、山东省<sup>[2]</sup>等水生态足迹动态变化及空间分布研究也有报道。但上述研究多集中对省、市层面的水资源可持续利用情况的时间序列研究，空间差异及驱动因素研究方法单一且简单。由于各地区在经济发展状况、水资源禀赋及人文生活等方面存在较大差异，这导致区域水资源总量及区域人口对水资源消费量具有异质性，从而使区域间的水生态足迹也存在一定的差异性。尽管对地区差异可从“空间”和“动力”两个因素来分析，但综合考虑两类因素的研究报道很少。基于此，本文以“中四角”为研究对象，利用泰尔(Theil)指数的可分解性，在“空间”层面上将“中四角”区域差异分解为组内差异和组间差异，在“动力”层面将其区域差异分解为产出资本比、资本劳动比和劳动参与率三大动力因素，从而分析2010—2019年“中四角”城市群水生态足迹区域差异的变动趋势，挖掘造成“中四角”城市群水生态足迹区域差异变动的“空间”因素和“动力”因素，以期城市群生态化建设中水资源合理利用及优化调控、水生态持续发展和水污染控制等方面提供科学依据。

## 1 研究区概况

“中四角”，即长江中游城市群，是以武汉、长沙、南昌、合肥为中心，形成的以武汉城市群(Wuhan urban agglomeration, WHUA)、长株潭城市群(Chang-Zhu-Tan urban agglomerations, CZTUA)、环鄱阳湖城市群(Poyang Lake urban agglomerations, PLUA)和江淮城市群(Jianghuai urban agglomerations, JHUA)为主体的特大城市群(图1)。2014年2月，长沙、武汉、南昌、合肥四省会城市共同签署发布《长沙宣言》，携手冲刺未来中国经济发展的重要增长极。尽管2015年4月国务院印发的《长江中游城市群发展规划》中并未将以合肥为中心的江淮城市带纳入长江中游城市群的发展规划中，但在城市群发展规划颁布之前，近年来武汉、长沙、合肥、南昌四中心城市合作深度和广度不断拓展，在创新资源大流动、产业发展大协作、基础设施大联通、社会事业大联合及生态环境大保护等推动方面取得了显著的成果。2019年12月四省会城市再次联合签署了《长江中游城市群省会城市高质量协同发展行动方案》，这些举措都极大地推动了长江经济带的高质量发展进程。因此本文对“中四角”地理范围界定包含了以合肥为中心的江淮城市群，研究总体范围涵盖湖北、湖南、江西和安徽4省共38个城市<sup>[13]</sup>，其行政区划图下载自全国地理信息资源目录服务系统1:100万公众版基础地理信息数据(2021)(<https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W>)，具体包括：湖北省的武汉、黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、潜江、天门；湖南省的长沙、株洲、湘潭、衡阳、常德、岳阳、益阳、娄底；江西省的南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、吉安、宜春、抚州、上饶；安徽省的合肥、芜湖、蚌埠、淮南、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、六安、池州、宣城。这些城市均是实施促进中部地区崛起战略、全方位深化改革开放和推进新型城镇化的关键区域，在我国区域发展格局中占有重要地位。



图1 “中四角”各城市群地理区位图

注：以武汉市、长沙市、南昌市和合肥市四个省会城市为中心的颜色填充分别代表武汉城市群范围、长株潭城市群范围、环鄱阳湖城市群范围和江淮城市群范围。

“中四角”面积约 44 万平方千米，为世界之最，是长三角的 3 倍，珠三角的 5 倍。总人口约 1.6 亿，占地面积和人口数量分别占我国的 4.58% 和 11.68%<sup>[14]</sup>。2019 年“中四角”四省会核心城市，武汉地区生产总值达 1.62 万亿元，长沙为 1.16 万亿元，合肥为 9409.4 亿元，南昌为 5596.18 亿元。“中四角”河流众多，湖泊密布，水资源非常丰富，但随着区域城市化水平的不断提高，经济的快速发展、地区生产总值的大幅提升，城市社会经济及水生态环境问题也日益突出，在过去全球城市群(城市圈或大都市)建设过程中，由于水资源不合理开发利用，均付出了生态破坏、水环境污染的惨重代价，因此，搞好水资源的保护与可持续利用，不仅是“中四角”城市群可持续建设发展的重要保障和支撑，也是在全面深化改革中对长江经济带沿岸城市开拓发展新境界、形成发展新格局的迫切要求。

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 水生态足迹模型

水生态足迹的测算是将研究区域消耗的水资源量转化为相应的生态生产水资源用地面积，其模型主要包括水量和水质两方面，即淡水资源账户和水污染环境账户，计算模型<sup>[9]</sup>为：

$$EF_w = EF_{fw} + EF_{wp} \quad (1)$$

式中：EF<sub>w</sub> 为区域总水生态足迹；EF<sub>fw</sub> 为区域总淡水资源生态足迹(即水量生态足迹)；EF<sub>wp</sub> 为区域总水污染生态足迹(即水质生态足迹)。

淡水资源生态足迹指满足一定条件下水资源消耗量所需要的土地面积，其以生产、生活和生态用水为基础而建立的一级水资源生态足迹模型，计算模型<sup>[15]</sup>为：

$$EF_{fw} = \gamma \cdot (T_w / p) \quad (2)$$

式中：EF<sub>fw</sub> 为总淡水资源生态足迹； $\gamma$  为全球水资源均衡因子，取 5.19<sup>[16]</sup>；T<sub>w</sub> 为区域淡水资源用水量；p 为水资源世界平均产生能力，取 3140m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。

水污染生态足迹指为吸纳一定人口产生的超出水体承载能力的污染物所需要的水资源土地面积，本文选取“中四角”主要污染物总量减排指标——化学需氧量(COD)和氨氮(NH)排放量作为研究内容，由于两种污染物在环境影响上具有明显重叠，故以其中的最大污染足迹作为最终水污染生态足迹<sup>[16]</sup>，计算模型<sup>[9]</sup>为：

$$\begin{aligned}
 EF_{COD} &= \frac{C_{COD}}{P_{COD}} \\
 EF_{NH} &= \frac{C_{NH}}{P_{NH}} \\
 EF_{wp} &= \max(EF_{COD}, EF_{NH})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式中： $EF_{COD}$ 为化学需氧量污染水生态足迹； $C_{COD}$ 为化学需氧排放总量(t)； $P_{COD}$ 为全球水域消纳化学需氧量的平均能力(t/hm<sup>2</sup>)； $EF_{NH}$ 为氨氮污染水生态足迹； $C_{NH}$ 为氨氮排放总量(t)； $P_{NH}$ 为全球水域消纳氨氮的平均能力(t/hm<sup>2</sup>)； $EF_{wp}$ 为区域总水污染生态足迹，即取 $EF_{COD}$ 和 $EF_{NH}$ 最大污染足迹。

水域消纳化学需氧量和氨氮的全球平均能力均依据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)规定的Ⅲ类水质标准中 $COD \leq 20\text{mg/L}$ 、 $NH \leq 1.0\text{mg/L}$ <sup>[17]</sup>和水资源全球平均生产能力转换而来，即1m<sup>3</sup>水资源量相当于0.000318hm<sup>2</sup>水资源用地，由此可通过水资源全球平均生产能力计算出水域消纳COD和NH的全球平均能力分别为0.062893t/hm<sup>2</sup>和0.003145t/hm<sup>2</sup><sup>[18]</sup>。

### 2.1.2 核密度估计法

核密度估计(kernel density estimation, KDE)法是对随机变量的概率密度进行估计，并在不需要进行任何参数模型假设情况下，用连续的密度曲线来描述随机变量的分布形态<sup>[19]</sup>，现已成为研究区域空间分布非均衡性的重要方法之一。设随机变量X的密度函数为f(x)，x点的概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x-X_i}{h}\right)
 \tag{4}$$

式中：N是观测值的个数；h为窗宽或平滑参数； $K\left(\frac{x-X_i}{h}\right)$ 为核函数； $X_i$ 为独立同分布特征的水生态足迹值；x为它的均值。

核函数是一种加权函数(或平滑转换函数)，常见类型有Gaussian核函数、Epanechnikov核函数、Biweight核函数、Rectangular核函数以及Triangular函数等<sup>[20]</sup>。本文选择常用的Gaussian核函数，窗宽设定为 $h=0.9SeN^{\frac{1}{5}}$ (Se是随机变量观测值的标准差)<sup>[21]</sup>，运用Matlab7.0软件估计“中四角”水生态足迹分布动态的Kernel密度曲线，其函数表达式为：

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)
 \tag{5}$$

一般而言核密度估计结果可反映变量分布的位置、形态和延展性等方面的信息，如从分布位置可得出区域水生态足迹的高低，分布形态用来分析水生态足迹的区域差异大小和极化特征，其中峰值高度和宽度反映差异大小，波峰数量反映极化程度，分布延展性用来反映水生态足迹最高的城市与其他城市区域差异的大小，拖尾长度越长则差异越大<sup>[22]</sup>。

### 2.1.3 泰尔指数法

泰尔(Theil)指数是基于信息量和熵的概念来考察区域差异性和不平等性,与基尼系数、变异系数等方法相比,其可通过将总体差异分解为地区内(组内)和地区间(组间)差异,进而得到组内差异和组间差异对总体差异贡献度的一种区域不平等测度方法。

假定  $Y_{ij}$  表示第  $i$  个城市群第  $j$  个城市的水生态足迹(EF<sub>w</sub>),  $W_{ij}$  表示第  $i$  个城市群第  $j$  个城市的水生态足迹,则  $Y = \sum_i \sum_j Y_{ij}$  和  $W = \sum_i \sum_j W_{ij}$

分别表示所有城市的水生态足迹总量和用水总量,  $Y_i = \sum_j Y_{ij}$  和  $W_i = \sum_j W_{ij}$  分别表示第  $i$  个城市群内各城市的水生态足迹总量和用水总量。据此,水生态足迹的区域差异可用如下 Theil 指数来描述:

$$T = \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_{ij}/Y}{W_{ij}/W} \right) \quad (6)$$

公式(6)测度了水生态足迹总量与用水总量的偏离程度,令  $T_p = \sum_j \left( \frac{Y_j}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_j/Y}{W_j/W} \right)$ , 表示第  $i$  个城市群内各城市之间的水生态足迹差异,则有:

$$\begin{aligned} T &= \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) T_p + \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_i/Y}{W_i/W} \right) \\ &= \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) T_p + T_{BR} = T_{WR} + T_{BR} \end{aligned} \quad (7)$$

特定城市群水生态足迹的地区差异在“空间”意义上可分解为组内差异  $T_{WR}$  和组间差异  $T_{BR}$ , 其公式如下:

$$\begin{aligned} T_{WR} &= \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) T_p = \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \left( \frac{Y_j}{Y_i} \right) \ln \left( \frac{Y_j/Y_i}{W_j/W_i} \right) \\ T_{BR} &= \sum_i \left( \frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_i/Y}{W_i/W} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $T_{WR}/T$  和  $T_{BR}/T$  分别表示组内差异和组间差异对总体城市群差异的贡献度。

上述分解方式只分析了城市群差异变动的“空间”特征,其差异变动的“动力”特征需将“空间”因素和“动力”因素放在同一框架,但城市群差异仍可刻画为:

$$T = \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_{ij}/Y}{W_{ij}/W} \right) \quad (9)$$

令  $K_{ij}$  表示第  $i$  个城市群的第  $j$  个城市的资本投入量,  $L_{ij}$  表示第  $i$  个城市群的第  $j$  个城市的劳动人口,  $K = \sum_i \sum_j K_{ij}$  和  $L = \sum_i \sum_j L_{ij}$  分别表示所有城市的资本投入量总额和劳动人口总和,由此泰尔指数  $T$  可被写为:

$$\begin{aligned}
T &= \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left[ \left( \frac{Y_{ij}/Y}{K_{ij}/K} \right) \times \left( \frac{K_{ij}/K}{L_{ij}/L} \right) \times \left( \frac{L_{ij}/L}{W_{ij}/W} \right) \right] \\
&= \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left( \frac{Y_{ij}/Y}{K_{ij}/K} \right) + \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left( \frac{K_{ij}/K}{L_{ij}/L} \right) + \\
&\quad \sum_i \sum_j \left( \frac{Y_{ij}}{Y} \right) \ln \left( \frac{L_{ij}/L}{W_{ij}/W} \right) \\
&= T_{CO} + T_{CL} + T_{LW} \tag{10}
\end{aligned}$$

基于公式(10)，城市群差异在动力上可分为  $T_{CO}$  表示产出资本比所导致的地区差异， $T_{CL}$  表示资本劳动比所导致的地区差异和  $T_{LW}$  表示劳动人口用水比所导致的地区差异三部分。其中， $T_{CO}/T$ 、 $T_{CL}/T$  和  $T_{LW}/T$  分别表示产出资本比、资本劳动比和劳动人口用水比对水生态足迹区域差异的贡献度。由此，水生态足迹区域差异在“空间”意义上将分解为组内差异和组间差异，在“动力”因素上分解为产出资本比、资本劳动比和劳动人口用水比。

## 2.2 数据来源与处理

本文研究数据主要来自 2011—2020 年湖北、湖南、江西、安徽四省的统计年鉴、水资源公报及上述“中四角”范围内武汉等 38 个市级行政区划的 2011—2020 年统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报和环境状况统计公报，部分数据通过各省份及各地级市的环保规划中得以补充。为保证数据的可比性，采用历年年末从业人员数作为劳动人口，以每年的全社会固定资产投资额作为资本投入量，采用 2000 年为基期的全社会固定资产投资指数将历年的全社会固定资产投资额转化为不变价格进行计算。

## 3 结果与分析

### 3.1 “中四角”水生态足迹的分布动态演进分析

对“中四角”38 个市及武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群与江淮城市群的水生态足迹进行 Kernel 核密度估计，绘制 2010、2015 和 2019 年“中四角”和各城市群的水生态足迹 Kernel 核密度曲线(图 2)，并从曲线的位置、延展性、形状和峰值等变化来分析“中四角”和 4 个城市群水生态足迹的动态演进趋势。

由图 2 可知：(1)2015 年相比于 2010 年，“中四角”水生态足迹核密度曲线的峰值中心向右平移，移动幅度较大，说明 2010—2015 年水生态足迹高值区域在逐年增加。2019 年与 2015 年相比，峰值中心整体向左移动，说明 2015—2019 年水生态足迹高值区在逐年减少。2010—2019 年核密度曲线双尾间变化区间由宽变窄且右尾区间变化明显缩小，说明水生态足迹高值区与低值区的区域差异在缩小。“中四角”水生态足迹核密度曲线整体形状以单峰形态演化，2015 年相比 2010 年，曲线形状右侧出现轻微的隆起，峰值上升，说明水生态足迹在“中四角”区域间出现了两极分化特征。2019 年与 2015 年相比，曲线波宽稍有变窄，峰值再次上升但回归单峰。整体来看，2010—2019 年“中四角”水生态足迹区域分布呈现“无极化—轻微极化—无极化”的交替演进特征，区域差异分布总体呈现“缩小—扩大—缩小”的态势。

(2)2015 年相比 2010 年，武汉城市群水生态足迹核密度曲线的峰值中心向右平移，移动幅度较大，说明 2010—2015 年水生态足迹高值地区在逐年增加。2019 年相比 2015 年，曲线峰值中心整体又向左移动，说明 2015—2019 年水生态足迹高值地在逐年减少。2010—2019 年核密度函数双尾间变化区间由窄变宽且右尾区间变化明显增加，说明该城市群水生态足迹高值地区与低值地区的差异在逐年扩大。核密度曲线形状由 2010 年的双峰分布逐步发展为 2015 年的单峰分布且 2015 年曲线峰值下降，右移幅度较大，宽度加大，说明水生态足迹高值地区增多但地区间无极化特征。2019 年与 2015 年相比，核密度曲线峰值上升，且向

左移幅，宽度变小，出现了多极分化特征，说明水生态足迹高值地区在减少，但地区间水生态足迹呈现“多极化”趋势。整体来看，2010—2019年武汉城市群水生态足迹区域分布呈现“极化—无极化—极化”的交替演进特征，地区差异分布总体呈现“扩大—缩小—扩大”的态势。

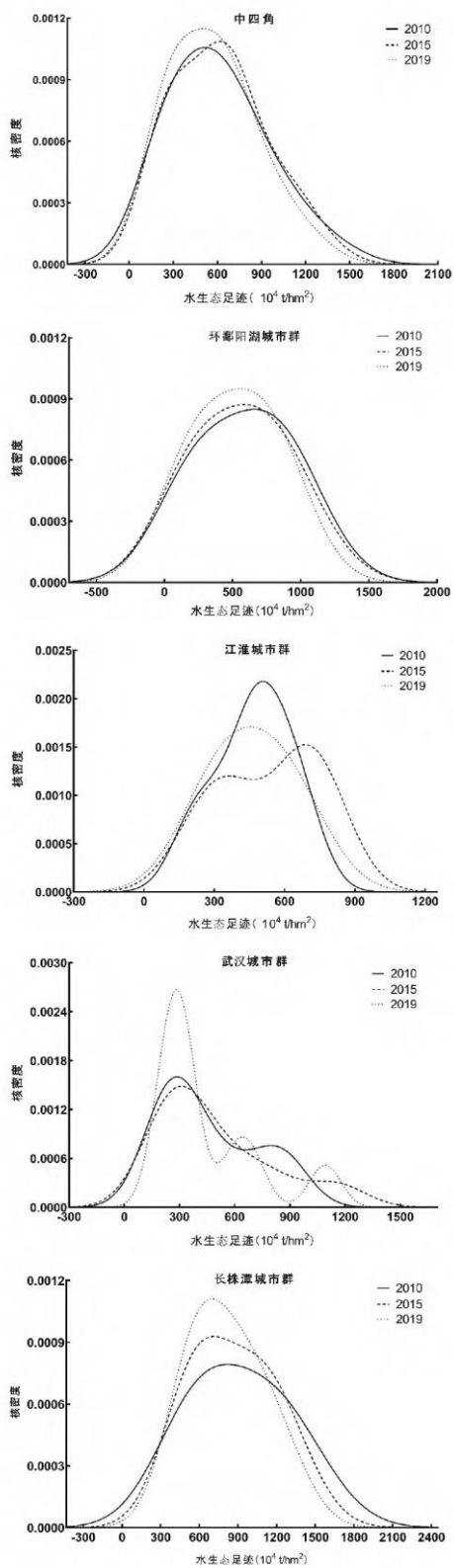


图 2 “中四角”及四大城市群水生态足迹动态演进的核密度曲线

(3) 2015 年与 2010 年相比, 长株潭城市群水生态足迹的核密度曲线的峰值中心向左平移, 移动幅度较大, 说明水生态足迹高值地在逐年减少。2019 年相比 2015 年, 曲线峰值中心又向右移动但幅度不大, 说明 2015—2019 年水生态足迹高值地区虽逐年有所增加, 但增加地区较少。2010—2019 年核密度函数双尾间变化区间由宽变窄且双尾间区间变化明显缩小, 说明水生态足迹高值地区与低值地区的差异在逐年缩小。核密度曲线的整体形状以单峰形态演化, 2015 年相比 2010 年, 曲线波宽稍变窄, 峰值明显上升, 且形状左侧出现轻微的隆起, 说明水生态足迹在地区间出现了两极分化特征, 2019 年与 2015 年相比, 波宽继续变窄, 峰值继续上升。整体来看, 2010—2019 年长株潭城市群水生态足迹地区分布呈现“无极化—轻微极化—无极化”的交替演进特征, 地区差异分布呈现“缩小—轻微扩大—缩小”的态势。

(4) 2015 相比 2010 年, 环鄱阳湖城市群水生态足迹核密度曲线的峰值中心向左平移, 移动幅度较大, 说明水生态足迹高值地区在逐年减少。2019 年相比 2015 年, 曲线峰值中心整体又向右移动但幅度较小, 说明 2015—2019 年水生态足迹高值地区虽逐年有所增加, 但增加地区较少。2010—2019 年核密度函数双尾间变化区间由宽变窄且双尾间区间变化明显缩小, 说明水生态足迹高值地区与低值地区的差异在逐年缩小。核密度曲线的整体形状以单峰形态演化, 2015 年相比 2010 年, 曲线波宽稍变窄, 峰值明显上升。2019 年与 2015 年相比, 波宽继续变窄, 峰值继续上升。整体来看, 2010—2019 年环鄱阳湖城市群水生态足迹区域分布呈现“无极化”演进特征, 地区差异分布呈现缩小的态势。

(5) 2015 年相比于 2010 年, 江淮城市群水生态足迹核密度曲线的峰值中心向右平移, 移动幅度较大, 说明 2010—2015 年水生态足迹高值地区在逐年增加。2019 年与 2015 年相比, 曲线峰值中心整体向左移动, 说明 2015—2019 年水生态足迹高值地区在逐年减少。2010—2019 年核密度函数双尾间变化区间由窄变宽且双尾间变化明显扩大, 说明水生态足迹高值地区与低值地区的差异在加大。核密度曲线的整体形状以单峰形态演化, 2015 年相比 2010 年, 曲线形状右侧出现隆起, 峰值下降, 说明水生态足迹在地区间出现了两极分化特征, 2019 年与 2015 年相比, 曲线波宽稍有变窄, 峰值上升但回归单峰。整体来看, 2010—2019 年江淮城市群水生态足迹区域分布呈现“无极化—极化—无极化”的交替演进特征, 区域差异分布呈现“缩小—扩大”的态势。

由图 2 还可知, 不同城市群水生态足迹的内部时序演变趋势也表现一定的差异性。武汉城市群和江淮城市群的水生态足迹整体呈现增加态势, 长株潭城市群的水生态足迹值高于武汉城市群、环鄱阳湖城市群和江淮城市群, 但下降速度较武汉城市群, 环鄱阳湖城市群和江淮城市群要快。

### 3.2 “中四角”水生态足迹区域差异的“空间—动力”因素分解

#### 3.2.1 水生态足迹区域差异的“空间”因素分解

通过 Theil 指数计算公式测度出“中四角”各城市水生态足迹的总体差异、组内差异、组间差异及各自的贡献率(图 3)。Theil 指数整体呈下降趋势, 由 2010 年的 0.2369 下降至 2019 年的 0.1883, 降幅为 20.51%, 但下降趋势呈周期波动, 2010—2015 年逐年下降, 至 0.1689, 2016—2017 年显著上升, 至 2017 年环比上升 16.22%, 2018 年下降, 2019 年又上升但小于 2016 年(0.1954)(图 3A)。这与刘珂伶和杨柳<sup>[23]</sup>对北京市水资源生态足迹的研究结果相似, 表明近年来“中四角”各城市间的水生态足迹差异在不断缩小。

在“空间”意义上, “中四角”水生态足迹区域差异不断缩小源于武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群和江淮城市群的共同作用, 而总体 Theil 指数可被分解为: 四大城市群组内( $T_{in}$ )差异和四大城市群组间( $T_{out}$ )两部分, 图 3A 给出了“中四角”38 个城市组内差距和组间差异 Theil 指数的变动趋势。2010—2015 年组内和组间差异均呈下降趋势, 组内从 0.1244 降至 0.0895, 组间从 0.1125 降至 0.0795。2015—2019 年组内差异呈现出缓慢上升趋势, 从 0.0895 升至 0.1063。组间差异从 2015—2017 年呈显著上升趋势, 从 0.0795 升至 0.0969, 上升幅度大于组内差异上升幅度, 而 2017—2019 年又呈下降趋势, 从 0.0969

降至 0.0820，下降幅度小于组内差异的上升幅度。这说明在“中四角”水生态足迹区域差异的波动下降过程中，组合差异和组间差异在不同时段的影响是不同的，2010—2015 年总体 Theil 指数下降是组内差异和组间差异同时下降的结果，2015—2017 年总体 Theil 指数的上升主要是组间差异扩大所致，2017—2019 年总体 Theil 指数的波动主要由组内差异波动所致。

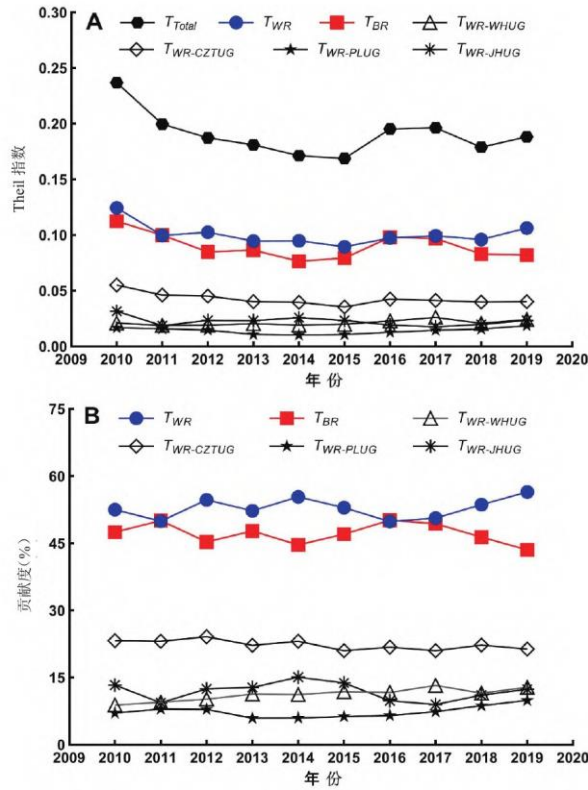


图 3 2010—2019 年“中四角”38 个城市的水生态足迹 Theil 指数及其“空间”因素分解

注：Theil 指数分解为绝对数； $T_{Total}$  为总体 T， $T_{WR}$  为组内差异， $T_{BR}$  为组间差异， $T_{WR-WHUG}$  为武汉城市群组内差异， $T_{WR-CZTUG}$  为长株潭城市群组内差异， $T_{WR-PLUG}$  为环鄱阳湖城市群组内差异， $T_{WR-JHUG}$  为江淮城市群组内差异。

为了更清晰地表明空间因素对“中四角”水生态足迹区域差异的影响，还可通过组内差异和组间差异对总体 Theil 指数的贡献度来分析。2010—2019 年组内差异的贡献度从 52.52% 升至 56.47%，而组间差异的贡献度则从 47.48% 降至 43.53%，研究期间组内差异和组间差异的平均贡献度分别为 52.83% 和 47.17%，组内差异是影响“中四角”区域差异的决定因素。2010—2015 年，组内差异的贡献度虽从 52.52% 升至 52.96%，但平均贡献度还为 52.96%，而组间差异的平均贡献度为 47.04%。2015—2017 年组内差异的平均贡献度降为 51.15%，而组间差距的平均贡献度则升至 48.85%。2017—2019 年组内差异和组间差异的平均贡献度分别为 53.58% 和 46.42% (图 3B)。这说明“十二五”期间“中四角”水生态足迹区域差异收敛主要由组内差异缩小所致，而“十三五”期间区域差异虽呈现“扩大—收敛—扩大”的趋势，但仍由组内差异所致。刘珂伶和杨柳<sup>[23]</sup>在利用 Theil 指数测算中国水足迹强度空间差异也发现，中国四大地区(东北、东部、西部和中部)的地区差异基本是由区域内部差异决定。

综上所述，组内差异是“中四角”水生态足迹区域差异变化的重要因素，但组内差异是“中四角”四大城市群内部差异加权平均的结果，因此对组内差异还可更深度地进行空间因素分解，如武汉城市群内 Theil 指数平均值为 0.0212，平均贡献度为 11.22%，长株潭城市群内 Theil 指数平均值为 0.0426，平均贡献度为 22.33%，环鄱阳湖城市群内 Theil 指数平均值为 0.0141，平均贡献度为 7.37%，江淮城市群内 Theil 指数平均值为 0.0226，平均贡献度为 11.92% (图 3)。这说明长株潭城市群

组内差异在“中四角”组内差异中起决定作用。研究期间，武汉城市群组内差异 Theil 指数以 2012 年，2014 年和 2018 年为拐点，呈现“缩小—扩大—缩小—扩大”的“W”形上升趋势，2019 年升至 0.0241，大于 2010 年的 0.0210，长株潭城市群组内差异 Theil 指数以 2015 和 2018 年为拐点，呈现“缩小—扩大—缩小”的倒“N”形下降趋势，2019 年降至 0.0402，其趋势与“中四角”总体 Theil 指数基本一致。环鄱阳湖城市群组内差异 Theil 指数以 2013 年、2014 年和 2015 年为拐点，呈现“缩小—平稳—扩大”的“U”形上升趋势，2019 年升至 0.0186，大于 2010 年的 0.0168。江淮城市群组内差异 Theil 指数以 2011 年和 2017 年为拐点，呈现“缩小—扩大—缩小—扩大”的“W”形下降趋势，2019 年降至 0.0234。这说明 2015 年前长株潭城市群组内差异缩小对“中四角”组内差异的收敛起主导作用，而 2016 年后“中四角”组内差异扩大则由武汉城市群、环鄱阳湖城市群和江淮城市群组内差异的扩大共同作用。

### 3.2.2 水生态足迹区域差异的“动力”因素分解

Theil 指数“空间”因素分解表明组内差异是“中四角”水生态足迹区域差异变动的主导因素，但又是何种因素导致其组内差异的变动?在“动力”意义上通过可将 Theil 指数分解为产出资本比( $T_{co}$ )、资本劳动比( $T_{cl}$ )和劳动力用水比( $T_{lw}$ )三种因素，从而可分析何种因素对“中四角”水生态足迹总体组内差异的影响程度。其中， $T_{co}$  是根据资源要素的市场化配置程度来反映区域资本利用效率的差异， $T_{cl}$  是反映区域人均劳动力资本存量差异， $T_{lw}$  是衡量单位用水量的劳动人口数量的差异，可反映区域产业结构差异<sup>[24]</sup>。由表 1 可知，研究期间总体(T)、 $T_{co}$ 、 $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  整体上呈下降趋势，其中  $T_{co}$  和总体 Theil 指数的变动是一致的，而  $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  与总体 Theil 指数的变动态势存在差异。 $T_{co}$  在 2013 年前为下降趋势，2014 年又迅速上升之后又下降至 2016 年，随后呈上升趋势，这说明 2014 年和 2016 年后“中四角”组内的资本利用效率的差异在上升。 $T_{cl}$  在 2011 年下降，2012 年上升随后下降至 2016 年，2017 年又上升随后下降，这说明 2011 年、2012 年至 2016 以及 2017 年后“中四角”组内的人均动力资本存量差异在减小。 $T_{lw}$  在 2012 年前为下降趋势，随后上升至 2014 年，2014 年后又随之下降至 2018 年，但在 2019 年却迅速上升，这说明 2018 年后“中四角”组内产业结构差异明显增大。

根据  $T_{co}$ 、 $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  对总体地区差异的贡献度可知，在 2010—2013 年、2013—2014 年、2014—2016 年和 2016—2019 年四个时段中， $T_{co}/T$  的平均值分别为 48.81%、52.43%、54.84%和 55.48%，在 2010—2011 年、2011—2012、2012—2016 年、2016—2017 年和 2017—2019 年五个时段中， $T_{cl}/T$  的平均值分别为 31.54%、33.77%、33.11%、33.70%和 33.13%。在 2010—2012 年、2012—2014 年、2014—2018 年和 2018—2019 年四个时段中， $T_{lw}/T$  的平均值分别为 18.98%、13.06%、11.80%和 14.38%(表 1)。这说明 2010—2019 年期间  $T_{co}$  对总体地区差异 Theil 指数的贡献度均大于  $T_{cl}$  和  $T_{lw}$ ， $T_{co}$  是导致“中四角”组内差异变动的决定因素。

表 1 2010—2019 年“中四角”38 个城市的水生态足迹 Theil 指数及其“动力”因素分解

年份	总体(T)	因素分解			贡献度/%		
		$T_{co}$	$T_{cl}$	$T_{lw}$	$T_{co}$	$T_{cl}$	$T_{lw}$
2010	0.6081	0.2258	0.1957	0.1866	37.14	32.19	30.68
2011	0.3750	0.1981	0.1159	0.0611	52.81	30.90	16.29
2012	0.3582	0.1912	0.1312	0.0357	53.39	36.64	9.96
2013	0.3587	0.1861	0.1238	0.0488	51.89	34.51	13.61
2014	0.3718	0.1969	0.1168	0.0581	52.97	31.42	15.62
2015	0.2885	0.1533	0.0948	0.0404	53.13	32.86	14.00

2016	0.2598	0.1517	0.0783	0.0298	58.40	30.13	11.47
2017	0.3287	0.1787	0.1225	0.0275	54.39	37.26	8.35
2018	0.3318	0.1889	0.1112	0.0317	56.92	33.51	9.57
2019	0.3841	0.2005	0.1099	0.0737	52.20	28.62	19.19

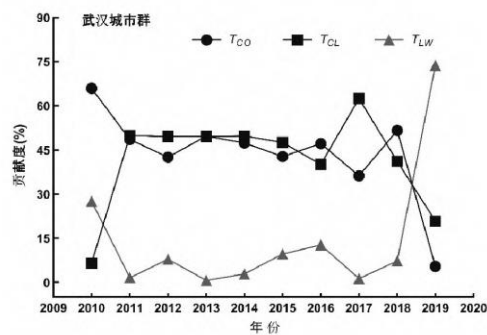
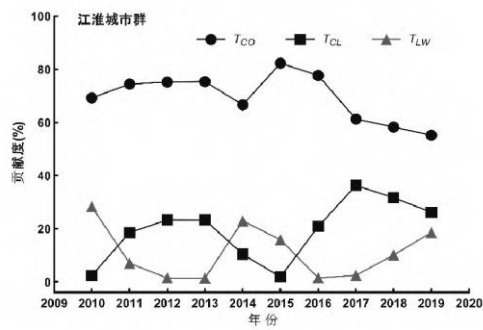
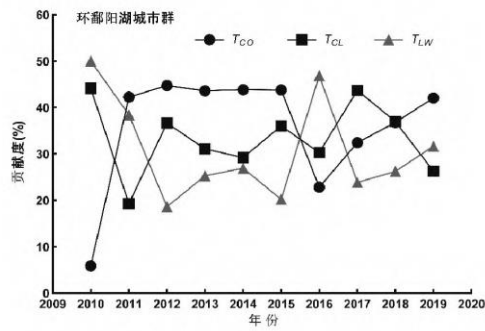
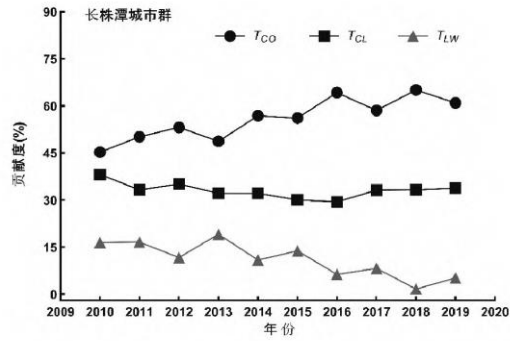


图 4 2010—2019 年“中四角”四大城市群内部水生态足迹 Theil 指数的“动力”因素分解贡献度

除了对总体区域组内差异可从  $T_{co}$ 、 $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  三部分进行因素分解之外，对四大城市群组内差异也可以基于这三个部分进行因素分解，各城市群组内差异的贡献度如图 4 所示。研究期间，四大城市群组内差异均主要源自  $T_{co}$  的贡献，武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群和江淮城市群的  $T_{co}$  对 Theil 指数的平均贡献度分别为 43.74%、55.92%、35.82% 和 69.59%。其中，长株潭城市群和江淮城市群  $T_{co}$  对 Theil 指数的贡献度一直大于  $T_{cl}$  和  $T_{lw}$ ，而武汉城市群和环鄱阳湖城市群  $T_{co}$ 、 $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  三部分对 Theil 指数的贡献度波动较大(图 4)。2010—2019 年， $T_{co}$  稳步上升且始终是长株潭城市群组内差异变动的主导因素，而  $T_{cl}$  和  $T_{lw}$  呈下降趋势。这说明研究期间长株潭城市群组内资本利用效率差异在增加，而人均劳动力资本存量和区内产业结构差异整体上在缩小。由于 2015 年前“中四角”总体区域差异的缩小主要源于组内差距(尤其是长株潭城市群组内差异)的下降，因此，2015 年前“中四角”地区差异下降主要是由于长株潭城市群组内产出资本比的增加所致。

2010 年、2016 年和 2018 年， $T_{co}$  是导致武汉城市群组内差异变动的主导因素，2011—2015 年和 2017 年， $T_{cl}$  取代了  $T_{co}$  成为其组内差异演变的决定因素，2019 年， $T_{lw}$  却取代了  $T_{cl}$  成为其组内差异演变的决定因素且  $T_{co}$  和  $T_{cl}$  均明显下降。这说明武汉城市群组内差异变动的主导因素在不同时段存在产出资本比—资本劳动比—劳动力用水比的转变过程，且区内资本利用效率和人均劳动力资本存量的差异在 2018 年后急剧缩小，但区内产业结构差异却明显增大。2010 年和 2016 年， $T_{lw}$  是导致环鄱阳湖城市群组内差异变动的主导因素，2011—2015 年和 2019 年， $T_{co}$  取代了  $T_{lw}$  成为其组内差异演变的决定因素，2017 年和 2018 年， $T_{cl}$  却取代了  $T_{co}$  成为其组内差异演变的决定因素且  $T_{co}$  和  $T_{lw}$  均明显上升。这说明环鄱阳湖城市群组内差异变动的主导因素在不同时段存在劳动力用水比—产出资本比—资本劳动比—产出资本比的转变过程，且区内资本利用效率和产业结构差异在 2018 年后明显增大，而人均劳动力资本存量差异却急剧缩小。2010—2019 年， $T_{co}$  虽从稳步上升到 2014 年急剧下降，再到 2015 年急剧上升至随后急剧下降，但也始终是江淮城市群组内差异变动的主导因素，而  $T_{cl}$  呈“上升—下降—上升—下降”趋势， $T_{lw}$  呈“下降—上升—下降—上升”趋势。这说明研究期间江淮城市群组内资本利用效率、人均劳动力资本存量和区内产业结构差异在 2017 年前变化较大，从 2015 年开始组内资本利用效率差异在急剧缩小，从 2017 年开始组内人均劳动力资本存量差异在急剧缩小，但区内产业结构差异却在明显扩大。由于 2016 年后“中四角”总体区域差异的扩大主要由组内差异(尤其武汉城市群、环鄱阳湖城市群和江淮城市群组内差异)增加所致，因此，2016 后武汉城市群和环鄱阳湖城市群在产出资本比和劳动力用水比两方面的差异拉大及江淮城市群在产出资本比、资本劳动比与劳动力用水比方面的差异缩减是此阶段总体区域差异扩大的主要因素。

## 4 结论

(1) 2010—2019 年“中四角”水生态足迹区域分布呈现“无极化—轻微极化—无极化”的交替演进特征，武汉城市群呈现“极化—无极化—极化”的交替演进特征，长株潭城市群呈现“无极化—轻微极化—无极化”的交替演进特征，环鄱阳湖城市群呈现“无极化”演进特征，江淮城市群呈现“无极化—极化—无极化”的交替演进特征。

(2) 2010—2019 年“中四角”水生态足迹 Theil 指数整体呈下降趋势，表明“中四角”水生态足迹的区域差异在缩小。在“空间”意义上，组内差异在“中四角”区域差异变动中起主导作用，在“动力”意义上，产出资本比是导致“中四角”水生态足迹组内差异变动的关键因素。综合分析表明，2015 年前长株潭城市群内部的产出资本比的增加是“中四角”水生态足迹总体区域差异缩小的关键因素，2016 年后武汉城市群和环鄱阳湖城市群在产出资本比和劳动力用水比两方面的差异拉大及江淮城市群在产出资本比、资本劳动比与劳动力用水比方面的差异缩减是“中四角”水生态足迹总体区域差异扩大的根本原因。

### 参考文献:

- [1] 张义, 张合平, 郭琳. 我国水生态足迹研究进展[J]. 水电能源科学, 2013a, (2): 57-60.
- [2] 陈正雷, 陈星. 山东省水生态足迹时空分布与驱动效应研究[J]. 人民黄河, 2020 (4): 76-80.

- 
- [3]韩佳, 任世芳. 基于水生态足迹的太原市水资源利用研究[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2019(1): 5-9.
- [4]宦臣臣, 甘升伟, 徐慧, 等. 无锡市水生态足迹与水资源可持续发展评价[J]. 水利经济, 2018(4): 58-62.
- [5]Su Y, Gao W J, Guan D J, et al. Dynamic assessment and forecast of urban water ecological footprint based on exponential smoothing analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195:354-364.
- [6]张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2019(2): 93-100.
- [7]Dai D, Sun M D, Xu X Q, et al. Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: A case study in zhangjiakou city, north China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26:11000-11011.
- [8]谢利英, 谢成兴, 杨一鸣. 基于水生态足迹的甘肃省水资源可持续利用与经济发展[J]. 统计与管理, 2021(4): 4-9.
- [9]王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019(1): 80-90.
- [10]许国钰, 任晓冬, 杨振华, 等. 利用弹性网对 PLS 佐证分析城市水生态足迹及驱动因素——以贵阳市为例[J]. 水土保持通报, 2018(4): 220-227.
- [11]刘玉邦, 严雨男. 成都市水生态足迹的时间分布特征及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020(2): 93-98.
- [12]焦士兴, 王安周, 陈林芳, 等. 河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析[J]. 水文, 2020(1): 91-96.
- [13]卢新海, 陈丹玲, 匡兵. 区域一体化背景下城市土地利用效率指标体系设计及区域差异——以长江中游城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018(7): 102-110.
- [14]艾婷. 长江中游城市群跨区域科技合作机制研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2019.
- [15]陆砚池, 方世明. 中国省域水资源生态足迹格局均衡性研究[J]. 水土保持研究, 2018(4): 289-297.
- [16]黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008(3): 1279-1286.
- [17]国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB3828—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18]张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013(8): 1601-1610.
- [19]卢新海, 刘瑞红, 匡兵. 湖北省耕地压力的区域差异及动态演进分析[J]. 农业工程学报, 2019(23): 266-272.
- [20]Everitt B S, Hothorn T. A handbook of statistical analyses using R (2th edition) [M]. Florida: CRC Press, 2009.
- [21]Silverman B W. Density estimation for statistics and data analysis [M]. Florida: CRC Press, 1986.

---

[22]陈景华,王素素,陈敏敏.中国服务业FDI分布的区域差异与动态演进:2005-2016[J].数量经济技术经济研究,2019(5):118-132.

[23]刘珂伶,杨柳.基于能值理论的水资源生态足迹变化特征——以北京市为例[J].水土保持研究,2021(3):406-414.

[24]邓益斌,尹庆民.中国水资源利用效率区域差异的时空特性和动力因素分析[J].水利经济,2015(3):19-23.