

长江中游城市群水资源生态足迹时空演变及其驱动因素分析¹

张婉玲^{1,2} 邹磊^{2*} 夏军^{2,3} 宋进喜¹ 乔云峰⁴

(1. 西北大学城市与环境学院陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西西安

710127;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京

100101;

3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京

100101)

【摘要】:客观核算城市群水资源生态足迹,对评估区域水资源盈亏状况和衡量水资源的可持续利用具有重要意义。基于“省公顷”修正水资源均衡因子,计算并分析2000~2019年长江中游城市群水资源生态足迹时空演变规律,并利用地理探测器探究其驱动因素。结果表明:(1)2000~2019年长江中游城市群水资源生态足迹整体呈波动增长态势,增幅为34.63%;(2)长江中游城市群水资源生态足迹区域差异显著,其中武汉城市圈水资源生态足迹北部高于南部,环鄱阳湖城市群水资源生态足迹呈“西高东低”的分布格局,环长株潭城市群水资源生态足迹北部和东南部地区高于中部地区;(3)水资源生态足迹强度是长江中游城市群水资源生态足迹时空演变的主要驱动因素,具有最高解释力的交互因子为水资源生态足迹强度和GDP。该研究结果可为决策者因地制宜制定区域水资源管理政策提供科学依据。

【关键词】:水资源生态足迹;水资源均衡因子;省公顷;地理探测器;长江中游城市群

【中图分类号】:TV213.4 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0083- 10

¹ **【收稿日期】**:2022- 02- 21; **【修回日期】**:2022- 05- 05

【基金项目】:国家自然科学基金项目(41890824, 42101043);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23040304)

【作者简介】:张婉玲(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为水资源可持续利用。E-mail:1028247933@qq.com

【* 通讯作者 E-mail】:zoulei@igsrr.ac.cn

水是生命之源、生产之要、生态之基^[1]。然而,随着城市化进程的加快,水资源短缺、水环境污染、水生态退化等问题频发,严重影响了城市水资源的可持续利用。如何化解城市水资源问题对城市经济发展的制约,实现城市水资源的可持续利用,成为当前经济社会发展亟待解决的问题^[2]。水资源生态足迹定义为满足区域人类社会生产、生活所需及维持生态系统健康所需的全部水资源量的生态空间面积,体现了水资源利用对生态空间的占用^[3],可用于分析区域水资源可持续利用状况^[4]。因此,客观核算城市水资源生态足迹,明晰社会、经济和技术等多方面因素变化对水资源生态足迹的影响,对衡量城市水资源可持续发展状况具有重要意义。

生态足迹模型是由加拿大生态经济学者 Rees 等^[5]在 1992 年提出,后由 Wackernagel 等^[6]进一步完善,得到了众多学者的研究与应用。Marti 等^[7]基于数据包络分析方法,将生态足迹和人口作为投入,国民生产总值作为产出,计算了 45 个非洲国家的环境效率。Baz 等^[8]采用非对称、非线性方法,探究了能源消耗和经济增长对巴基斯坦生态足迹的影响。方恺^[9]则将生态足迹扩展到三维模式,用于衡量人类引起的自然资本占用。黄林楠等^[10]在生态足迹模型的基础上提出了水资源生态足迹模型,为定量评价水资源可持续利用提供了新方法。当前,众多学者分别对国家、省市^[13,14]、流域^[15,16]和城市群^[17,18]等不同尺度上的水资源生态足迹进行了计算和分析,但这些研究在计算水资源均衡因子时采用的参数都以“全球公顷”为标准,难以准确反映区域水资源生态容量的真实情况。因此,基于“国家公顷”^[19]、“省公顷”^[20]和“市公顷”^[14]等对水资源均衡因子的改进研究也引起了学者的广泛关注。总的来说,目前对亚国家级尺度的参数计算,在水资源生态足迹模型中的应用还在摸索阶段。

长江中游城市群作为长江经济带的重要组成部分,该地区的水资源问题引起了学者的广泛关注。如卢亚丽等^[21]基于水资源生态足迹模型,探究长江经济带 2010~2018 年 131 个城市的水资源环境承载力的演变特征。结果表明,长江经济带人均水资源生态足迹呈阶梯式分布,水资源承载力在胡焕庸线以西区域最大。陈义忠等^[22]基于水-碳-生态足迹评估 2000~2015 年长江中游城市群的资源环境压力,结果表明人均水资源生态足迹整体呈先下降后上升最后趋于平衡的变化趋势。总体而言,上述研究多集中于城市群资源环境承载力研究,对长江中游城市群水资源生态足迹时空变化及其驱动因素关注较少,同时忽视了驱动因素间协同作用对水资源生态足迹演变的影响。

鉴于此,本文基于“省公顷”修正水资源均衡因子以反映区域水资源状况,核算并分析 2000~2019 年长江中游城市群水资源生态足迹时空演变规律,并进一步利用地理探测器从自然资源、社会经济、技术水平和生态环境等 4 个方面探究长江中游城市群水资源生态足迹的驱动因素。研究成果可为长江中游城市群的水资源科学管理提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

根据 2015 年国务院批复的《长江中游城市群发展规划》,明确长江中游城市群是以武汉城市圈、环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型国家级城市群,共包括 31 个地级市及部分县(区)。长江中游城市群承东启西、连南接北,是长江经济带的重要组成部分。该地区地形以冲积平原为主,地势平坦,属于亚热带季风性气候,拥有洞庭湖、鄱阳湖、汉江、湘江等众多江河湖泊,水资源丰富^[23]。

1.2 数据来源及处理

本文所使用的数据主要包括:(1)2000、2005、2010 和 2015 年耕地、林地、草地和水域等 4 种地类生物资源账户的产品数据、土地利用数据以及 2000~2019 年 31 市人口数据,分别来源于湖北、湖南、江西三省的《统计年鉴》,国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)和各市的《国民经济和社会发展统计公报》;(2)2000~2019 年生产、生活、生态用水数据、水资源总量、产水模数和万元工业增加值用水量等数据来源于湖北、湖南、江西三省的《水资源公报》;(3)人口、

国内生产总值(GDP)、产业结构、人均绿地面积和工业废水排放量等数据,来源于长江中游城市群内 31 个地级市的《国民经济与社会发展统计公报》和《中国城市统计年鉴》;(4)植被覆盖度基于归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据估算得到,所用 NDVI 数据来源于中国月度 NDVI 空间数据集^[24],空间分辨率为 1 km。依据地理探测器的要求,文中将输入的影响因素数据(X)转换为“类”(分级)数据,其中,植被覆盖度变量按照 $<0.1, 0.1\sim 0.3, 0.3\sim 0.5, 0.5\sim 0.7, >0.7$ 分为 5 类,其余变量按照自然间断点法进行分类。

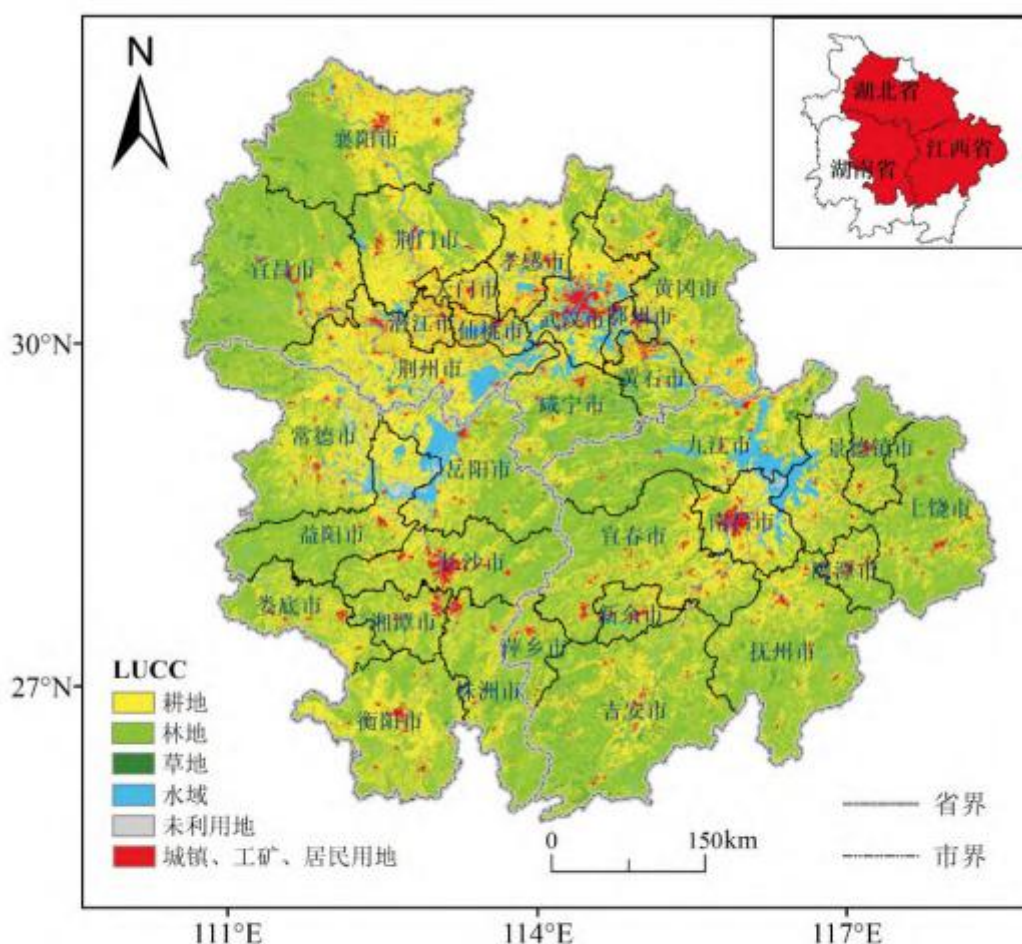


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2 研究方法

2.1 水资源生态足迹模型

水资源生态足迹模型是在生态足迹模型的基础上,将消耗的水资源量转化为相应账户的水资源用地面积,再对其均衡化^[10]。根据对用水的分类,水资源账户由生产用水、生活用水和生态用水 3 个二级账户组成。水资源生态足迹模型计算公式如下:

$$EF_w = N \times ef_w = \gamma_w \times (W/P_w) \quad (1)$$

$$EC_w = N \times ec_w = \alpha \times \phi_w \times \gamma_w \times (Q/P_w) \quad (2)$$

$$\text{水资源生态盈余/赤字} = EC_w - EF_w \quad (3)$$

式中：EF_w 是水资源生态足迹 (hm²)；N 为研究区域人口数量；ef_w 为区域人均水资源生态足迹 (hm²/cap)；ec_w 为全球水资源均衡因子；W 为区域消耗水资源量 (m³)；P_w 为水资源全球平均生产能力 (m³/hm²)；EC_w 为水资源生态承载力 (hm²)；ec_w 为人均水资源生态承载力 (hm²/cap)；φ_w 为水资源产量因子；Q 为区域水资源总量 (m³)；α 为扣除维持生态环境所需水资源量比例的值，一般取值为 0.4^[10]。

水资源生态盈余/赤字可衡量区域水资源供需平衡状况^[21]及区域水资源可持续利用状况，对城市群水资源合理开发利用具有重要意义。若 EC_w>EF_w，表明区域水资源处于盈余状态，可持续利用状况良好；EC_w=EF_w 时，水资源消耗处于平衡状态；EC_w<EF_w 时，区域水资源处于赤字状态，水资源利用不可持续。

2.2 基于“省公顷”的水资源均衡因子参数改进

“省公顷”指单位省公顷土地的平均生物生产能力，可由一个省份全部生物量 (Q/kg) 与生物生产性土地面积 (S/hm²) 的比值表示，即 1 单位省公顷等于能够生产 Q/S kg 生物量的生物生产性土地面积^[25]。生物生产性土地包括六类，即耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地。本文根据各省实际情况核算由农产品 (稻谷、小麦、玉米、薯类、花生、油菜籽、棉花、大豆、麻类、甘蔗、烟叶、蔬菜)、林产品 (松脂、油茶籽、油桐籽、茶叶、柑橘、梨)、畜产品 (肉类、奶类、禽蛋) 和水产品 (鱼类、甲壳类、贝类) 共 24 项组成的生物资源账户。由于生物产品直接相加会降低计算的科学性，因此，文章将不同的生物产品转化成统一的热值形式进行计算，使得全省各类生物生产性土地的生产力能够直接相加，汇总处理后得到修正的省域各类生物生产性土地的均衡因子。计算公式如下：

$$EQF_j = \frac{\bar{P}_j}{\bar{P}} = \frac{Q_j}{S_j} \bigg/ \frac{\sum Q_i}{\sum S_i}$$

$$= \frac{\sum_k P_k^j \lambda_k^j}{S_j} \bigg/ \frac{\sum_k \sum_j P_k^j \lambda_k^j}{\sum S_j} \quad (4)$$

式中：EQF_j 为省域内第 j 类生物生产性土地的均衡因子； $\bar{P}_j$ 为省域内第 j 类生物生产性土地的平均生产力； $\bar{P}$ 为省域内全部生物生产性土地的平均生产力 (kJ/hm²)；Q_j 为省域内第 j 类生物生产性土地的总生物产量 (kJ)；S_j 为省域内第 j 类生物生产性土地面积 (hm²)；P_{jkj} 为省域内第 j 类生物生产性土地的第 k 种生物产品产量 (kg)；λ_{jkj} 为省域内第 j 类生物生产性土地的第 k 种生物产品的单位热值 (kJ/kg)。单位热值数据通过查阅《农业技术经济手册(修订版)》得到。

水资源用地描述了水资源的生态环境和社会经济功能，其均衡因子可由水资源用地的平均生产力与全部生物生产性土地的平均生产力的比值表示。由于水资源用地的独特性，难以直接通过生物产品产量计算平均生产力推求其均衡因子^[14]，本文通过式(4)推求耕地均衡因子后间接计算水资源均衡因子，其计算如下：

$$\frac{O_A}{\gamma_A} = \frac{O_T}{1} = \frac{O_w}{\gamma_w} \quad (5)$$

式中：O_A 为耕地单位面积产值；γ_A 为生物生产性土地中耕地的均衡因子；O_T 为所有土地类型的单位面积平均产值；O_w 为水资源用地单位面积产值；γ_w 为水资源均衡因子。

水资源用地单位面积产值可用产水模数与万元 GDP 用水量的比值表示，带入(5)式可得省域水资源均衡因子计算公式为：

$$\gamma_{wp} = \left(\frac{P}{W_{GDP}} \right) \times \gamma_{Ap} / (G_A / S_A) \quad (6)$$

式中：γ_{wp} 为省域水资源均衡因子；P 为省域平均产水模数；WGDP 为省域万元 GDP 用水量；γ_{Ap} 为省域耕地均衡因子值；G_A 为省域耕地产量；S_A 为省域耕地面积。

水资源产量因子根据市域平均产水模数与省域平均产水模数的比值计算，全球水资源平均生产能力用省域平均产水模数代替。由“省公顷”测算的水资源均衡因子将省域内所有水资源用地的平均生产能力看作是相同的，即同一个省份所有下辖市的水资源均衡因子都等于省域水资源均衡因子值，故用修正后的各省域水资源均衡因子替换(1)、(2)式中相应参数，可得到长江中游城市群 31 个地级市的水资源生态足迹。

表 1 水资源生态足迹驱动因素

维度	指标	指标含义
自然资源	降雨量(亿 m ³)/X1	反映区域水资源状况
	人均水资源量(m ³)/X2	反映水资源人均拥有情况
	植被覆盖度(%) /X3	反映区域植被生长状况

社会经济	GDP (亿元) /X4	反映区域经济发展水平
	人口密度 (人/km ²) /X5	反映人口密集程度
	产业结构高级化指数 (-)/X6	反映区域经济结构优化程度
技术水平	每亿人拥有有效专利数 (件)/X7	反映区域科技创新能力
	万元工业增加值用水量 (m ³ /万元)/X8	反映区域工业用水效率
	水资源生态足迹强度 (hm ² /元)/X9	反映区域水资源利用效率
生态环境	人均绿地面积 (m ²) /X10	反映城市生态文明建设情况
	工业废水排放量 (万 t)/X11	反映环境污染排放情况
	污水集中处理率 (%) /X12	反映污水的处理能力

注：植被覆盖度由 NDVI 计算，产业结构高级化指数按照付凌晖[28]提出的方法计算；其余数据均来源于三省《水资源公报》。

2.3 影响因素指标选取

长江中游城市群内各城市自身资源条件与社会经济发展水平相差较大。本文拟从自然资源、社会经济、技术水平和生态环境等 4 个方面探究长江中游城市群水资源生态足迹时空演变的驱动因素。结合研究区域的实际情况，并参考国内外相关研究^[26, 27, 28, 29]，自然资源主要从水、植被两个方面考虑自然环境的驱动影响；社会经济方面选择 GDP、人口和产业结构验证人文经济要素的驱动作用；技术水平则选择专利技术、用水效率方面验证，其中水资源生态足迹强度是水资源生态足迹与区域 GDP 的比值，表征水资源利用效率[12]；生态环境主要考虑绿地面积和废水处理方面的驱动影响。

2.4 地理探测器

地理探测器是探测变量时空分异性，以及解释其背后驱动力的统计方法^[30]。本文采用因子探测器和交互作用探测器来分析各影响因素对长江中游城市群水资源生态足迹时空分异的解释能力。因子探测用于探测长江中游城市群水资源生态足迹的时空分异性，以及各因子多大程度上解释了长江中游城市群水资源生态足迹的时空分异。计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式中：h=1, ..., L 为变量 Y 或者因子 X 的分层，即分类或分区；N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数；σ_h² 和 σ² 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。q 的值域为[0, 1], q 值越大表示各影响因素对水资源生态足迹时空分异的解释力越强，反之越弱。

交互作用探测可以评估不同因素共同作用时是否会增加或者减弱对水资源生态足迹时空分异的解释力。交互作用类型主要分为(表 2):非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强。

表 2 两个自变量对因变量交互作用的类型

类判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

3 结果分析

3.1 改进后水资源均衡因子

根据公式(4)~(6)计算得到三省典型年水资源均衡因子均值并与“全球公顷”的结果进行对比(表 3)。基于“省公顷”计算的水资源均衡因子高于基于“全球公顷”计算的结果^[10], 主要是两者的研究尺度不同。同时, 在基于“全球公顷”计算时会将海洋部分也认定为水资源平均生产能力^[20], 对于像长江中游城市群这样的内陆地区, 采用“省公顷”模型基于省域内各类土地的生物生产数据和土地面积数据来确定水资源均衡因子, 能更合理、真实地反映省域内水资源用地的平均生产能力。

表 3 水资源均衡因子结果对比

	湖北省	湖南省	江西省	全球公顷
水资源均衡因子	16.71	15.98	46.88	5.19

3.2 长江中游城市群水资源生态足迹时空演变

3.2.1 长江中游城市群水资源生态足迹时间变化

长江中游城市群 2000~2019 年水资源生态足迹整体呈波动增长趋势(图 2), 增长幅度为 34.63%, 2011 年出现峰值 $387.82 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。从次级城市群角度看, 2000~2019 年武汉城市圈水资源生态足迹呈波动增长趋势, 增幅高达 94.53%; 环长株潭城市群水资源生态足迹则在 $31.23 \times 10^6 \sim 81.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的范围内波动; 研究期内环鄱阳湖城市群水资源生态足迹则呈波动下降趋势。2011 年之后各城市群水资源生态足迹有不同程度的降低, 这可能是湖北、湖南、江西三省积极响应中共中央提出“实行最严格的水资源管理制度”的影响。

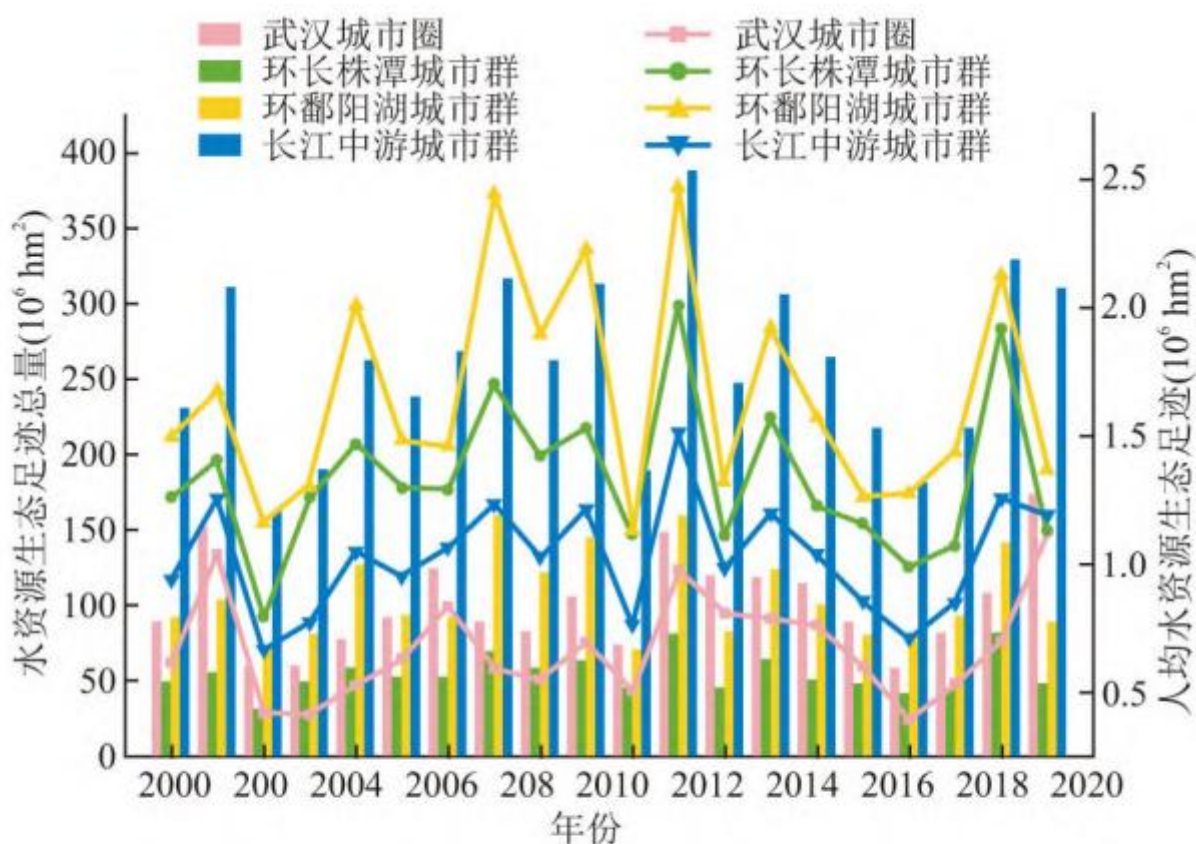


图 2 长江中游城市群水资源生态足迹时序变化

Fig. 2 Time series change of water resources ecological footprint of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

长江中游城市群人均水资源生态足迹维持在 $0.6 \sim 1.5 \text{ hm}^2/\text{人}$ 之间(图 2)。从次级城市群角度看, 人均水资源生态足迹由大到小依次为: 环鄱阳湖城市群、环长株潭城市群、武汉城市圈。研究期内武汉城市圈人均水资源生态足迹呈波动上升趋势, 从

2000 年的 $0.6 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2019 年的 $1.1 \text{ hm}^2/\text{人}$ ，而其余两城市群人均水资源生态足迹呈波动减少趋势。

进一步计算长江中游城市群水资源生态承载力和水资源生态盈亏，结果表明：2000~2019 年，长江中游城市群水资源生态承载力整体上呈波动增长趋势，增长幅度为 4.53%。其中 2011 年水资源处于生态赤字状态，其余年份处于生态盈余状态。从次级城市群角度看，环鄱阳湖城市群水资源生态承载力最高。武汉城市圈水资源生态承载力呈波动增长趋势，2011 年和 2019 年地区水资源赤字情况较为严重。环长株潭城市群水资源生态承载力和水资源可持续利用状态整体表现则相对稳定，其有 13a 两者的差值为正。

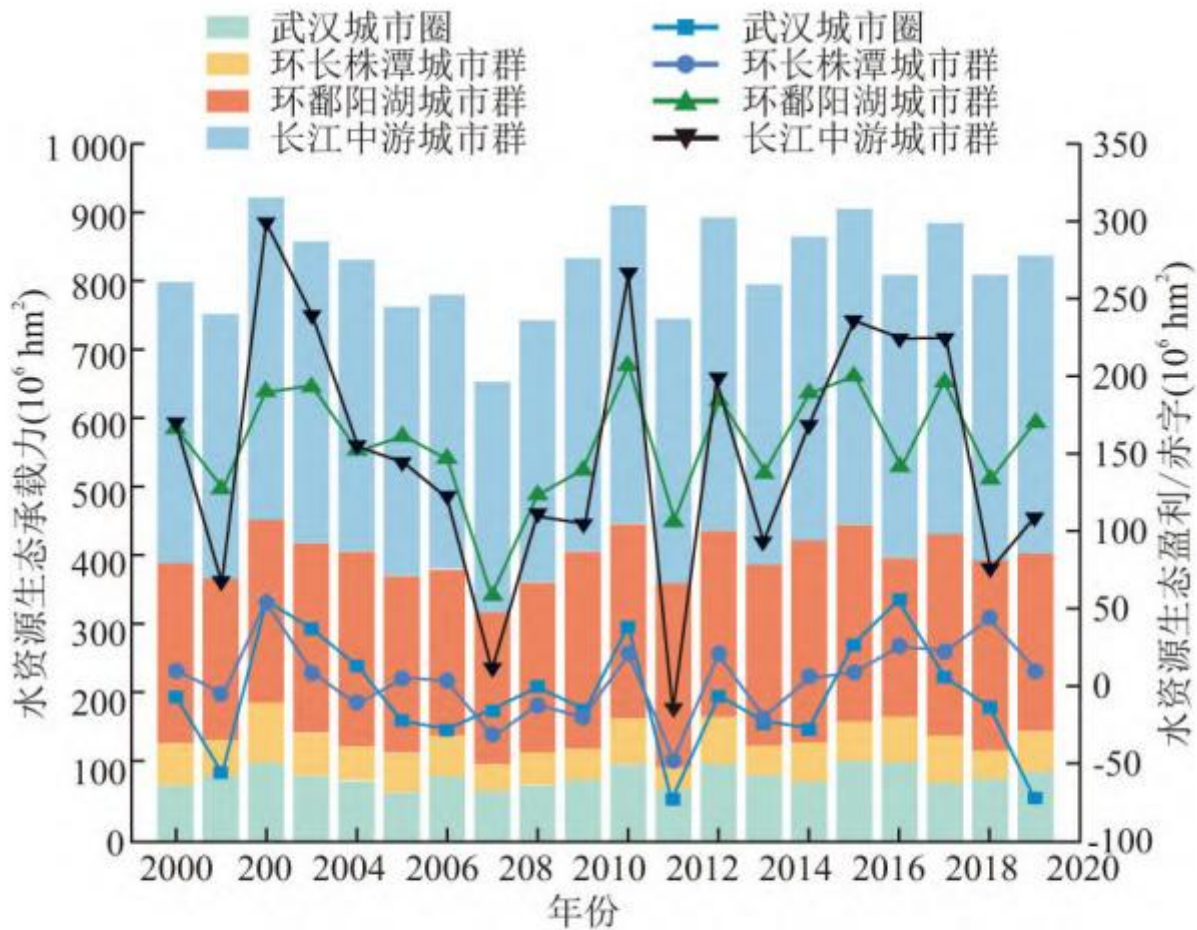


图 3 长江中游城市群历年水资源生态足迹、生态承载力与生态盈余/赤字

Fig. 3 Water resources ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological profit and loss of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River over years

3.2.2 长江中游城市群水资源生态足迹空间变化

根据标准差分级方法将长江中游城市群水资源生态足迹划分为高值区(>25.8)、较高值区([19.6, 25.8))、中值区([13.4, 25.8))、低值区([7.2, 13.4))和极低值区(<7.2)5个等级(图4)。本文选取2000、2005、2010、2015和2019年5个典型年对长江中游城市群水资源生态足迹空间变化进行分析,从各分类数量来看,2000年极低值区16个,低值区11个,中值区4个;2010年极低值区的数量增加到21个;2019年荆门和襄阳处于高值区,孝感市由低值区演化为较高值区。总体上,处于较高值区与高值区的城市数量占比保持在0~9.6%,表明长江中游城市群大部分地区对水资源的占用情况较为良好,但仍有部分城市占用过高,过分追求经济效益而对水资源保护力度不足。

从次级城市群角度看,武汉城市圈水资源生态足迹北部高于南部,水资源生态足迹极低值区主要在3个地级市(天门、潜江、仙桃)以及东南地区。环长株潭城市群水资源生态足迹北部、东南地区(常德、岳阳、娄底)高于中部地区,研究期内各市水资源生态足迹均低于 $13.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 且差异较小。环鄱阳湖城市群水资源生态足迹呈西高东低的分布态势,极低值区主要在景德镇市、鹰潭市、抚州市和新余市。

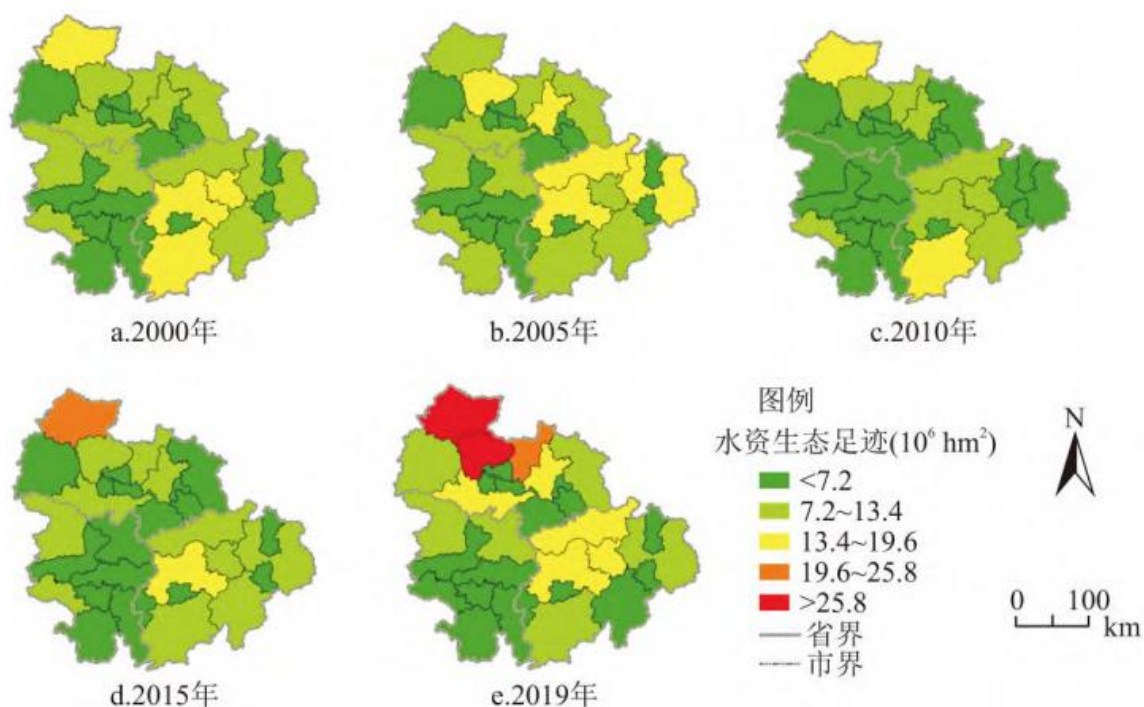


图4 长江中游城市群水资源生态足迹时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial changes of water resources ecological footprint in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

长江中游城市群水资源生态盈余/赤字具有显著的空间差异性(图5)。2010和2015年长江中游城市群水资源生态状况整体表现良好,其余年份水资源生态状况相对较差,2019年处于水资源赤字状态的城市数量最多(15个)。从次级城市群角度看,环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群整体处于水资源盈余状态,其中环鄱阳湖城市群南部地区(吉安、抚州、上饶、宜春)盈余状态较好;武汉城市圈的大部分城市(武汉、襄阳、孝感、荆门、天门)则长期处于生态赤字状态。

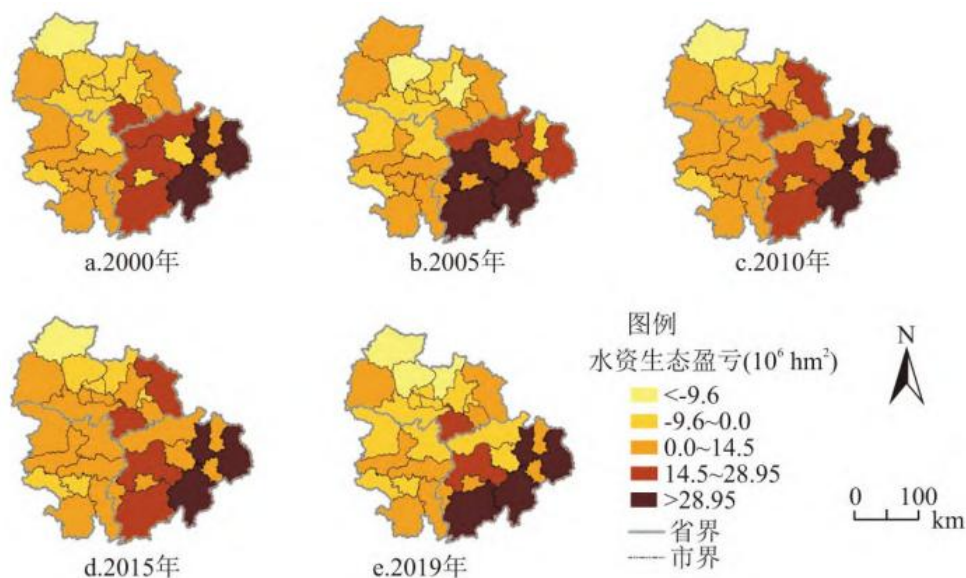


图 5 长江中游城市群水资源生态盈余/赤字时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes of water resources ecological surplus/deficit in urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

3.3 长江中游城市群水资源生态足迹时空演变的驱动因素分析

3.3.1 长江中游城市群驱动因素探测结果分析

以 2019 年为例,利用地理探测器模型中的因子探测模块分析各因素对长江中游城市群水资源生态足迹时空分异特征的影响(图 6)。从整个长江中游城市群角度看,解释力水平排在前五的因素从大到小依次为水资源生态足迹强度、降雨量、人均水资源量、GDP 和工业废水排放量。其中水资源生态足迹强度(X9)解释力 q 值在 0.7 以上,为主要驱动因素。

从次级城市群角度看,武汉城市圈水资源生态足迹时空分异的主要驱动因素为降雨量(X2)和水资源生态足迹强度(X9);环长株潭城市群水资源生态足迹时空分异的主要驱动因素为:工业废水排放量(X11)、水资源生态足迹强度(X9)、污水集中处理率(X12)和降雨量(X1);环鄱阳湖城市群水资源生态足迹时空分异的主要驱动因素为工业废水排放量(X11)和 GDP(X4)。

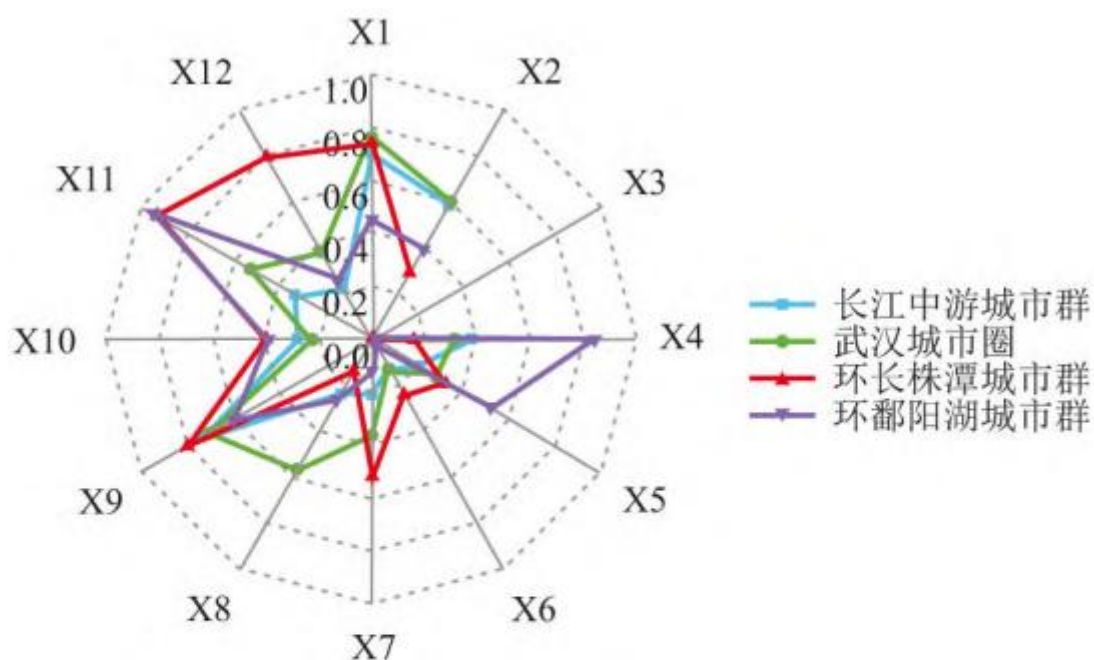


图 6 长江中游城市群因素探测

Fig. 6 Factor detection of urban agglomerations in middle reaches of Yangtze River

3.3.2 长江中游城市群驱动因素交互探测结果分析

根据 2019 年各因素的交互探测结果可知：在所选因素中，任意两种驱动因素对水资源生态足迹时空分异的交互作用都大于单个因素的独自作用(图 7)。从整个长江中游城市群角度看，水资源生态足迹强度与 GDP 因素的交互解释力水平最高，达到 0.973 5。从次级城市群角度看，人均绿地面积和工业废水排放量的交互作用对武汉城市圈水资源生态足迹时空分异的解释力水平最强(0.990 9)；环长株潭城市群中包含工业废水排放量、污水集中处理率、水资源生态足迹强度的因子交互解释力明显增强；环鄱阳湖城市群水资源生态足迹的时空分异解释力最高的因子对为 $X6 \cap X11$ 、 $X5 \cap X10$ ，说明社会经济与生态环境因素的交互作用对水资源生态足迹时空分异的解释力较强。

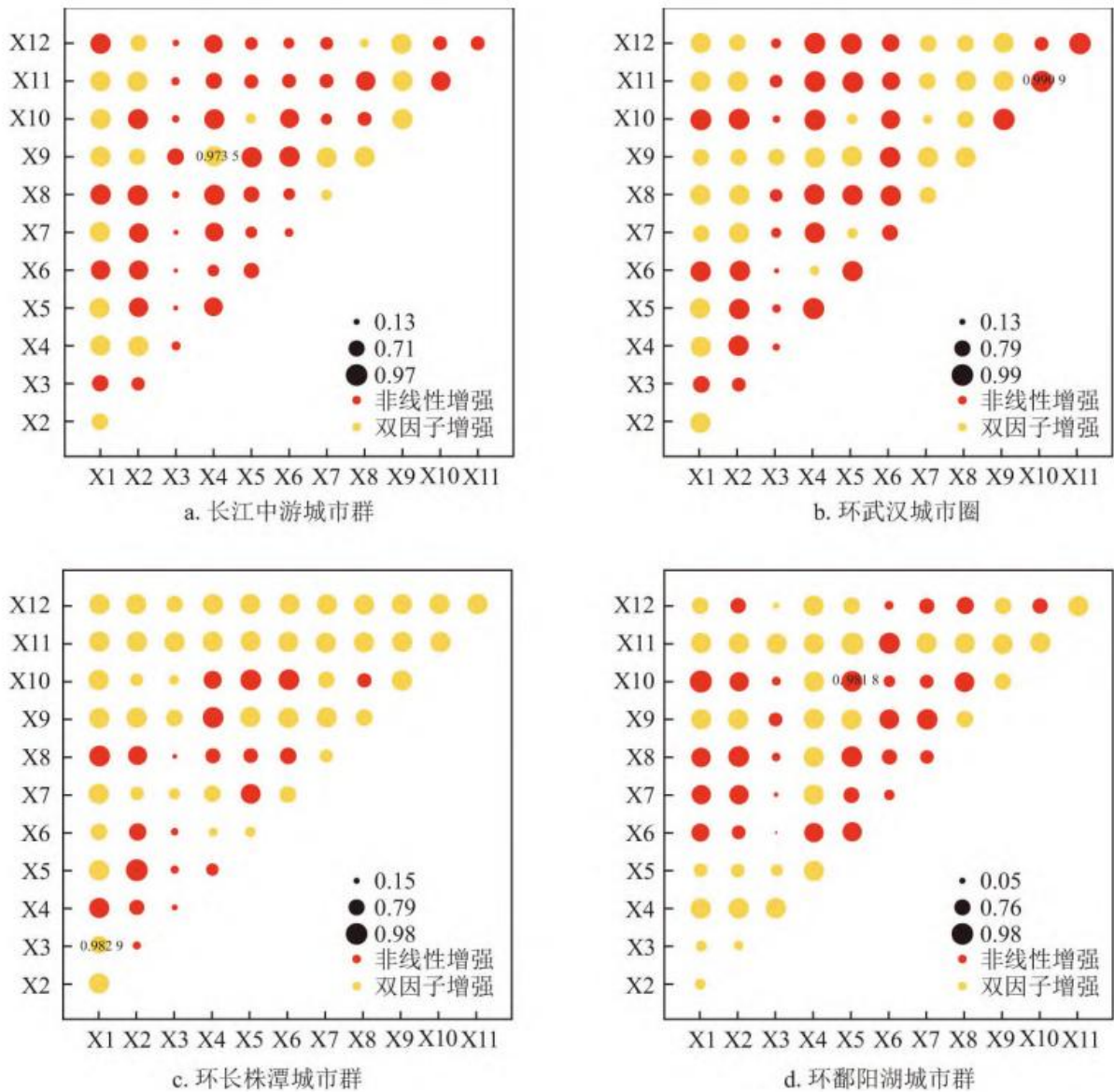


图7 长江中游城市群交互作用探测

Fig. 7 Detection of interaction of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

4 讨论与结论

4.1 讨论

长江中游城市群水资源生态状况整体较为良好，其中环鄱阳湖城市群整体上处于水资源盈余状态，武汉城市圈大部分地区处于水资源赤字状态(图5)，这与陈义忠等[27]的研究结果相近。根据地理探测器的结果，单因子探测排名前5的驱动因素从大到小依次为：水资源生态足迹强度、降雨量、人均水资源量、GDP和工业废水排放量。可见水资源的利用、当地水资源禀赋和社会经济对长江中游城市群水资源生态足迹有重要影响。交互探测解释力最高的因素对为水资源生态足迹强度与GDP，而各子城市群水资源生态足迹时空分异的主要、次要驱动因素存在明显的区域差异。因此，各城市群应结合实际建立严格的用水制度，对于水资源生态赤字严重的区域，需进一步调整城市产业结构、提高废水处理技术，最大程度保障水资源的合理分配，进而提高水资源利用效率。该研究成果可为其他城市群在水资源方面的研究提供思路与方法上的借鉴，也为决策者制定水资源管理政策

提供科学依据。

4.2 结论

本研究基于“省公顷”修正水资源均衡因子，核算并分析长江中游城市群 2000~2019 年水资源生态足迹的时空演变规律，并利用地理探测器探究影响水资源生态足迹时空分异的驱动因素，主要结论如下：

(1) 2000~2019 年长江中游城市群水资源生态足迹整体上呈波动增长的趋势，增长幅度为 34.63%。其中，环长株潭城市群水资源生态足迹较为稳定；武汉城市圈水资源生态足迹在 2016~2019 年增长显著。进一步计算长江中游城市群水资源生态盈余/赤字，发现环鄱阳湖城市群水资源可承载状况最好，研究期内均处于生态盈余状态。

(2) 长江中游城市群水资源生态足迹空间分布差异显著，其中武汉城市圈水资源生态足迹北部高于南部，环鄱阳湖城市群水资源生态足迹呈“西高东低”的分布格局，环长株潭城市群水资源生态足迹北部和东南部地区相对较高。

(3) 因子探测和交互探测结果表明：长江中游城市群水资源生态足迹的时空分异受到水资源生态足迹强度、降雨量、工业废水排放量和污水处理率的多因素交互影响，并且两驱动因素的交互作用大于单个因素。

参考文献

- [1] 苏聪文, 邓宗兵, 李莉萍, 等. 中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5):1282-1301. SU C W, DENG Z B, LI L P, et al. Spatial pattern evolution and convergence of water eco-civilization development index in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5):1282-1301.
- [2] 韩雁, 贾绍凤, 鲁春霞, 等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征——以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6):1392-1401. HAN Y, JIA S F, LU C X, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: A case study in Zhangjiakou[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6):1392-1401.
- [3] 路瑞, 赵琰鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(11):48-52, 134. LU R, ZHAO Y X. Analysis of the water resources utilization in the Yellow River Basin based on water resources ecological footprint model[J]. Yellow River, 2020, 42(11):48-52, 134.
- [4] 张淑兰, 张海军, 张孟傲, 等. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江, 2021, 52(4):130-136. ZHANG S L, ZHANG H J, ZHANG H J, et al. Analysis on ecological footprint of water resources in Shaanxi Province and its sustainable utilization[J]. Yangtze River, 2021, 52(4):130-136.
- [5] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [6] WACKERNAGEL M, WILLIAM E R. Our Ecological Footprint: reducing human impact on the earth[M]. New Society Publishers, 1998.
- [7] MARTI L, PUERTAS R. Analysis of the efficiency of African countries through their Ecological Footprint and Biocapacity [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722:137504.

-
- [8] BAZ K, XU D, ALI H, et al. Asymmetric impact of energy consumption and economic growth on ecological footprint: using asymmetric and nonlinear approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718:137364.
- [9] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源[J]. *生态学报*, 2015, 35(11):3766-3777. Fang K. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11):3766-3777.
- [10] 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, 28(3):1279-1286. HUANG L N, ZHANG W X, JIANG C L, et al. Ecological footprint method in water resources assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3):1279-1286.
- [11] 李雨欣, 薛东前, 宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7):1574-1584. LI Y X, XUE D Q, SONG Y Y. Spatio-temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7):1574-1584.
- [12] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(12):4651-4662. HAO S, SUN C Z, SONG Q M. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12):4651-4662.
- [13] 左其亭, 姜龙, 冯亚坤, 等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10):1-8, 34. ZUO Q T, JIANG L, FENG Y K, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the Provinces in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10):1-8, 34.
- [14] 范月华, 陈涟, 唐文雯, 等. 基于改进水生态足迹模型的深圳市水资源可持续利用分析[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4):36-39, 35. FAN Y H, CHEN L, TANG W W, et al. Sustainable utilization of water resources in Shenzhen city based on improved water ecological footprint model[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(4):36-39, 35.
- [15] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5):1076-1087. AN H, FAN L J, WU H L, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River Basin based on BP neural network[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(5):1076-1087.
- [16] 赵博. 辽河流域水资源生态足迹及生态承载力时空分析研究[J]. *水资源开发与管理*, 2021(9):32-37, 43. ZHAO B. Spatial and temporal analysis of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Liaoh River basin[J]. *Water Resources Development and Management*, 2021(9):32-37, 43.
- [17] CHEN Y, LU H, YAN P, et al. Analysis of water-carbon-ecological footprints and resource-environment pressure in the Triangle of Central China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125:107448.
- [18] 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, 28(1):80-90. WANG G Y, LIU J. Coordinating evaluation of water resources environment and economic development based on improved water ecological footprint: A case study of central Plains urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1):80-90.

-
- [19] 杜轶, 郭青霞, 张勇. 2 种不同算法的水资源生态足迹动态比较分析——以山西省为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):165-171. DU Y, GUO Q X, ZHANG Y. Dynamic comparative analysis of water resources ecological footprint based on two different algorithms: Taking Shanxi Province as an example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):165-171.
- [20] WANG H, HUANG J, ZHOU H, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262:110331.
- [21] 卢亚丽, 徐帅帅, 沈镭. 基于胡焕庸线波动的长江经济带水资源环境承载力动态演变特征[J]. 自然资源学报, 2021, 36(11):2811-2824. LU Y L, XU S S, SHEN L. The dynamic evolution of water resources environmental carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on the fluctuation of Hu Line[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(11):2811-2824.
- [22] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4):1368-1380. CHEN Y Z, QIAO Y F, LU H W, et al. Water-carbon-ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4):1368-1380.
- [23] 邹磊, 刘慧媛, 王飞宇, 等. 长江中游城市群绿色发展水平的地区差异及其影响因素[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(8):1462-1475. ZOU L, LIU H Y, WANG F Y, et al. Regional difference and influencing factors of the green development level in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2022, 52(8):1462-1475.
- [24] 徐新良. 中国月度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI:10.12078/2018060602. XU X L. Spatial distribution dataset of monthly vegetation index (NDVI) in China. Data registration and publication system of Data Center of Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI:10.12078/2018060602.
- [25] 张恒义, 刘卫东, 林育欣, 等. 基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2738-2748. ZHANG H Y, LIU W D, LIN Y X, et al. A modified ecological footprint analysis to a sub-national area: The case study of Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5):2738-2748.
- [26] 熊鸿斌, 周银双. 基于三维水足迹-LMDI 的安徽省水资源压力及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5):194-203. XIONG H B, ZHOU Y S. An analysis of water resources pressure and driving forces in Anhui Province based on LMDI-three-dimensional water footprint model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):194-203.
- [27] 宋梅, 常力月, 郝旭光. 长江中游城市群碳压力时空演化格局及驱动因素分析[J]. 环境经济研究, 2021, 6(2):23-40. SONG M, CHANG L Y, HAO X G. Analysis on the spatio-temporal evolution and driving factors of carbon pressure of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(2):23-40.
- [28] 付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. 统计研究, 2010, 27(8):79-81. FU L H. An empirical

research on industry structure and economic growth [J]. Statistical Research, 2010, 27(8):79-81.

[29] WU D. Spatially and temporally varying relationships between ecological footprint and influencing factors in China ' s Provinces Using Geographically Weighted Regression (GWR) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261:121089.

[30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.