#### DOI: 10.5846/stxb202005111180

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.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. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4651-4662.

# 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力 评价

郝 帅1,孙才志2,\*,宋强敏1

1 辽宁师范大学地理科学学院,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:基于水足迹视角,测度了中国 31 个省份 2000—2018 年的水生态足迹广度、深度及水生态压力,采用 ESTDA 框架对其时 空动态特征进行分析。结果表明:①研究期内,中国水生态足迹总量呈波动上升态势;水生态承载力波动幅度较大,空间分布格 局整体呈现自东南向西北逐渐较少的趋势。②水生态足迹广度与水生态承载力呈同步变化趋势,整体上已接近水资源可提供 的流量资本上限,各省市水生态足迹深度差异较大。③研究期内,水生态压力指数小于 1 的区域与水生态足迹深度为 1 的区域 相吻合,水生态压力指数大于 1 的区域主要分布在华北及西北地区。④LISA 时间路径表明,水生态足迹广度、深度及水生态压 力的整体空间格局均具有较强的稳定性;三者的局部空间结构在空间依赖方向上的稳定性依次加强;空间格局演化的空间整合 性呈现水生态足迹深度>水生态压力>水生态足迹广度,空间上,水生态足迹广度正向协同增长省份主要集中于南方省份,而水 生态足迹深度和水生态压力正向协同增长区则分布于华北、西北地区;各要素的空间分布格局表现出较强的路径依赖及锁定 特征。

关键词:水生态足迹深度;水生态足迹广度;水生态压力;ESTDA;LISA 时间路径

# Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China

HAO Shuai<sup>1</sup>, SUN Caizhi<sup>2,\*</sup>, SONG Qiangmin<sup>1</sup>

1 School of Geography, 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 paper, the 3D water ecological footprint model was adapted to measure the water ecological footprint size, depth, water ecological carry capacity, and water ecological pressure among 31 provinces in China from 2000 to 2018 from the perspective of water footprint. The Exploratory Time-Space Data Analysis (ESTDA) model was used to analyze the spatial change characteristics of water ecological footprint size, depth and water ecological footprint pressure in 31 provinces of China. The results showed that: (1) during the study period, the total water ecological footprint of China indicated a fluctuating and ascending tendency. The water ecological carrying capacity fluctuated greatly, and the spatial distribution pattern presented a trend of gradually decrease from southeast to northwest. (2) The water ecological footprint size and water ecological carry capacity changed simultaneously, and were close to the upper limit of flow capital that water resources can provide. There were great differences of water ecological footprint depth in provinces during study period. The water resources was 1, while the rest of the provinces needed to use the water resource

基金项目:国家社会科学基金重点项目(19AJY010)

收稿日期:2020-05-11; 网络出版日期:2021-04-21

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: suncaizhi@ lnnu.edu.cn

stock capital to make up for the shortage of water flow capital. (3) The area with water ecological pressure index less than 1 coincided with the area with depth of 1 of the water ecological footprint. The regions with water ecological pressure index greater than 1 were mainly distributed in North China and Northwest China. (4) The LISA (Local Indicators of Spatial Association) time path showed that the overall spatial pattern of the water ecological footprint size, depth and water ecological pressure had strong stability; the stability of the three local spatial structure in spatial dependence direction was strengthened in turn. The spatial integration of spatial pattern evolution presented water ecological footprint depth > water ecological footprint size, in terms of space. The provinces with positive and co-growth of water ecological footprint were mainly concentrated in southern, while the areas with positive and co-growth of water ecological footprint depth and water ecological pressure were distributed in north and northwest China. The spatial distribution pattern of each feature showed strong path dependence and locking characteristics.

Key Words: water ecological footprint size; water ecological footprint depth; water ecological pressure; ESTDA; LISA time path

随着四化建设的持续推进,资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的形势日趋严峻,水资源短缺、水 生态损害及水环境污染等问题愈加突出,已严重制约到区域经济发展及生态安全。而坚持以水定城、以水定 地、以水定人、以水定产,把水资源作为最大的刚性约束,合理规划人口、城市与产业发展是中国推进水资源高 效利用的重要举措。因此,如何客观把握区域水资源与经济发展的联系,实现两者的协调可持续发展已成为 当前研究的重点。

生态足迹(Ecological Footprint,EF)作为一种测定人类活动对资源消费程度、判断自然资产是否存在被过度利用的有效工具,目的在于从定量视角揭示人类对资源消耗量<sup>[1-2]</sup>。其相关研究方法主要有生命周期法(LCA)<sup>[3-4]</sup>、投入产出法(IOA)<sup>[5-6]</sup>、净初级生产力(NPP)<sup>[7-8]</sup>以及能值<sup>[9-10]</sup>等方法,而随着相关研究的不断深入,Niccolucci等将资本存量是否减少及减少的程度用于衡量可持续性的强弱,在此基础上提出生态足迹广度与深度两个概念,用于揭示人类社会发展对自然资本流量及存量的占用和消耗程度,标志着生态足迹模型由传统的二维向三维的转变,推动其研究向纵深方向发展<sup>[11]</sup>,而有关学者也进一步阐释了自然资本存量、流量及实现区域可持续发展之间的相互联系,即只要保证区域自然资本存量不减少,无论其流量资本是否被完全占用,仍然可以实现区域的可持续发展<sup>[12]</sup>。目前,生态足迹理论及其相关模型得到了国内外学者的认可及广泛应用,同时针对评价模型的不足,相关学者也采用了不同方法对其进行改进<sup>[13-16]</sup>。

而由生态足迹衍生出的水生态足迹,则常用于衡量特定区域对水资源的实际需求和占用情况。当前,国 内有关水生态足迹的研究多集中于省区<sup>[16-17]</sup>、城市(群)<sup>[18-20]</sup>及流域等<sup>[21-22]</sup>。刘子刚等初步界定了水生态足 迹与水生态承载力的内涵,并将水生态足迹分为水产品生态足迹、水资源生态足迹和谁污染生态足迹,在此基 础上分析了 2000—2007 年浙江省湖州市的水生态足迹和水生态承载力<sup>[23]</sup>;程超等运用水资源生态足迹模 型、基尼系数及重心模型,对 2006—2014 年滇中城市群水资源生态承载力的供需平衡、时空平衡及平衡性的 偏离程度进行了相关分析<sup>[24]</sup>;王刚毅等基于改进的水生态足迹模型,对中原城市群 2001—2016 年水量生态 足迹和水质生态足迹进行了计算,在此基础上构建了脱钩评价模型和协调度模型,并对区域经济发展和水资 源环境协调关系进行研究<sup>[18]</sup>;贾焰等生态足迹模型,构建了 5 个二级水资源账户,对石羊河流域 2001—2011 年水生态足迹、水生态承载力及生态赤字进行了研究<sup>[25]</sup>;孙才志等基于生态足迹理论,将水资源分为流量资 本和存量资本,在此基础上测度分析了 1997—2014 年中国 31 个省市水生态足迹广度与深度,并对其空间分 布格局进行分析<sup>[26]</sup>;张智雄等将灰水足迹与水生态足迹相结合,在此基础上运用扩展的 Kaya 恒等式和 LMDI 指数分解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,并结合 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<sup>[27]</sup>。

水资源作为一种可再生资源,定量表征区域水生态足迹、水生态承载力与水生态压力,进而探讨其水资源

流量资本的占用程度及存量资本的消耗状况,对实现区域水资源的可持续利用具有重要意义。此外,区域差 异性研究主要体现在地理要素不均衡性分析中的时空思维运用,而当前有关水生态足迹及水生态压力空间分 布的动态性研究仅注重空间维度,忽视了时间因素对地理要素空间分布的动态规律<sup>[28]</sup>。Rey 等<sup>[29-30]</sup>提出的探索 性时空数据分析(Exploratory Time-Space Data Analysis,ESTDA),克服了传统探索性空间数据分析(Exploratory Space Data Analysis,ESDA) 仅考虑截面数据而忽视时间维度的局限,从而实现了时间与空间的良性耦合,该模 型已在研究地理要素时空动态性分析中得以运用,并取得了理想效果<sup>[28,31-33]</sup>。鉴于此,本文从水足迹视角出 发,引入三维水生态足迹模型,对 2000—2018 年中国 31 个省份水生态足迹广度与深度、水生态承载力及水生 态压力进行测度分析,同时基于 Rey 等提出的 ESTDA 模型,借助 LISA 时间路径及时空跃迁等分析方法,对水 生态足迹广度、深度及水生态压力空间格局的动态变化特征进行分析,以期为实现中国水资源的可持续利用、 缓解水生态压力提供参考借鉴。

#### 1 研方法与数据来源

## 1.1 水生态足迹相关模型

水生态足迹是将人类生产、生活所消耗的水资源量转化为相应的产水面积。可进一步表征为在某一特定 区域内,经济规模与人口总量达到一定程度时,满足该区域发展所消耗的水资源量及吸纳生产、生活所产生的 废弃物所需要的水资源量,包括水量生态足迹、水质生态足迹和水产品生态足迹(囿于数据限制,本文暂不考 虑),反映了该区域对水资源的实际占用与需求程度;水生态承载力则用于表征某区域的水生态系统可为支 撑区域经济—社会—环境协调发展的最大供给能力,即产水能力所能供给的最大土地面积。通过对两者的对 比分析,能更好地揭示区域水资源可持续利用状况。相关公式如下<sup>[26]</sup>:

$$WEF = WEF_{wv} + WEF_{wq} \tag{1}$$

$$WEF_{wv} = \gamma \times (WF/w)$$
<sup>(2)</sup>

$$WEF_{wq} = \gamma \times Max(EF_{COD}, EF_{NH_3})$$
(3)

式中,WEF、WEF<sub>wv</sub>、WEF<sub>wq</sub>分别为区域水生态足迹总量(hm<sup>2</sup>)、水量生态足迹(hm<sup>2</sup>)和水质生态足迹(hm<sup>2</sup>); WF 表示区域水足迹总量(m<sup>3</sup>); $\gamma$ 、w 表示水资源均衡因子和水资源平均生产能力( $\gamma$  取 5.19,w 取 3140m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)<sup>[34]</sup>;EF<sub>COD</sub>、EF<sub>NH3</sub>分别表示区域 COD、NH<sub>3</sub>的水生态足迹(hm<sup>2</sup>)。

#### 1.2 水生态足迹广度与深度

水生态足迹广度和深度分别表征人类社会发展对水资源流量资本的占用水平和存量资本的消耗程度。 此外,由于水生态承载力即为水生态系统可提供的水资源流量资本的上限,因此亦是水生态足迹广度的上限。 相关计算公式见文献<sup>[26]</sup>。

1.3 水生态压力指数

由于存在空间尺度问题,以往所采用的水生态足迹赤字或盈余难以准确的衡量某区域水资源可持续利用 水平以及生态环境所承受的压力强度的大小<sup>[35]</sup>。在此,本文引入水生态压力指数,用于表征区域水生态压力 的大小。计算公式如下:

$$WEPI = WEF_{wv} / WEC$$
(4)

$$WEC = k \times \gamma \times \varphi \times (Q/w) \qquad \varphi = WM/w \tag{5}$$

式中,WEPI为水生态压力指数,当WEPI>1 说明区域水资源消费量超过供给量,水资源利用处于不安全状态;当0<WEPI<1时,水资源供给量大于消费量,处于安全状态;当WEPI=1时,两者达到平衡,水资源安全处于临界状态。WEC为区域水生态承载力(hm<sup>2</sup>),k为水资源可利用系数,相关研究表面<sup>[26,34]</sup>,若一个区域的水资源开发率超过30%—40%则会引起生态环境的恶化,因此,需要预留约60%的水量用于维持生环境的平衡,故 k 取 0.4。*φ*表示区域水资源产量因子,*Q*为区域水资源总量(m<sup>3</sup>),*WM* 为区域产水模数(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

1.4 探索性时空数据分析方法

### 1.4.1 LISA 时间路径

LISA 时间路径将时间维度纳入传统的静态 LISA,使其实现了动态的连续表达,亦是 LISA 空间马尔科夫转移矩阵的一种连续表达。常用于反映地理要素的局部时空协同变化特征,揭示区域地理要素时空交互作用的程度、方向(竞合态势)以及时空依赖效应对区域系统演化的影响程度。LISA 时间路径的几何特征常用相对长度和弯曲度表示,计算公式如下:

$$Rl_{i} = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \qquad D_{i} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,T})}$$
(6)

式中, $Rl_i$ 、 $D_i$ 分别表示相对长度和弯曲度;n表示区域数量;T表示研究时间序列; $L_{i,i}$ 、 $L_{i,i+1}$ 分别表示t、t+1年份区域 i在 Moran's I散点图中的位置; $d(L_{i,i},L_{i,i+1})$ 、 $d(L_{i,i},L_{i,T})$ 分别表示区域 i从 t年移动到 t+1年、末年的距离;如果区域 i在研究时段内的移动长度超过平均水平,则 $Rl_i>1$ ,反之, $Rl_i<1$ 。 $Rl_i$ 越大,表明区域地理要素的局部空间依赖性和空间结构更具有动态性,同时也说明地理要素 Moran's I散点随时间推移,其移动路径稳定性较差; $D_i$ 越大,表明区域 i的移动路径越弯曲,反映出一个更加动态的局部空间依赖方向和更加波动的增长过程,也说明了该区域受局部结构的时空依赖影响越大,即区域 i自身受邻域空间(溢出/极化)效应影响越大,同时自身随时间推移增幅越显著或遇特殊时段波动越剧烈,反之则受到的影响越小,波动越平稳。

#### 1.4.2 LISA 时空跃迁

LISA 常被用于揭示地理要素的空间依赖特征, Rey 等在此基础上将 Moran's *I* 散点图中各空间单元在特定时间间隔内的移动距离、方向、凝聚等属性与传统马尔科夫转移矩阵相结合,提出了局部马尔科夫转移矩阵和时空跃迁,并将跃迁划分为 Type<sub>0</sub>、Type<sub>1</sub>、Type<sub>2</sub>、Type<sub>3</sub>四种类型<sup>[29]</sup>。其中 Type<sub>0</sub>型表示区域自身和邻域均不发生状态转移; Type<sub>1</sub>型表示区域自身跃迁,邻域不变,包括:高高→低高、高低→低低、低高→高高、低低→高低; Type<sub>2</sub>型表示区域自身不变,邻域发生跃迁,包括:高高→高低、高低→高高、低高→低低、低低→高高),否则称为 Type<sub>3B</sub>(包括:高低→低高、低高→高低)。Rey 将区域系统中的时空流动和凝聚来表征研究对象的空间格局路径依赖和锁定特征,计算公式如下:

$$SF = \frac{\text{Type}_1 + \text{Type}_2}{m} \qquad SC = \frac{\text{Type}_0 + \text{Type}_{3A}}{m}$$
(7)  
$$\sum P_{i,i}$$

$$p = 1 - \frac{\sum_{i} \Gamma_{i,i}}{K} \tag{8}$$

式中,*SF*、*SC*分别表示研究对象的时空流动和凝聚;Type<sub>0</sub>、Type<sub>1</sub>、Type<sub>2</sub>、和 Type<sub>3A</sub>分别表示各自的跃迁数量;*p*为相对移动率, $P_{i,i}$ 为时空跃迁矩阵对角线元素,K=4,当p=1时表示所有区域均发生状态跃迁,p=0时表示没有区域发生跃迁,p越大表明状态转移越剧烈。本文 $m=(2018-2000)\times 31=558$ 。

1.5 数据来源

本文所涉及数据均来源于 2001—2019 年《中国统计年鉴》、《中国水资源公报》、《中国环境统计年鉴》、 《中国环境统计年报》等,缺失数据由现有数据线性拟合获得。在计算水质生态足迹时,污染物排放浓度标准 采用中国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中Ⅲ类水质规定的污染物含量选取 COD 和氨氮的排放浓 度标准分别为 20 mg/L、1 mg/L。

#### 2 结果分析

2.1 中国水生态足迹及水生态承载力时空特征分析 根据相关公式计算得到 2000—2018 年中国水量生态足、水质生态足迹和水生态承载力,并绘制其变化趋 势图(图1),此外,囿于页面限制,在此仅给出水量生态足、水质生态足迹、水生态足迹和水生态承载力初期、 末期及均值,结果如图2所示。



Fig.1 Trends of water quantity ecological footprint, water quality ecological footprint and water ecological carrying capacity in China from 2000 to 2018

由图 1 可以看出,研究时段内,中国水量生态足迹与水生态足迹的变化趋势相似,均呈现波动上升的态势,年均增长率分别为 1.16%、1.11%,2012—2013 年,水量生态足迹和水生态足迹增幅最大,分别达到 12.71%、12.20%,两者均在 2013 年达到最高值。整个研究时期内,中国用水总量从 2000 年的 5497.59×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 增加至 2018 年的 6015.5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,国内生产总值年均增长率达到 12.97%,人口增加 10%以上,水足迹总量由研究初期的 9200.49×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>增加至末期的 11330.10×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,水资源消耗量与经济、人口呈现同步增长趋势,使中国水量生态足迹的变化趋势呈逐年增加态势;水质生态足迹整体呈下降态势,年均降幅为 0.41%,在水生态足迹中的占比由 2000 年的 4.2%降至末期的 3.2%。2000—2011 年水质生态足迹经历了"上升-下降-平稳-上升"的变化趋势,并在 2005 年达到最大值(74.29×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>),占比达到 4.48%,2011 年以后,水质生态足迹呈现平稳下降态势。研究期内,虽然废水排放量年均增长率超过 3%,2018 年废水排放量相比 2000 年增幅超过 70%,但工业废水排放达标率由 82.1%增加至 90%以上,废水处理率的提升以及污染物排放量的降低使灰水足迹总量呈逐年下降态势,进而使水质生态足迹总量下降,占比减少,从而也反映了中国在水生态环境保护、治理方面成效明显;除 2009 年外,2000—2010 水生态承载力变化趋势与水生态足迹呈同步变化趋势,2011—2018 年,与水生足迹呈此消彼长的变化趋势,2009 年水生态承载力为研究时期内最低值,仅 1382.214×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,该年份中国水资源总量相比研究期内平均水资源量减少 15.35%。

由图 2 可以看出,①研究时期内,水量生态足迹排名前六的省份是广东、江苏、四川、山东、河南、湖南,其 总量均超过 90×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>,其中广东最高,达到 154.10×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>,原因在于,这 5 个省份人口数量较多,经济规模 大,农业发达,致使社会经济发展过程中需水量较大,并导致水足迹总量较大,进而影响区域水量生态足迹;西 藏、青海、宁夏均地处中国西部地区,人口数量少,经济规模较小,2018 年,人口总量仅占全国总量的 1.17%, 国内生产总值占比仅为 0.89%,因此,水资源消耗量及水足迹总量较小,水量生态足迹总量均在 10×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>以 内,排在研究区域的后三位;②中国水质生态足迹均值为 68.17×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>,相关研究表明,农业面源污染及生活 废水对水生态环境的影响远大于工业废水污染,因此,兼具农业发达和人口众多两个特点的省份水质生态足 迹总量较大,如河南、四川、山东、广东、湖南、河北 6 个省份的水质生态足迹总量均在 3.5×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>,其中河南 最大,达到 5.63×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>,而农业经济占比较小,人口数量较少的省份,水质生态足迹总量较小,如北京、天津、 宁夏、海南、上海、青海 6 个省份的水质生态足迹均在 1.00×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>以内;③受降水的时空分布及地表水资源量





空间分布差异的影响,区域水资源总量及水生态承载力差异较大,整体呈现自东南向西北逐渐较少的趋势,广东、西藏、广西、湖南等11省份的水生态承载力均在200×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>以上,而地处华北和西北地区的宁夏、北京、 天津、山西、甘肃、河北6个省份的水生态承载力仅在3.00×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>以内。

2.2 中国水生态足迹广度、深度时空特征分析

根据公式相关计算得到 2000—2018 年中国水生态足广度、深度和水生态压力指数,并绘制其变化趋势图 (图 3),水生态足广度、深度和水生态压力指数研究初期、末期及均值,结果如表 1 所示。

图 3 显示,研究期内,水生态足迹广度与水生态承载力整体呈现同步的变化趋势,结合图 1 及水生态足迹 广度的取值范围可知,除 2000—2002 年、2010 年及 2016 年外,水生态足迹总量均超过水生态承载力,一方面 说明人类社会的经济发展已接近水资源可提供的流量资本上限,另一方面,自 2016 年以来,水量生态足迹与 水生态承载力呈截然相反的变化态势,说明中国水资源可提供的流量资本的上限在逐渐降低,社会经济发展 对水资源流量资本的占用将进一步加大,进而将消耗更多的水资源存量资本。2000—2018 年水生态足迹深 度与水生态压力指数呈现同步变化趋势,2011 年水生态足迹深度(1.29)与水生态压力指数(1.25)均达到最 大值,但与水生态承载力及水生态足迹广度则呈现此消彼长的变化趋势,这也进一步说明当区域水资源需求 量超过水生态承载力时,水生足迹广度下降,水资源流量资本占用达到极限,进而加大对水资源存量资本的消耗,导致区域水生态足迹深度及水生态压力持续升高。

表 1	2000—2018年中国各省份水生态足迹广	<sup>上</sup> 度、深度及水生态压力指数
-----	-----------------------	---------------------------

Table 1 Water ecological footprint size, depth and water ecological pressure in China from 2000 to 2018

		2000年			2018 年		平均值 Average			
地区 Region	水生态足 迹广度/×10 <sup>6</sup> hm <sup>2</sup> Water ecological footprint size	水生态足 迹深度 Water ecological footprint depth	水生态压力指数 Water ecological pressure index	水生态 足迹广度	水生态 足迹深度	水生态 压力指数	水生态 足迹广度	水生态 足迹深度	水生态 压力指数	
北京	0.55	31.35	30.30	1.15	25.19	24.95	0.82	29.93	29.39	
天津	0.08	164.60	157.72	0.43	53.34	52.39	0.32	66.34	64.40	
河北	2.36	26.93	25.28	2.69	34.37	33.31	2.39	33.29	31.72	
山西	1.13	27.23	26.11	1.68	23.53	22.90	1.41	24.44	23.97	
内蒙古	2.93	9.59	9.07	3.66	10.99	10.25	3.53	10.39	9.67	
辽宁	5.60	9.32	8.93	9.60	6.10	5.87	11.52	5.93	5.69	
吉林	15.94	1.72	1.60	21.77	1.51	1.43	18.21	1.80	1.68	
黑龙江	21.55	2.39	2.30	35.17	1.49	1.43	27.17	2.02	1.93	
上海	3.70	8.90	8.64	4.66	9.17	9.05	4.36	10.08	9.88	
江苏	36.87	2.95	2.87	32.52	4.13	4.05	35.98	3.65	3.56	
浙江	66.91	1.00	0.32	85.51	1.00	0.47	77.37	1.00	0.38	
安徽	73.13	1.00	0.97	94.10	1.00	0.97	76.19	1.00	0.96	
福建	52.58	1.00	0.19	65.53	1.00	0.39	58.96	1.00	0.25	
江西	59.52	1.00	0.27	69.78	1.00	0.31	62.00	1.00	0.35	
山东	9.76	10.65	10.13	13.29	9.40	9.11	10.95	11.82	11.35	
河南	32.74	2.89	2.71	16.61	6.50	6.24	18.94	5.87	5.54	
湖北	81.27	1.00	0.70	83.72	1.00	0.85	80.05	1.00	0.76	
湖南	90.90	1.00	0.29	104.55	1.00	0.44	95.32	1.00	0.32	
广东	132.97	1.00	0.37	173.10	1.00	0.41	157.73	1.00	0.39	
广西	61.46	1.00	0.21	70.64	1.00	0.21	69.31	1.00	0.20	
海南	10.69	1.00	0.10	13.04	1.00	0.13	12.62	1.00	0.15	
重庆	38.97	1.00	0.47	48.90	1.00	0.67	44.75	1.00	0.63	
四川	105.45	1.00	0.35	125.61	1.00	0.38	114.40	1.00	0.42	
贵州	40.42	1.00	0.27	39.45	1.00	0.33	41.89	1.00	0.35	
云南	49.62	1.00	0.18	54.31	1.00	0.21	53.28	1.00	0.24	
西藏	3.25	1.00	0.01	5.07	1.00	0.01	4.32	1.00	0.01	
陕西	13.83	2.33	2.23	14.48	2.89	2.78	14.84	2.50	2.39	
甘肃	1.90	14.89	14.19	3.36	9.87	9.42	2.19	14.28	13.56	
青海	5.07	1.00	0.33	6.28	1.00	0.26	5.73	1.00	0.34	
宁夏	0.02	273.85	254.50	0.05	157.52	14.81	0.03	215.51	201.00	
新疆	10.97	2.23	2.10	10.11	3.45	3.22	10.92	2.59	2.42	
Σ	1587.45	1.00	0.92	1641.11	1.18	1.14	1616.61	1.09	1.04	

本研究由于数据获取困难,尚未能统计到中国港澳台数据

结合图 2、表 1 可知,浙江、福建、江西、湖南等 15 个省份在研究期内年均水生态足迹均低于年均水生态 承载力,说明上述区域水资源流量资本的占用程度较低,水资源流量资本能够满足区域自身发展的用水需求, 无需动用存量资本,因此,水生态足迹深度均为 1;相应地,其余省份的水资源流量资本的占用已达到区域水 生态承载力的上限,因此需要动用水资源存量资本以弥补水资源流量资本的短板,致使水生态足迹深度较高, 其中北京、天津、陕西、内蒙古等 9 个省份均超过 10,而宁夏最高,达到 215.51。水生态压力指数用于反映区 域水资源生态压力的强度,进而可反映区域水资源的安全状态及可持续利用状况。结合由图 2 所得结论可 知,水生态压力指数小于 1 的区域与水生态足迹深度为 1 的区域相吻合,表明这些省份水资源供给量大于消 费量,水资源利用处于安全状态。而其余省份水生态压力指数均大于 1,其中宁夏的平均水生态压力指数最



图 3 2000—2018 年中国水生态足迹广度、深度及水生态压力指数变化趋势 Fig.3 The changing trend of the water ecological footprint size, depth and water ecological pressure in China from 2000 to 2018

高,这些省份均主要分布于黄淮海流域区、松辽流域区及西北诸河区,研究时段内,上述区域年均水资源量仅 为全国总量的17.83%,但耕地面积、人口数量、经济总量占比均超过50%,经济社会发展与区域水资源储量的 不匹配,是造成上述现象的主要原因。

2.3 中国水生态足迹与水生态压力时空动态分析

## 2.3.1 LISA 时间路径分析

根据公式(6),分别计算得到水生态足迹广度、深度及水生态压力指数的 LISA 时间路径的相对长度和弯 曲度,同时采用自然断点法均将其分为4类(高相对长度,较高相对长度,中等相对长度,低相对长度;高弯曲 度,较高弯曲度,中等弯曲度,低弯曲度),结果如图4、图5所示。



图 4 LISA 时间路径相对长度的空间分布 Fig.4 The spatial distribution of relative length of LISA time path

图 4、图 5 显示,水生态足迹广度、深度及水生态压力的相对移动长度小于均值的省份数量占比均在 50% 以上,表明三者的整体空间格局均具有较强的稳定性。①水生态足迹广度的相对移动长度高的地区主要集中 在黄淮海区、西北地区和东北地区,低值区主要分布在东南沿海地区及西南地区,原因在于受中国降水空间分 布的影响,南方地区水系发达,降水年际变化较小,水资源总量占全国水资源总量的 80%以上,产水模数较 高,进而具有较高的水生态承载力,区域水资源流量资本可以满足当地生产、生活用水需求;而西北地区、东北 地区和黄淮海区一方面在于人口众多、农业发达,地下水资源开发程度过高,另一方面在于降水年际变化较



图 5 LISA 时间路径弯曲度的空间分布 Fig.5 The spatial distribution of curvature of LISA time path

大,区域产水模数较低,致使区域水生态足迹广度的空间格局呈现较强的波动性。②虽然在时间尺度上水生态足迹深度与广度呈此消彼长的发展趋势,但由于两者均受水生态足迹总量及水生态承载力影响,而当区域水资源流量资本被占用至极限时,将会消耗存量资本以满足区域用水需求,因此,水生态足迹深度与广度的空间结构稳定的区域相吻合,同时与表1所得结果一致。③从水生态压力的相对移动长度来看,水生态压力Moran's I 散点随着时间推移其跃迁路径较为稳定。但就类型而言,低相对长度仍然集中分布于南方地区,并且与水生态足迹广度、深度移动路径长度低值区较为一致,因此,随着时间推移,南方地区更能保持区域内部结构的稳定性,而北方及西北地区则呈现较强的波动性。

中国水生态足迹广度(20.307)、深度(18.433)及水生态压力(13.579)的时间路径的平均弯曲度依次降低,表明局部空间结构在空间依赖方向上的稳定性依次加强。从空间分布来看,水生态足迹广度弯曲度的高值区主要分布在华北及西北地区,表明上述地区各省份的水生态足迹深度时空依赖效应较强,受外界影响较大,波动较为剧烈。低值区主要集中在西南及东南地区,说明空间依赖方向上的稳定性最大。水生态足迹深度的弯曲度处于中等弯曲度和低弯曲度的省份达18个,说明整体上中国水生态足迹深度呈现更加稳定的局部空间依赖方向,其中较高及高弯曲度主要分布中国西部及长江中下游地区,表明该区域水生态足迹深度在空间依赖方向上具有强波动性的特征。水生态压力时间路径的高弯曲度主要集中在湖北、安徽、江苏、上海、浙江、宁夏、甘肃及新疆等省份,表明上述地区水生态压力对其邻近省份的空间依赖方向上具有更大的波动性,同时自的水生态压力随时间推移波动越剧烈。水生态压力时间路径弯曲度处于中等及以下类型的共有19个省份,表明中国水生态压力在空间上的稳定性使得整体在空间依赖方向上的波动性相对稳定。

2.3.2 LISA 时间路径移动方向分析

LISA 时间路径移动方向可用于揭示地理要素局部空间格局变化的空间整合特性。分别对比 2000 年和 2018 年水生态足迹广度、深度和水生态压力 Moran's I 散点图的位置,计算得到各个省份水生态足迹广度、深 度和水生态压力 LISA 坐标点的移动方向,并将其分为4类,其中 0°—90°表示某区域的地理要素与其相邻区 域具有协同正向增长趋势;90°—180°和 270°—360°表示呈反向增长趋势;180°—270°表示具有协同负向增长 趋势,结果见图 6。

由图 6 可知,2000 年以来,中国水生态足迹广度、深度及水生态压力呈现协同增长的省份数量分别为 17 个、22 个、20 个,表明中国水生态足迹深度空间格局演化的空间整合性最强,水生态压力次之,水生态足迹广 度最小。其中,呈现正向协同增长的省份均为 8 个,分别占比 47%、40%和 36%,水生态足迹广度正向协同增 长省份主要集中于南方省份,反映了这些地区水生态承载力相对较高,而水生态足迹深度和水生态压力正向 协同增长区则分布于华北、西北地区,表明这些区域水资源存量资本相对不足及水资源利用处于相对不安全





状态,并呈现出明显的协同高速增长的态势;呈负向协同增长的省份的数量分别为9个、14个、12个,分别集中在水生态承载力较低西北地区、水资源存量资本相对充足及水资源利用处于相对安全状态的南方地区,整体呈现协同低速增长特征。

2.3.3 LISA 时空跃迁分析

根据 Moran's I 散点图,分别计算得到其 2000—2018 年时空跃迁概率,并利用公式(7)—(8),分别计算到 得到各要素的时空流动、时空凝聚和相对移动率,结果如表 2 所示。

	Table 2	Spatia	i-temporal	transition	probability	y matrix o	i Moran s	catter plots			
要素 Elements	<i>t/t</i> +1	HH	LH	LL	HL	类型 Type	数量 Amount	比例 Proportion	SF	SC	р
水生态足迹广度	高高	0.944	0.032	0.008	0.016	Type <sub>0</sub>	510	0.914	0.082	0.918	0.118
Water ecological footprint size	低高	0.136	0.864	0.000	0.000	$Type_1$	37	0.066			
	低低	0.000	0.000	0.940	0.060	$Type_2$	9	0.016			
	高低	0.074	0.000	0.147	0.779	Type <sub>3</sub>	2	0.004			
水生态足迹深度	高高	0.961	0.022	0.006	0.011	$Type_0$	531	0.952	0.041	0.955	0.090
Water ecological footprint depth	低高	0.121	0.828	0.051	0.000	$Type_1$	15	0.027			
	低低	0.003	0.010	0.977	0.010	$Type_2$	8	0.014			
	高低	0.000	0.083	0.042	0.875	Type <sub>3</sub>	4	0.007			
水生态压力指数	高高	0.871	0.086	0.000	0.043	$Type_0$	517	0.927	0.073	0.927	0.150
Water ecological pressure index	低高	0.107	0.804	0.089	0.000	$Type_1$	22	0.039			
	低低	0.000	0.018	0.970	0.012	$Type_2$	19	0.034			
	高低	0.108	0.000	0.135	0.757	Type <sub>3</sub>	0	0.000			

表 2 水生态足迹广度、深度及水生态压力 Moran 散点图的时空跃迁矩阵 Table 2 Spatial temporal transition probability matrix of Moran scatter plot

由表2可知,研究时期内,水生态足迹广度、深度及水生态压力最普遍的跃迁类型均为Type<sub>0</sub>型,所占比例 分别为0.914、0.952、0.927,表明多数省份在2000—2018年内均未发生显著状态转移,及Moran's I 散点处于 同一象限的概率均超过了90%。从Type<sub>3</sub>型跃迁来看,水生态足迹广度仅发生高高→低低(概率0.008),水生 态足迹深度发生高高→低低、低低→高高、高低→低高的概率分别为0.006、0.003、0.083,水生态压力则未发生 Type<sub>3</sub>型跃迁。此外,时空凝聚均超过0.9,其中水生态足迹深度最大,达到0.955,而时空流动性均未超过0.1, 说明了水生态足迹广度、深度及水生态压力的状态转移具有较强的惰性,即各要素的空间分布格局表现出较 强的路径依赖及锁定特征。从相对移动率而言,相对移动率(p)用于表征状态转移程度相对较大。整体来看, 多数省份均未发生显著的时空跃迁,一方面表明水生态足迹广度、深度及水生态压力空间分布的空间凝聚性 很强,空间格局稳定,短时期内难以改变当前的空间分布状况,另一方面也反映了中国当前水资源流量资本占 用程度高于水生态承载力的现象,水生态压力并未得到有效缓解。

#### 3 结论

(1)研究时段内,水量生态足迹与水生态足迹的变化趋势相似,均呈波动上升态势,水质生态足迹则呈逐 年下降趋势,其占比从研究初期的4.20%降至研究末期的3.20%;而受区域水资源总量禀赋差异的影响,水生 态承载力在研究期内处于波动态势,其空间分布格局整体呈现自东南向西北逐渐降低的趋势。

(2)水生态足迹广度与水生态承载力呈同步变化趋势,除个别年份外,其余年份均已接近水资源可提供的流量资本上限,其空间分布亦呈现南高北低的态势;水生态足迹深度与广度则呈现此消彼长的变化趋势,空间分布上,研究期内南方15省份的水生态足迹深度均为1,而其余省份则需要动用水资源存量资本以弥补水资源流量资本的短板。

(3)研究期内,水生态压力指数小于1的区域与水生态足迹深度为1的区域相吻合,表明这些省份水资 源利用处于安全状态,社会发展无需动用水资源存量资本;水生态压力指数大于1的区域主要分布在华北及 西北地区,水资源利用处于不安全状态。

(4)LISA 时间路径的相对长度表明,水生态足迹广度、深度及水生态压力的整体空间格局均具有较强的 稳定性;LISA 时间路径的弯曲度表明,三者的局部空间结构在空间依赖方向上的稳定性依次加强;水生态足 迹深度空间格局演化的空间整合性最强,水生态压力次之,水生态足迹广度最小,其中水生态足迹广度正向协 同增长省份主要集中于南方省份,而水生态足迹深度和水生态压力正向协同增长区则分布于华北、西北地区; 三者 Type<sub>0</sub>型跃迁比例、时空凝结均超过 0.9,时空流动性则均未超过 0.1,表明多数省份在研究时段内均未发 生显著状态转移,各要素的空间分布格局表现出较强的路径依赖及锁定特征。

本文基于 ESTDA 模型对中国水生态足迹及水生态压力的空间格局动态变化特征进行分析,但在计算水 质生态足迹时仅考虑了化学需氧量和氨氮两种污染物,而且不同的排放标准使得计算结果存在一定的出入, 未来,需要全面考虑人类生产、生活所产生的多种污染物,并结合不同的排放标准,在提升评价结果科学性的 同时开展阈值效应的研究;在利用 ESTDA 模型时采用的是对称性的空间权重矩阵,默认两个空间单元之间的 相互影响是一致的,未来有必要尝试使用非对称性的空间权重矩阵以便能更好的体现地理要素属性值的空间 异质性,进而相互验证研究结论,提高评价结果的科学性与可靠性;此外,需要在充分考虑各省份及其所在流 域的水文特征的基础上,进一步对水资源均衡因子及水资源生产能力进行修正、细化,提升评价结果的精度。

#### 参考文献(References):

- Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Borucke M, Moore D, Cranston G, Gracey K, Iha K, Larson J, Lazarus E, Morales J C, Wackernagel M, Galli A. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: the National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. Ecological Indicators, 2013, 24: 518-533.
- [3] De Alvarenga R A F, Da Silva Júnior V P, Soares S R. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. Journal of Cleaner Production, 2012, 28: 25-32.
- [4] De Benedetto L, Klemeš J. The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(10): 900-906.
- [5] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ercin A E, Weinzettel J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. Ecological Indicators, 2012, 23: 1-8.
- [6] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, Ercin E. A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy. Science of the Total Environment, 2013, 461-462; 813-818.
- [7] Wiedmann T, Barrett J. A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods. Sustainability, 2010, 2(6): 1645-1693.

- [8] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. Environment, Development and Sustainability, 2008, 10(4): 441-469.
- [9] Siche R, Pereira L, Agostinho F, Ortega E. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [10] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: the case study of Brazil. Ecological Indicators, 2012, 16: 113-127.
- [11] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? a 3D representation. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [12] Daly H E, Farley J. Ecological Economics: Principles and Applications. Washington: Island Press, 2004: 29-36.
- [13] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [14] 张恒义,刘卫东,林育欣,单娜娜,王世忠.基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析.生态学报,2009,29(5):2738-2748.
- [15] 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.
- [16] Wang H, Huang J J, Zhou H, Deng C B, Fang C L. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: a case study of Hubei Province, China. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.
- [17] 张义,张合平.基于生态系统服务的广西水生态足迹分析.生态学报,2013,33(13):4111-4124.
- [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. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80-90.
- [19] Dai D, Sun M D, Xu X Q, Lei K. Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: a case study in Zhangjiakou City, North China. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(11): 11000-11011.
- [20] Su Y, Gao W J, Guan D J, Su W C. Dynamic assessment and forecast of urban water ecological footprint based on exponential smoothing analysis. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 354-364.
- [21] 张军,张仁陟,周冬梅.基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价. 草业学报, 2012, 21(4): 267-274.
- [22] 段锦,康慕谊,江源.基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改进模型.自然资源学报,2012,27(6):953-963.
- [23] 刘子刚,郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究——以浙江省湖州市为例. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [24] 程超, 童绍玉, 彭海英, 闫少凯. 滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究. 资源科学, 2016, 38(8): 1561-1571.
- [25] 贾焰,张军,张仁陟. 2001-2011 年石羊河流域水资源生态足迹研究. 草业学报, 2016, 25(2): 10-17.
- [26] 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):7048-7060.
- [27] 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): 4596-4608.
- [28] 黄睿, 王坤, 黄震方, 陆玉麒. 绩效视角下区域旅游发展格局的时空动态及耦合关系——以泛长江三角洲为例. 地理研究, 2018, 37(5): 995-1008.
- [29] Rey S J, Janikas M V. STARS: space-time analysis of regional systems. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 67-86.
- [30] Rey S J, Murray A T, Anselin L. Visualizing regional income distribution dynamics. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81-90.
- [31] 夏四友,赵媛,文琦,许昕,崔盼盼,唐文敏.喀斯特生态脆弱区贫困化时空动态特征与影响因素——以贵州省为例.生态学报,2019, 39(18):6869-6879.
- [32] 夏四友,赵媛,许昕,文琦,宋永永,崔盼盼. 1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 7854-7865.
- [33] 范擎宇,杨山,胡信.耦合视角下长三角地区城镇化协调度的时空特征及交互机制.地理研究,2020,39(2):289-302.
- [34] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [35] 谭秀娟,郑钦玉.我国水资源生态足迹分析与预测.生态学报,2009,29(7):3559-3568.