#### DOI: 10.5846/stxb202203270749

马晓蕾,王婕,刘若男.中国"水量"和"水质"生态足迹及可持续能力量化方法与实证研究.生态学报,2023,43(9):3677-3688. Ma X L, Wang J, Liu R N.Quantitative method and empirical study on the ecological footprint of water quantity and water quality and their sustainability in China.Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3677-3688.

# 中国"水量"和"水质"生态足迹及可持续能力量化方法与实证研究

### 马晓蕾<sup>1,\*</sup>,王 婕<sup>2</sup>,刘若男<sup>2</sup>

1 淮阴师范学院城市与环境学院,淮安 223300
 2 安阳师范学院资源环境与旅游学院,安阳 455000

摘要:科学测度水资源和水环境可持续能力,对区域水资源管理具有重要意义。从"水量"和"水质"两个角度,对我国 31 个省 域地区的"水量"及"水质"生态足迹、生态承载力和生态压力指数进行研究。结果表明:(1)2000—2020 年,我国水资源生态压 力指数均小于 1,最高值为 2011 年的 0.86,总体水量供给充足,可持续能力强;万元 GDP 水量生态足迹呈波动下降趋势,用水效 率大幅度提升。(2)2000—2020 年,我国水质可持续能力均较强,处于安全和较安全状态,水质生态盈余量约 2 亿 hm<sup>2</sup>;人均水 质承载力约为人均水质生态足迹的 2 倍,且万元 GDP 产生的污水量呈下降趋势。(3)人均水量生态足迹和万元 GDP 水量生态 足迹的空间重心均位于甘肃省。水量及水质生态足迹高值区,均主要位于"胡焕庸线"西北部,而承载力高值区,主要位于青藏 高原和我国南方地区。(4)我国水量可持续能力处于安全、临界状态和不安全的地区数,分别占 55%、6%和 39%;水质可持续 能力处于安全、临界状态和不安全的地区数,分别占 61%、3%和 35%;水量及水质可持续能力较强和较弱的地区数之比,约为 6:4。研究揭示了我国水量及水质风险等级的区域差异,有助于为我国水资源管理及水污染防治提供科学依据。 关键词:水量生态足迹;水质生态足迹;生态承载力;水资源生态压力指数;水环境生态压力指数

## Quantitative method and empirical study on the ecological footprint of water quantity and water quality and their sustainability in China

MA Xiaolei<sup>1,\*</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, LIU Ruonan<sup>2</sup>

School of Urban and Environmental Sciences, Huaiyin Normal University, Huaian 223300, China
 School of Resource Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, China

**Abstract**: Scientific measurement of water resources and water environmental sustainability is of great significance to regional water management. This study evaluates ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological pressure index of "water quantity" and "water quality" in 31 provinces and regions in China. The results show that: (1) From 2000 to 2020, water resources ecological pressure index of China was less than 1, with the highest value of 0.86 which indicates water resources supply being sufficient and sustainable. Water quantity ecological footprint per ten thousand Yuan GDP showed a fluctuating downward trend and water use efficiency increased significantly. (2) From 2000 to 2020, water quality in China was relatively sustainable and in a safe state, while ecological surplus of water quality was about 200 million hm<sup>2</sup>. Per capita water quality carrying capacity is about twice the ecological footprint. And the amount of sewage generated by ten thousand yuan of GDP shows a decreasing trend. (3) Spatial centers of per capita and ten thousand GDP "water quantity" ecological footprint are both located in Gansu Province. The high value areas of water quantity and water quality ecological

收稿日期:2022-03-27; 采用日期:2022-08-17

基金项目:河南省重点研发与推广专项(222400410283)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: maxiaolei0111@163.com

footprint are mainly located in the northwest of the Huhuanyong Line, while the high value areas of water capacity are mainly located in Tibetan Plateau and southern China. (4) The proportions of areas with safe, critical and unsafe water quantity sustainability are 55%, 6% and 39%, respectively, and the numbers of areas with safe, critical and unsafe water quality sustainability account for 61%, 3% and 35%, respectively. The ratio of the number of areas with strong and weak water sustainable is about 6:4. The results reveal the regional differences in water quantity and water quality risk in China, which helps to provide a scientific basis for the utilization of water resources and water pollution prevention.

Key Words: water quantity ecological footprint; water quality ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological pressure index of water resources; ecological pressure index of water environment

水资源是人类生产和生活不可或缺的重要自然资源。随着人口增长,工业化、城镇化的快速发展,人类对 水资源的需求量呈增加趋势,并对水环境造成了一定程度的污染,水资源短缺及水污染直接影响着人民生活 和社会经济的可持续发展。我国水资源时空分布不均,人口、产业、经济水平等存在较大区域差异,使得水资 源消耗量及水污染程度也各不相同。因此,如何科学评价我国水资源量和水质条件,识别不同地区水资源可 持续利用水平,对区域水资源的优化管理具有重要科学意义。近年来,水资源生态足迹方法被广泛应用在水 资源评价及管理中,且研究不断完善和深入。生态足迹通过将资源消耗量转换成土地面积,使得人类对水资 源的利用与对其他自然资源的占用,如土地、能源等具有可比较性。

目前,关于水资源生态足迹的研究,主要涉及以下三方面:第一,基于水资源生态足迹系列模型的区域水 资源量的生态足迹研究,包括水资源生态足迹与生态承载力<sup>[1-3]</sup>、水资源生态赤字/盈亏、水资源负载或压力 指数等<sup>[4-6]</sup>。如 Wang 等<sup>[7]</sup>在水资源生态足迹模型基础上,考虑区域之间差异,将区域均衡因子和产量因子 纳入模型中,对水资源生态足迹评价方法进行改进;Su 等<sup>[8]</sup>对水资源生态足迹进行了动态评价与预测研究; 岳晨等<sup>[9]</sup>利用水资源生态足迹及水资源负载指数,通过不同部门的用水量,对北京市水资源生态承载状态进 行了评价;李雨欣等<sup>[10]</sup>基于水资源生态足迹模型及整合移动平均自回归模型,研究我国水资源承载力并预测 其变化趋势。第二,水资源三维生态足迹研究<sup>[11-13]</sup>,包括水资源生态足迹深度和水资源生态足迹广度<sup>[14]</sup>。 如,Yang 和 Cai<sup>[15]</sup>运用水资源三维生态足迹、生态压力指数以及生态经济协调指数,对关中平原城市群水资 源生态足迹与社会经济之间的关系进行研究;Hu 等<sup>[16]</sup>运用三维水资源生态足迹模型,对长江中游城市群水 资源生态足迹深度、广度及空间布局模式进行研究,并将水资源生态足迹深度划分为自然深度和附加深度; Liang 等<sup>[17]</sup>运用三维水资源生态足迹模型,对武汉市水资源可持续利用情况进行了评价。目前对水质三维生态足迹进行研究的模型较为缺乏,主要将水质生态足迹与水量生态足迹作为整体,分析区域总体水资源的三 维生态足迹。

第三,水量生态足迹与水质生态足迹(或水污染生态足迹)的相关研究<sup>[18]</sup>。王慧亮和李卓成<sup>[19]</sup>基于能值 水生态足迹方法,从淡水生态足迹、水污染生态足迹及水产品生态足迹三方面,评价区域水资源利用情况;贾 诗琪等<sup>[20]</sup>将淡水生态足迹与水污染生态足迹两部分加和,作为区域水资源生态足迹总量,分析了湖北省水生 态足迹;张倩和谢世友<sup>[21]</sup>用污水消纳所占用水资源的用地面积表示水质生态足迹,测度了重庆市水量生态足 迹和水质生态足迹,将二者之和作为水生态足迹总量;张杏梅和翟琴琴<sup>[22]</sup>测度了陕西省水质生态足迹和水量 生态足迹,以及水生态足迹与经济间的脱钩关系;Li等<sup>[23]</sup>运用水量生态足迹(Water Consumption Ecological Footprint,WCEF)以及水污染生态足迹(Water Pollution Ecological Footprint,WPEF)方法,对黄河下游流经的地 级市水资源利用情况进行评价,将水量生态足迹与水污染生态足迹之和作为水生态足迹总量,并将水生态承 载力与水生态足迹总量之差作为水生态赤字/盈余。

总体上,近年来国内外学者,对水量生态足迹和水质生态足迹的研究不断丰富和完善,已有研究大多将水 质生态足迹与水量生态足迹之和作为水生态足迹总量,然后与水生态承载力进行对比研究。但对水量生态承 载力与水质生态承载力分别进行量化的研究较少,而区域水资源供给量与能够容纳污染物的水资源量并不完 全相等,二者存在一定差异,因此对水质生态承载力进行单独量化是十分必要的,目前对水质生态承载力的定量研究较为缺乏,有待完善。综上所述,本文基于国内外已有研究成果,进一步丰富和完善水资源生态足迹评价方法,选取中国 31 个省级区域作为研究对象,运用目前研究方法已较为成熟的水量生态足迹、水资源生态承载力与水资源生态压力指数,从水量的角度评价区域水资源利用情况。同时,从水质生态足迹角度展开研究,建立水质生态足迹、水质生态承载力和水环境生态压力指数评价模型,优化水质生态足迹评价方法,揭示我国水质利用现状及可持续能力时空演变。本文研究有助于为我国水量及水质的优化管理及科学研判,提供科学依据。

#### 1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 "水量"可持续能力

水资源"量"的可持续能力,用水资源生态压力指数(Ecological Pressure Index of Water Resources, EPI<sub>WR</sub>) 进行衡量<sup>[24-26]</sup>。EPI<sub>WR</sub>等于水量生态足迹(Ecological Footprint of Water Resources, *EF*<sub>WR</sub>)除以水量生态承载力 (Ecological Capacity of Water Resources, *EC*<sub>WR</sub>),本文将 EPI<sub>WR</sub>划分为五个等级,计算公式如下:

$$EPI_{WR} = EF_{WR} / EC_{WR} \begin{cases} (0,0.5), 安全状态 \\ [0.5,0.8), 较安全状态 \\ [0.8,1], 临界状态 \\ (1,1.2], 不安全状态 \\ > 1.2, 极不安全状态 \end{cases}$$
(1)

EPI<sub>WR</sub>值越低,水量可持续能力越强。0<EPI<sub>WR</sub><0.5 时,水资源供给量远大于消耗量,处于安全状态;0.5≤ EPI<sub>WR</sub><0.8 时,水量处于较安全状态;0.8≤EPI<sub>WR</sub>≤1,水资源消耗量接近或等于最大供给量,水量处于临界状态;1<EPI<sub>WR</sub>≤1.2,水资源消耗量超过最大供给量,水量处于不安全状态;EPI<sub>WR</sub>>1.2,水量处于极不安全状态。

(1)水量生态足迹

水量生态足迹 *EF*<sub>WR</sub>(hm<sup>2</sup>)是指将社会发展、人类生存等消耗的水资源量,折算为生态生产性土地面积<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$EF_{WR} = \sum_{j=1}^{n} EF_{WR-j} = \gamma_w \times \left(\sum_{j=1}^{n} W_j / P_w\right)$$
(2)

式中:*EF*<sub>WR-j</sub>为*j*部门水资源生态足迹, *γ*<sub>w</sub>为水资源全球均衡因子, 取值 5.19<sup>[28]</sup>; *W*<sub>j</sub>(m<sup>3</sup>)为*j*部门用水量, *n*为 耗水部门总数; *P*<sub>w</sub>(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)为水资源全球平均生产能力, 等于世界可再生淡水资源量除以世界国土面积, 目 前可获取的世界最新数据为 2014年, 因此采用 2014年数据, 计算得 *P*<sub>w</sub>为 3186.36 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

(2)水量生态承载力

水量生态承载力 *EC*<sub>w</sub>(hm<sup>2</sup>)是指在扣除生态环境用水后,人类发展所能开发利用的最大水资源量对应的土地面积,通常水资源的最适宜开发利用量,不超过区域水资源总量的40%<sup>[29-30]</sup>,计算公式如下:

$$EC_{WR} = 0.4 \times \gamma_w \times \varphi \times (Q_i / P_w)$$
(3)

式中: $Q_i(m^3)$ 为研究区 *i* 水资源总量;  $\varphi$  为研究区 *i* 的水资源产量因子,计算公式见(4)和(5),  $P_i(m^3/hm^2)$ 为研究区 *i* 的水资源生产能力,等于区域水资源总量  $Q_i$ 除以研究区 *i* 计算面积  $S_i(hm^2)$ 。

$$\varphi = P_i / P_w \tag{4}$$

$$P_i = Q_i / S_i \tag{5}$$

1.1.2 "水质"可持续能力

"水质"可持续能力,也称为水环境可持续能力,用水环境生态压力指数(Ecological Pressure Index of Water Environment, EPI<sub>WE</sub>)衡量<sup>[31]</sup>。EPI<sub>WE</sub>等于区域水质生态足迹(Ecological Footprint of Water Environment,

EFwe,hm<sup>2</sup>)除以水质生态承载力(Ecological Capacity of Water Environment, ECwe, hm<sup>2</sup>),结果分为五个等级,计 算公式如下:

$$EPI_{WE} = EF_{WE} / EC_{WE} \begin{cases} (0,0.5), 安全状态 \\ [0.5,0.8), 较安全状态 \\ [0.8,1], 临界状态 \\ (1,1.2], 不安全状态 \\ > 1.2, 极不安全状态 \end{cases}$$
(6)

EPIwe值越低,水质可持续能力越强。0<EPIwe<0.5时,水质承载力远大于水质生态足迹,水环境处于安 全状态,可持续开发利用能力强;0.5≤EPIwe<0.8时,水质较安全状态,水环境可持续开发利用能力较强; 0.8≤EPIwe≤1,水质生态足迹接近或等于水环境承载力,水环境处于临界状态;1<EPIwe≤1.2,水质生态足迹 超过水环境最大承载能力,水污染较为严重,水质处于不安全状态,水环境受到威胁,需要加强水污染治理; EPIwe>1.2,表明水污染非常严重,水质处于极不安全状态,水环境可持续利用能力弱。EFwe和 ECwe计算方法 如下:

(1)水质生态足迹

水质生态足迹 EF we (或称水污染生态足迹)的量化,首先需要计算灰水足迹,然后将灰水足迹转化为土地 面积。灰水足迹指稀释水体污染物至达到环境标准,所需的淡水量<sup>[32]</sup>。水质生态足迹是将工业、农业和生活 等产生的灰水足迹(m<sup>3</sup>)换算为相应的土地面积(hm<sup>2</sup>),计算过程如下:

第一,确定水体污染源。农业使用的化肥、农药及养殖污水等是农业水污染的主要来源,通过对各类主要 污染物排放量的对比得知,氮肥是农业各类化肥施用量中最高的,而化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)是工业和生活污水排放量最大的污染物。因此,本文选取氮肥(硝酸盐)作为评价农业水质生态足迹的 指标,COD 作为评价工业和生活水质生态足迹的指标。

第二,明确水体中不同污染物的最大容许浓度。根据地表水环境标准中 III 类水质要求,地表水环境中硝 酸盐(以N计)含量上限为10mg/L(0.01kg/m<sup>3</sup>),COD 上限为20mg/L(0.02kg/m<sup>3</sup>),由此分别计算农业化肥施 用产生的硝酸盐灰水足迹 WF<sub>N-grev</sub>(m<sup>3</sup>)<sup>[33-34]</sup>,以及由 COD 产生的灰水足迹 WF<sub>COD-grev</sub>(m<sup>3</sup>),计算公式如下;

$$WF_{N-\text{grey}} = \alpha \times C_N / (C_{\text{max}-N} - C_{\text{nat}})$$
<sup>(7)</sup>

$$WF_{\rm COD-grey} = C_{\rm COD} / (C_{\rm max-COD} - C_{\rm nat})$$
(8)

式中, $\alpha(\%)$ 为氮肥淋失率,指流失到水体中的氮元素占施肥量的比例。由于  $\alpha$  值随不同区域、不同时期的降 雨量以及土壤性质的不同而变化,难以确定其具体值,本文 α 取值为 10%<sup>[35]</sup>; C<sub>N</sub>(kg) 为农业氮肥施用量,  $C_{max=N}$ 为 0.01kg/m<sup>3</sup>;  $C_{COD}$ (kg)为 COD 废水排放量,  $C_{max=COD}$ 为 0.02kg/m<sup>3</sup>,  $C_{nat}$ 为受纳水体的自然本底浓度,由于 缺少数据,取值0(kg/m<sup>3</sup>)。

第三,根据灰水足迹,计算水质生态足迹 EFwee。由上文已知水资源全球平均生产能力 Pw值为3186.36m3/  $hm^2$ ,用灰水足迹最大值除以  $P_w$ 即得  $EF_{WE}$ ,计算公式如下:

$$EF_{WE} = \max(WF_{N-\text{grey}}, WF_{\text{COD-grey}})/P_w$$
(9)

(2)水质生态承载力

水质生态承载力 ECwe(hm<sup>2</sup>),是指从区域水资源总量中,扣除区域生产生活等用水总量及 12%的用于保 护生物多样性所需的水资源量外,剩余能够接纳污染物的水资源量的生物生产性土地面积[31],计算公式 如下:

$$EF_{WE} = (1 - 12\%) \times \frac{(Q - W \times K)}{P_w}$$

$$\tag{10}$$

式中,Q(m<sup>3</sup>)为区域水资源总量,W(m<sup>3</sup>)为区域用水总量,P<sub>w</sub>含义同上;K 为区域综合耗水率,等于用水消耗量 占用水量的比例,用水消耗量指在运输、用水过程中,通过蒸腾蒸发、土壤吸收、产品吸附、居民和牲畜饮用等

43 卷

多种途径消耗掉,不能回归到地表水体和地下含水层的水量[36]。

1.1.3 标准差椭圆(方向分布)

该方法借助 ArcGIS 软件进行分析。标准差椭圆由 圆心、长短轴、旋转角度三个要素构成(图1),可以衡量 数据空间分布的重心、集聚和离散程度、方向性等特 征<sup>[37]</sup>。椭圆的圆心为算数平均中心,计算公式 如下<sup>[38-40]</sup>:

$$SDE_{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{X})^{2}}{n}}$$
(11)  
$$SDE_{y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{Y})^{2}}{n}}$$
(12)



Fig.1 Standard Deviational Ellipse components

式中,SDE<sub>x</sub>为标准差椭圆中心的 x 坐标值,SDE<sub>y</sub>为椭圆的 y 坐标值; $x_i$ 和  $y_i$ 是要素 i 的空间坐标,( $\overline{X}$ ,  $\overline{Y}$ )为要素的平均中心, n 为要素总数。

椭圆的旋转角度( $\theta$ ),等于沿正北方向顺时针旋转至椭圆 x 轴,所形成的夹角,计算公式如下:

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_{i}^{2}\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_{i}^{2}\right)^{2} + 4\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i} \bar{y}_{i}\right)^{2}}{2\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i} \bar{y}_{i}}$$
(13)

式中, $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 是要素的平均中心与XY坐标的差。

椭圆的 X 轴和 Y 轴长度计算公式如下:

$$\sigma_x = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{x}_i \cos\theta - \bar{y}_i \sin\theta)^2}{n}}$$
(14)

$$\sigma_{y} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=1} (\bar{x}_{i} \sin\theta + \bar{y}_{i} \cos\theta)^{2}}{n}}$$
(15)

1.2 数据来源

水资源总量、产水模数、氮肥施用量、总人口数据,以及农业、工业、生活、生态环境用水、耗水率 K 等数据,来源于 2000—2021 年《中国统计年鉴》、《中国水资源公报》以及各省、市、区的水资源公报。在计算水质 生态承载力时,如果仅考虑区域水资源总量,则天津市、上海市和宁夏回族自治区的结果出现负值,由于上述 地区的引水、调水量占区域供水量比重较高,起着非常重要的保障作用。因此,在计算水质生态承载力和水环 境生态压力指数时,天津市水资源总量包含引滦引黄水量,上海市水资源总量包含了太湖来水量,宁夏回族自 治区包含引扬黄河水量。除上述三个区域外,其他区域均未将引水、调水等水量来源计算在内。

#### 2 结果分析

#### 2.1 水量生态足迹与承载力时间演变

2000—2020年,中国水量生态承载力均强于水量生态足迹,处于水量生态盈余水平(图2)。水量生态承载力大致呈波动变化趋势,2016和2020年明显高于其余年份。水量生态足迹值较为稳定,略有上升,表明我国对水资源的消耗量基本处于平稳态势。此外,人均水量生态足迹和承载力变化趋势与总水量生态足迹和承载力变化相似。万元 GDP 水量生态足迹和承载力均呈明显波动下降趋势,万元 GDP 水量生态承载力由2000

年的 1.63hm<sup>2</sup>/万元,下降到 2020 年的 0.4hm<sup>2</sup>/万元,且万元 GDP 水量生态承载力明显高于其生态足迹,表明 我国水资源量盈余显著,用水效率不断提升。



图 2 2000—2020 年中国水量生态足迹(EF<sub>WR</sub>)及水量承载力(EC<sub>WR</sub>)随时间变化

Fig.2 Water quantity ecological footprint  $(EF_{WR})$  and ecological capacity of water resources  $(EC_{WR})$  change from 2000 to 2020 in China

我国水资源生态压力指数呈波动变化趋势,总体处于安全、较安全状态(图3)。其中,2016 和 2020 年水 资源生态压力指数低于 0.5,处于安全状态,可持续能力极强;仅 2011 一年处于临界状态,水量生态安全受到 威胁;其余年份均处于较安全状态,水量可持续能力较强。结果表明,2000 年来我国整体水资源供给量均较 充足,安全性较高,能够保障社会经济发展的用水需求,仅个别干旱年份,水资源量处于临界状态,需加强 防范。

#### 2.2 水质生态足迹与承载力时间演变

2000年以来,我国水质生态足迹明显低于水质生态承载力,表明水质承载力和纳污能力较强。水质承载 力大致位于 6亿—8亿 hm<sup>2</sup>之间,水质生态足迹总体低于 4亿 hm<sup>2</sup>,水质生态盈余量约 2亿 hm<sup>2</sup>。人均水质生 态承载力位于 0.5—0.6hm<sup>2</sup>之间,约为人均水质生态足迹的 2倍,水质盈余量也较高。我国万元 GDP 产生的 水质生态足迹呈波动下降趋势,由 2000年的 0.23hm<sup>2</sup>,下降到 2020年的 0.08hm<sup>2</sup>,明显低于万元 GDP 水质生 态承载力(2000年为 0.68hm<sup>2</sup>、2020年为 0.15hm<sup>2</sup>),表明我国经济增长产生的污水量不断下降,绿色经济发展 水平大幅度提升,水质承载能力强(图 4)。

我国水环境生态压力指数年际差异较大,但均低于0.71,表明水质可持续开发利用能力强(图5),总体强



图 3 中国水资源生态压力指数(EPI<sub>WR</sub>)随时间变化

Fig.3 Ecological pressure index of water resources  $(EPI_{WR})$  change from 2000 to 2020 in China

于水量可持续能力。2000年至今,我国水质一直处于安全和较安全状态,与水量可持续能力相似,水质可持续能力也在 2011年相对较弱,水环境生态压力指数达 0.71,属水质较安全状态。这主要由于 2011年我国降雨量普遍偏少,使得水资源总量低,纳污能力减弱。

2.3 水量和水质生态足迹与承载力空间格局

由图 6 可知,2005、2010、2015 和 2020 四个年份,我国人均水量生态足迹空间重心均位于甘肃省内,空间 重心位置变化较小,空间格局较为稳定,其高值区主要位于"胡焕庸线"西北部,由于该线东南部地区集聚着 我国绝大多数人口,而西北地区人口较少,因此人均水资源量相对充足,消耗量较大,水量生态足迹较高;人均 水量生态足迹中值区主要位于"秦岭——淮河"以南,即我国南方大部分地区,而低值区在空间上呈"带状"分 布,主要位于我国 400mm—800mm 等降水量线之间。人均水量生态承载力与人均水量生态足迹的空间格局 存在一定差异,青藏高原和我国南方地区水量承载能力普遍较强,北方地区除黑龙江和吉林省较高外,其他地 区均较低。人均 *EC*<sub>ww</sub>空间重心在四川和西藏之间移动,2020 年,人均 *EC*<sub>ww</sub>与人均 *EF*<sub>ww</sub>空间重心距离相差较 远,为 1024.89km,从空间布局也可看出,部分地区水量承载力与其生态足迹空间匹配度较差,如内蒙古和新 疆,水量生态承载力在全国处于较低水平,而水量生态足迹却较高;万元 GDP 水量生态足迹与其承载力的空 间重心,位于人均水量生态足迹与承载力重心的西北部,表明"胡焕庸线"西北地区的用水效率低于东南 地区。

人均水质生态足迹空间格局与水量生态足迹相似,空间重心位置由 2000 年的河南省,移动到 2020 年的 陕西省西部,可见我国西部地区人均水质生态足迹有增加趋势;黄河中下游地区、沿海地区,以及云南、四川、 青海等地人均水质生态足迹较低,其余区域较高。人均水质生态承载力较强的区域有:青藏高原地区、南方大 部分地区和黑龙江省,沿海地区由于人口密度较高,人均水质生态承载力普遍较低。从万元 GDP 水质生态足 迹看,沿海地区、以及青海、四川、云南、陕西、河南和山东较低,表明上述地区经济增长产生的水污染程度低, 用水效率高,而东北、西北和新疆、南方大部分地区(除沿海省份)的万元 GDP 水质生态足迹相对较高。与此 同时,西北和北方大部分地区,万元 GDP 水质生态承载力又较低,因此,更可能加重区域水污染,使得水质可 持续能力减弱,水质生态承载力较强的区域,主要位于青藏高原、云贵高原和四川盆地,以及黑龙江和江西省。

总体上,我国人均和万元 GDP 的水量和水质足迹高值区,均主要位于西北干旱区、东北、西藏和南方部分 地区,各自的空间重心分布位置相对稳定,变化不大。水量和水质承载力较强的地区,主要位于青藏高原和我 国秦岭、淮河以南的大部分区域,而沿海地区人均及万元 GDP 水质承载力相对较低,这与其人口密度较大关 系紧密。此外,水量及水质的空间重心位置也较为稳定,变化幅度小,水量重心主要位于西藏东部,水质重心





在西藏和青海交界处移动。2020年,人均水量生态承载力高于 0.66 hm<sup>2</sup>的地区数,所占比重为 58%;人均水 质承载力高于 0.65 hm<sup>2</sup>的地区数所占比重为 35%,低于水量生态承载力所占比重,说明我国水质承载力空间 差异大,今后生产和生活中,要注意加强水污染的防治。

2.4 我国水量和水质可持续能力省域差异

我国省级区域 2005、2010、2015 和 2020 四个年份水量和水质可持续能力情况见表 1。不同地区的水量和 水质可持续能力相对较为稳定。四个年份中:水量和水质均处于极不安全状态的地区有 7 个,分别是京津冀地 区、山西、江苏、山东和宁夏;仅水量处于极不安全状态的地区有 3 个,分别是内蒙古、甘肃和新疆;上海市水质处 于不安全或极不安全状态。除上述地区外,其余地区水量和水质的可持续能力处于变化态势,总体较安全。

从 2020 年,水量可持续能力结果看,31 个省域地区中,处于安全和较安全的地区有 17 个,处于临界状态 的有 2 个,处于不安全和极不安全的有 12 个,分别占 55%、6%和 39%;从水质可持续能力结果看,处于安全和 较安全的地区有 19 个,临界的 1 个,不安全和极不安全的有 11 个,分别占 61%、3%和 35%。由此可见,我国 水资源可持续能力较好和较差的地区数之比,约为 6:4,即多数地区水资源和水环境可持续能力较好,但少数 区域面临着较为严峻的水资源和水环境不可持续发展的挑战,承载力尚有待提高,亟待解决。





Fig.5 Ecological pressure index of water environment  $(EPI_{WE})$  change from 2000 to 2020 in China

主 1	# 모 르	~ 步度可持续能力反抗关电及甘本心
衣I	找闫小里、	小贝り付线能力区域左开及共变化

Table 1 Regional differences and changes of water quantity and water quality sustainability in China

	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年		
省\市\区 Region	水质可 持续能力 (EPI <sub>WE</sub> )	水量可 持续能力 (EPI <sub>WR</sub> )	2020 平水重+水质可持续能力 2020 Water Quantity and Water Quality Sustainability						
北京	15.67	8.39	11.76	8.62	13.76	6.95	8.56	7.97	水量+水质极不安全
天津	19.43	7.85	34.17	7.19	12.34	4.54	9.76	4.45	水量+水质极不安全
河北	13.59	16.69	8.12	15.03	19.23	15.36	15.21	12.77	水量+水质极不安全
山西	4.03	9.83	3.28	9.51	4.20	10.40	4.69	6.83	水量+水质极不安全
内蒙古	0.46	7.91	0.54	11.36	1.08	6.07	1.01	7.05	水量极不安全+水质不安全
辽宁	1.19	1.10	0.58	0.46	6.44	5.18	2.16	0.97	水量临界状态+水质极不安全
吉林	0.46	0.47	0.32	0.38	1.59	1.81	0.62	0.51	水量+水质较安全
黑龙江	0.48	1.84	0.37	1.67	1.28	2.01	0.70	0.58	水量+水质较安全
上海	2.23	0.31	1.06	0.19	14.04	1.28	5.98	1.43	水量+水质极不安全
江苏	2.87	2.04	5.02	3.21	2.25	1.45	2.86	1.65	水量+水质极不安全
浙江	0.37	0.17	0.21	0.09	0.30	0.08	0.32	0.13	水量+水质安全
安徽	0.41	0.45	0.31	0.38	0.65	0.38	0.59	0.18	水量安全+水质较安全
福建	0.17	0.09	0.14	0.07	0.28	0.11	0.53	0.31	水量安全+水质较安全
江西	0.19	0.12	0.11	0.06	0.22	0.08	0.37	0.11	水量+水质安全
山东	1.44	1.53	1.87	2.93	17.96	9.44	3.39	1.99	水量+水质极不安全
河南	0.90	0.84	0.86	1.04	4.32	3.59	2.90	1.89	水量+水质极不安全
湖北	0.44	0.43	0.29	0.26	0.65	0.43	0.54	0.13	水量安全+水质较安全
湖南	0.34	0.20	0.26	0.15	0.39	0.15	0.43	0.11	水量+水质安全
广东	0.40	0.22	0.28	0.17	0.54	0.17	0.65	0.22	水量安全+水质较安全
广西	0.39	0.20	0.32	0.17	0.18	0.10	0.30	0.11	水量+水质安全
海南	0.19	0.13	0.11	0.05	0.61	0.33	0.41	0.18	水量+水质安全
重庆	0.32	0.18	0.32	0.26	0.52	0.25	0.25	0.08	水量+水质安全
四川	0.16	0.10	0.17	0.13	0.32	0.21	0.24	0.09	水量+水质安全
贵州	0.16	0.20	0.13	0.16	0.16	0.10	0.52	0.07	水量安全+水质较安全
云南	0.09	0.14	0.08	0.12	0.16	0.13	0.23	0.15	水量+水质安全
西藏	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.07	0.01	水量+水质安全
陕西	0.44	0.54	0.38	0.53	0.98	1.34	0.75	0.84	水量临界状态+水质较安全
甘肃	0.51	5.74	0.63	8.92	2.09	14.89	0.97	2.24	水量极不安全+水质临界状态
青海	0.05	0.23	0.07	0.32	0.10	0.44	0.05	0.14	水量+水质安全
宁夏	2.08	6.51	1.95	7.01	3.61	7.34	3.60	5.32	水量+水质极不安全
新疆	0.22	7.25	0.20	5.71	0.61	8.82	0.79	11.76	水量极不安全+水质较安全

本研究尚缺中国港澳台统计数据



图 6 2020年中国水量和水质生态足迹及承载力空间格局及重心变化

Fig.6 Spatial patterns and centers change of water quantity & water quality ecological footprint and carrying capacity of China in 2020

#### 3 结论与讨论

(1)2000—2020年,全国总体水量生态足迹及人均水量生态足迹,呈平稳态势,变化幅度小;万元 GDP 水

量生态足迹呈明显逐年下降趋势,水资源利用的经济效率不断提高。全国水量生态承载力呈波动变化趋势, 大致约为水量生态足迹的2倍,总体水资源量充足,水量可持续能力强,全国水资源生态压力指数低于0.86, 水量供给稳定。

(2)2000—2020年,我国总体水质生态承载力及人均水质生态承载力,均处于波动变化趋势,明显高于水质生态足迹,总体处于水质安全状态。我国经济增长产生的水污染量不断下降,用水效率不断提高,万元 GDP 的水质生态足迹处于明显下降趋势。水质可持续能力呈阶段性变化:2000—2010年(0.3—0.4之间),处于安全状态,2011—2015年(0.5—0.7之间)处于较安全状态,2016—2019年处于安全状态(0.1—0.2之间), 2020年为0.51,较安全状态,即呈"安全-较安全-安全-较安全"的波动变化趋势。

(3)从空间格局看,水质/水量生态足迹与水质/水量的生态承载力的空间协调性有待提高。我国水质和 水量生态足迹空间重心位置较为稳定,均大致在黄河流域上、中游省份交界处,而水质和水量生态承载力的空 间重心,则主要位于西藏地区,与生态足迹空间重心距离相差较远,二者的空间匹配度有待提升。

(4)我国水量和水质可持续能力区域差异大,但大多处于水量和水质安全状态。此外,水质和水量不可 持续的现象空间耦合度高,即往往发生在同一地区,例如北京、河北、天津、陕西和新疆等,上述地区水质和水 量均处于极不安全状态,水资源可持续利用面临着严峻威胁和挑战,急需解决。

本文建立和完善了水质生态足迹及其可持续能力的量化方法,区分水量生态承载力与水质生态承载力在 测算方法上的理论差异,对二者分别进行测度,并建立水环境生态压力指数,使得对区域水资源的评价,能够 从水质和水量两个角度分别展开,补充和完善了已有评价方法。本文结果与已有研究结果相比既有相似之处 但也存在差异,相似之处主要体现在:均得出北京、天津和河北等地水生态压力在全国处于较高水平的结 论<sup>[25]</sup>;不同之处在于,本文对资源型缺水地区,如宁夏和天津等需主要依靠水利工程满足当地水资源需求的 区域,在计算过程中,将引水、调水量等纳入到水资源总量中,使得结果更符合区域发展实际。不足之处在于, 在计算灰水足迹时,本文的氮肥淋失率全国采用相同标准,但实际上不同省域之间的农业氮肥淋失率存在一 定差异。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.自然资源学报,2021,36(11):2811-2824.
- [2] 夏军, 刁艺璇, 佘敦先, 李森, 张勇奋, 丁文璐, 姚成慧, 刘昭. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析. 水资源保护, 2022, 38 (3): 1-8.
- [3] 邵骏,卢满生,杜涛,王政祥.长江流域水资源生态足迹及其驱动因素.长江科学院院报,2021,38(12):19-24,32-32.
- [4] 李菲,张小平.甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征.干旱区地理,2020,43(6):1486-1495.
- [5] 朱正如, 湛雅琪, 曹永强, 姜俊超. 辽宁省水资源生态足迹时空特征及其影响因素分析. 长江科学院院报: 1-7. [2022-05-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220421.1715.002.html
- [6] 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. 水土保持学报, 2021, 35(4): 165-171.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 岳晨,刘峰,杨柳,高昀,郭斯嘉.北京市 2010—2019 年水资源生态足迹和生态承载力.水土保持通报,2021,41(3):291-295, 304-304.
- [10] 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. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1574-1584.
- [11] Chen Y Z, Lu H W, Yan P D, Yang Y Y, Li J, Xia J. Analysis of water-carbon-ecological footprints and resource-environment pressure in the Triangle of Central China. Ecological Indicators, 2021, 125: 107448.
- [12] 岳晨, 钱永, 崔向向, 王春晓, 刘峰, 郭斯嘉. 福建省 2010—2019 年水资源生态足迹与生态承载力. 水土保持通报, 2021, 41(6): 282-287.
- [13] Li P H, Zhang R Q, Xu L P. Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers: a case study of Urumqi.

Ecological Indicators, 2021, 131: 108117.

- [14] 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.
- [15] Yang Y, Cai Z X. Ecological security assessment of the Guanzhong Plain urban agglomeration based on an adapted ecological footprint model. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 120973.
- [16] Hu M H, Yuan J H, Chen L. Water ecological footprint size, depth and its spatial pattern correlation in the "Four-city Area in Middle China". Ecological Indicators, 2021, 133: 108387.
- [17] Liang D Z, Lu H W, Feng L Y, Qiu L H, He L. Assessment of the sustainable utilization level of water resources in the Wuhan metropolitan area based on a three-dimensional water ecological footprint model. Water, 2021, 13(24): 3505.
- [18] 陶倩君, 郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素. 水资源保护, 2018, 34(2): 28-33.
- [19] 王慧亮,李卓成.基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价.水资源保护,2022,38(1):147-152.
- [20] 贾诗琪, 张鑫, 彭辉, 黄亚杰. 湖北省水生态足迹时空动态分析. 长江科学院院报, 2022, 39(3): 27-32, 37-37.
- [21] 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. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 93-100.
- [22] 张杏梅, 翟琴琴. 基于水资源生态足迹的陕西省水资源利用与经济增长的脱钩分析. 中国农村水利水电, 2021, (10): 21-26.
- [23] Li H, Zhao F, Li C H, Yi Y J, Bu J H, Wang X, Liu Q, Shu A P. An improved ecological footprint method for water resources utilization assessment in the cities. Water, 2020, 12(2): 503.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 安慧, 范历娟, 吴海林, 杨雯晶. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1076-1087.
- [27] 廖洪泉,李朝远. 生态生产力与西部民族地区经济发展——基于新结构经济学的视角. 生态经济, 2014, 30(9): 91-95, 99-99.
- [28] 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.
- [29] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3157-3163.
- [30] 贾陈忠, 乔扬源, 关格格, 赵凯丽. 山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素. 水土保持研究, 2019, 26(2): 370-376.
- [31] 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.
- [32] 李胜楠, 王远, 罗进, 蒋培培, 陈华阳. 福建省灰水足迹时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(21): 7952-7965.
- [33] 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): 6314-6325.
- [34] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169-1178.
- [35] Wang W W, Wang J G, Cao X C. Water use efficiency and sensitivity assessment for agricultural production system from the water footprint perspective. Sustainability, 2020, 12(22): 9665.
- [36] 中华人民共和国水利部. 2020年中国水资源公报. (2021-07-09). http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/120210709\_1528208.html.
- [37] 马晓蕾. 吉林省农作物虚拟水时间演化与空间重构研究. 水土保持研究, 2022, 29(2): 304-312, 329-329.
- [38] 左岍,周勇,李晴,王丽.鄂西南地区土地利用格局时空变化及轨迹特征分析.水土保持学报,2022,36(1):161-169.
- [39] 吴海中,吴新民,陈保平.安徽省茶叶生产时空集聚演变及驱动因素研究.中国农业资源与区划:1-11.[2022-03-21].https://kns.cnki. net/kcms/detail/detail.aspx? dbcode = CAPJ&dbname = CAPJLAST&filename = ZGNZ2021112900A&uniplatform = NZKPT&v = lXP1LDpk\_ N3IpffMeiMix9yU0kQQYpYm8NBexSYrOErWqc5DUrubBH5j3ucSWCuT.
- [40] Esri. 方向分布(标准差椭圆)的工作原理—帮助 | ArcGIS Desktop. [2022-03-20]. https://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/10.3/tools/ spatial-statistics-toolbox/h-how-directional-distribution-standard-deviationa.htm.