

基于水足迹理论的舟山群岛新区水资源评价

余凤荣, 赵春芳, 童亿勤*, 童 晨, 朱兆红

(宁波大学 宁波大学昂热大学联合学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于水足迹理论, 计算舟山群岛新区水足迹各组成部分, 分析水资源利用状况, 并从水足迹结构、效益、安全性和可持续性4个方面进行评价. 结果表明: 2010~2014年舟山群岛新区水足迹值为 $3.58 \times 10^8 \sim 3.84 \times 10^8 \text{ m}^3$, 呈波动上升趋势; 其中工业水足迹均值为 $5.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 整体在均值上下波动; 生活水足迹均值为 $0.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 有缓慢增长趋势; 其他水足迹表现为下降态势; 农业水足迹在1995~2014年整体较为稳定, 2006年后呈下降趋势. 舟山群岛新区水资源自给能力低, 对外依赖度偏高; 水资源产生的经济效益持续增加, 对其他地区影响显著; 生态安全程度不高, 且缺乏稳定性, 可持续利用能力弱.

关键词: 水足迹; 虚拟水; 水资源评价; 可持续性; 舟山群岛新区

中图分类号: K901; X824

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0109-07

当前我国水资源供需矛盾突出, 面临着数量和质量的双重问题^[1]. 十九大报告对水资源的高效利用和节约保护提出了更高要求^[2], 如何提高水资源利用效率, 实现区域可持续发展, 已成为学界关注的焦点^[3]. 2002年, Arjen教授提出了水足迹概念, 用来表示个体、区域或国家在生产及消费过程中所消耗的水资源总和^[4]. 在传统水资源测量注重实体水的基础上, 水足迹更加关注虚拟水(产品和服务中隐含的水资源)^[5]. 与传统的水资源研究相比, 水足迹评估更加综合、全面地体现了水资源时空特征、影响方式及强度^[6], 更加合理地展示了人类生产、生活与水资源之间的关系^[7]. 水足迹方法提出后, 引起了众多学者的关注, Mekonnen等^[8-9]对全球尺度的小麦和畜产品水足迹进行了核算; 田园宏等^[10]和虞炜等^[11]分别研究了中国主要粮食作物和畜牧业水足迹; 孙才志等^[12]分析了中国区际间的虚拟水状况; 此外, 还有大量流域尺度和省、市的水足迹研究成果^[13-16]. 但针对海岛地区水足迹的研究较为鲜见.

舟山群岛位于浙江省北部东海海域, 是中国沿海岛屿数量最多、陆域面积最大的群岛. 2011年

国务院批准设立浙江舟山群岛新区, 至2014年末, 舟山群岛新区实现地区生产总值1015.26亿元, 常住人口114.6万人, 城镇化率66.3%. 舟山群岛新区是典型的资源型缺水地区, 随着其经济的加快发展, 水资源安全面临更高要求.

本文运用水足迹方法, 计算舟山群岛新区农作物水足迹核算系数(单位质量虚拟水含量), 深入分析了农作物水足迹内部结构, 计算了农业、工业、生活和其他方面的水足迹. 基于水足迹理论的评价体系, 科学审视了舟山群岛新区的水资源状况, 旨在为深入认识该地区水资源问题, 及时调整其产业结构, 实现区域可持续发展提供参考.

1 理论与方法

1.1 水足迹理论与方法

1.1.1 区域水足迹

区域水足迹 W_F 的计算公式为^[17]:

$$W_F = P_{vw} + R_w + E_{nv} + N_{vwi},$$

式中: P_{vw} 为产品含有的虚拟水量; R_w 为统计区内实际生活中所消耗的实体水量; E_{nv} 为其他用水量; N_{vwi} 为净进口虚拟水量.

收稿日期: 2019-05-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省社科规划重点课题(15JDHY01YB); 浙江省省级公益技术应用研究计划项目(2016C33021).

第一作者: 余凤荣(1993-), 女, 湖北恩施人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 区域发展. E-mail: 2727470200@qq.com

*通信作者: 童亿勤(1962-), 男, 浙江宁波人, 高级实验师, 主要研究方向: 区域资源环境与可持续发展. E-mail: tongyqnb@163.com

此外,区域水足迹还等于区域内外部水足迹总量^[17].本文采用区域内外部水足迹之和的方法.

1.1.2 区域内部水足迹

区域内部水足迹 I_{WF} 是指该区生产和消费水资源的总量,其计算公式为:

$$I_{WF} = A_{WU} + I_{WU} + D_{WU} + E_{WW} - V_{WE},$$

式中: A_{WU} 为农业用水; I_{WU} 为工业用水; D_{WU} 为居民生活用水; E_{WW} 为其他用水; V_{WE} 为该区出口的虚拟水^[17].

由于出口的虚拟水 V_{WE} 相关数据难以获取,故采用文献[18]的估算方法:

$$V_{WE} = E_V / G_{GDP} \times W_C,$$

式中: E_V 为出口贸易值; G_{GDP} 为生产总值; W_C 为总生产耗水量; E_V 和 G_{GDP} 数据来自《舟山统计年鉴》, W_C 数据来自《浙江省水资源公报》.

1.1.3 外部水足迹

外部水足迹 E_{WF} 是指在本区域外部生产,通过贸易进入本区域,并在本区域消费的产品所含有的虚拟水量,其计算公式为:

$$E_{WF} = V_{WI} - W_{VE},$$

式中: V_{WI} 为进口的虚拟水总量; W_{VE} 为进口产品中尚未消耗并再次被出口的虚拟水量.

因实际统计中 W_{VE} 难以获取,故用进口虚拟水量代替外部水足迹^[18].

$$V_{WI} = I_V / G_{GDP} \times W_C,$$

式中: I_V 为进口贸易值; W_C 为总生产耗水量.

1.1.4 水足迹强度

水足迹强度 W_{FI} 表示经济增长对水资源的消耗程度,是指区域水足迹与生产总值的比值,与水资源利用效率呈负相关^[9],可用万元 GDP 消耗的水资源量表示,其公式为:

$$W_{FI} = W_F / G_{GDP}.$$

1.2 虚拟水量化

1.2.1 农作物产品虚拟水量化

作物产品虚拟水含量为生长需水量除以单产值,表示单位质量生产所用水资源量.在自然气候条件下,其计算公式为^[17]:

$$V_Z = W_Z / Y_Z,$$

式中: V_Z 为作物Z虚拟水含量, $m^3 \cdot t^{-1}$; W_Z 为作物Z需水量, $m^3 \cdot hm^{-2}$; Y_Z 为单产值, $t \cdot hm^{-2}$.

$$W_Z = E_{TZ} = E_{TO} \times K_Z,$$

式中: E_{TZ} 为作物Z在生长期内的水资源蒸发总量; K_Z 为作物系数; E_{TO} 为实际测定的参考作物蒸发量(前提是保证水源充足),其计算公式为:

$$E_{TO} = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 - 0.3U_2)},$$

式中: R_n 为该农作物自身净辐射, $MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$; G 为该植物生长土壤中热通量, $MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$; γ 为干湿湿度, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$; T 为平均气温, $^\circ C$; U_2 为作物生长环境的风速(高程 2 m 处的值), $m \cdot s^{-1}$; e_a 为饱和水汽压, kPa ; e_d 为实测水汽压, kPa ; Δ 为 e_a 与 T 比值.

1.2.2 畜产品虚拟水量化

畜牧业消耗的虚拟水量一般是动物在生命周期中必须的水资源消耗量以及加工畜牧产品过程中的水资源损耗量.不同动物的生命活动、生理条件不同,故其所耗去的虚拟水量也不同;畜产品不同程度的再加工,消耗的水量也不相同^[19].

1.2.3 工业产品虚拟水量化

工业产品虚拟水是该产品在生产过程中的用水总量,主要由原料虚拟水和生产线耗水两部分产生^[4].不同企业生产同种产品,其虚拟水含量不一定相同.工业产品虚拟水一般采用估算的方法.

1.3 农作物虚拟水含量计算

采用 Cropwat 8.0 软件模拟实际作物的发育过程,通过模拟得到作物的需水量.应用定海区观测站数据,计算得到舟山群岛新区主要农作物需水量(单位: $m^3 \cdot hm^{-2}$): 大麦 1571, 棉花 6229, 玉米 4025, 薯类 3228, 豆类 1773, 早稻 4813, 晚稻 5999, 蔬菜 2370, 小麦 4430, 油料作物 4351. 水稻需水量取早、晚稻均值 $5406 m^3 \cdot hm^{-2}$. 结合舟山群岛新区 1995~2014 年相关数据、各种作物实际产值及总种植范围,计算得出 20 年间农作物的平均虚拟水含量(单位: $m^3 \cdot kg^{-1}$): 小麦 1.194, 玉米 0.925, 水稻 0.852, 豆类 0.895, 薯类 0.551, 油料 2.162, 棉花 6.938, 蔬菜 0.127, 大麦 0.535. 此外,根据孙才志等^[20]研究成果,取茶叶、水果单位质量虚拟水含量分别为 0.46 、 $16.04 m^3 \cdot kg^{-1}$.

1.4 畜产品虚拟水以及工业、生活和其他用水计算

采用文献[21]研究数据作为畜产品单位质量虚拟水含量.工业产品虚拟水含量因影响因素众

多, 数据获取困难, 故采用统计数据中的工业用水量替代. 生活和其他用水等也以实体水替代, 直接采用文献[22]的统计数据.

2 结果分析

2.1 农业水足迹分析

2.1.1 农作物水足迹结构

农作物水足迹结构如图 1 所示. 从图 1 可知, 粮食、水果水足迹变化较大, 其他作物水足迹相对稳定; 粮食作物水足迹整体呈下降趋势, 1998~2005 年下降尤为明显; 水果水足迹呈上升趋势, 并在 2007 年超过粮食作物水足迹. 经计算, 茶叶水足迹在 $0.13\times 10^8\sim 0.29\times 10^8\text{ m}^3$ 之间波动, 变化最小, 棉花次之. 出现这些变化与相关政策的实施、作物产量以及技术应用直接相关, 也体现了该地区居民饮食结构的日益多样化.

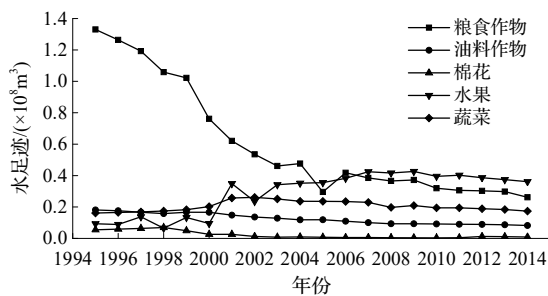


图 1 1995~2014 年舟山群岛新区农作物水足迹结构

粮食作物水足迹结构如图 2 所示. 从图 2 可知, 水稻水足迹最大, 且呈明显下降趋势; 玉米、豆类和薯类水足迹居中; 小麦和大麦水足迹最小. 自 2013 年后, 舟山群岛新区旱粮作物种植增加较快, 使粮食作物的水足迹明显下降, 可见农业水足迹的大小受作物水足迹的内部结构影响较大.

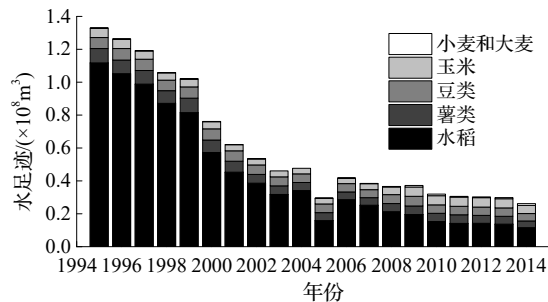


图 2 1995~2014 年舟山群岛新区粮食作物水足迹结构

2.1.2 畜产品水足迹结构

舟山群岛新区 7 类主要畜产品的产量来自从

1996~2015 年《舟山统计年鉴》, 根据文献[20,23], 结合人口总量, 经计算畜产品相关水足迹见表 1.

表 1 1995~2014 年舟山群岛新区主要畜产品

水足迹及人均畜产品水足迹								10^8 m^3
年	猪	羊	牛	奶	禽	禽	淡水	人均畜
份	肉	肉	肉	类	肉	蛋	品	产品
1995	0.293	0.030	0.008	0.016	0.090	0.720	0.070	1.248 $\times 10^{-6}$
1996	0.300	0.030	0.004	0.011	0.072	0.595	0.092	1.122 $\times 10^{-6}$
1997	0.273	0.034	0.009	0.013	0.065	0.544	0.126	1.080 $\times 10^{-6}$
1998	0.317	0.033	0.006	0.014	0.074	0.552	0.119	1.132 $\times 10^{-6}$
1999	0.340	0.036	0.008	0.014	0.083	0.530	0.141	1.170 $\times 10^{-6}$
2000	0.334	0.039	0.012	0.017	0.098	0.623	0.218	1.363 $\times 10^{-6}$
2001	0.367	0.046	0.013	0.031	0.088	0.585	0.295	1.454 $\times 10^{-6}$
2002	0.411	0.043	0.007	0.038	0.079	0.634	0.344	1.593 $\times 10^{-6}$
2003	0.476	0.052	0.010	0.060	0.090	0.562	0.376	1.674 $\times 10^{-6}$
2004	0.459	0.053	0.011	0.076	0.090	0.659	0.399	1.803 $\times 10^{-6}$
2005	0.569	0.052	0.009	0.035	0.100	0.720	0.422	1.971 $\times 10^{-6}$
2006	0.581	0.046	0.008	0.034	0.128	0.763	0.445	2.077 $\times 10^{-6}$
2007	0.587	0.048	0.008	0.020	0.114	0.698	0.450	1.992 $\times 10^{-6}$
2008	0.585	0.048	0.011	0.013	0.119	0.632	0.433	1.903 $\times 10^{-6}$
2009	0.631	0.048	0.007	0.010	0.099	0.659	0.422	1.939 $\times 10^{-6}$
2010	0.707	0.052	0.010	0.013	0.103	0.571	0.447	1.966 $\times 10^{-6}$
2011	0.671	0.044	0.007	0.009	0.095	0.550	0.434	1.867 $\times 10^{-6}$
2012	0.673	0.045	0.008	0.008	0.103	0.530	0.509	1.931 $\times 10^{-6}$
2013	0.613	0.046	0.017	0.007	0.093	0.424	0.446	1.692 $\times 10^{-6}$
2014	0.664	0.047	0.015	0.007	0.082	0.442	0.390	1.689 $\times 10^{-6}$

从表 1 可知, 四大类畜产品中猪肉产量最大, 水足迹也最高; 牛羊肉虽产量最低, 但单位质量虚拟水含量较高, 使其水足迹并非始终最低. 1995~2014 年猪肉和淡水产品的水足迹整体呈上升趋势, 平均每年分别增长 6.35%、23.01%. 禽蛋水足迹波动较大, 2006 年最高, 2013 年最低, 最高值与最低值比约 1.80. 20 年间禽肉水足迹一直处于较高水平, 牛肉水足迹处于较低水平, 奶类水足迹和羊肉水足迹处于中间水平, 其中羊肉水足迹最为稳定. 畜产品 20 年间水足迹均值为 $1.59\times 10^8\text{ m}^3$, 人均畜产品水足迹均值为 163.31 m^3 , 且整体均呈波动上升趋势, 两者各阶段变化趋势相似.

2.1.3 农业水足迹演变趋势

1995~2014 年间, 舟山群岛新区农业水足迹整体较为稳定, 2006 年后有下降趋势(图 3). 1995~2000 年, 农作物水足迹不断下降, 畜产品水足迹不

断上升,二者差距逐渐缩小,但后者一直低于前者;2000~2014年间,农作物水足迹缓慢下降,畜产品水足迹由显著增加逐渐趋于平稳,导致二者之间的差距逐渐拉大后缓慢趋于平稳.作为农业水足迹内部的两大结构,此二者的变化会引起整个农业水足迹的波动,并影响整体稳定性.

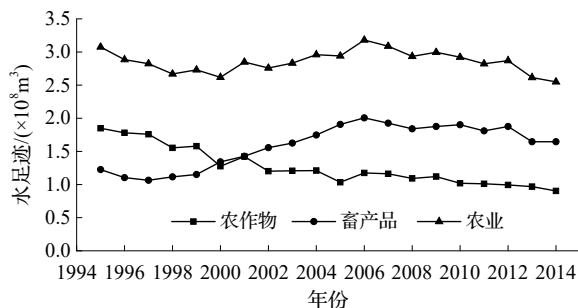


图3 1995~2014年舟山群岛新区农业水足迹结构

2.2 工业、生活及其他水足迹分析

2010~2014年舟山群岛新区工业、生活和其他水足迹数据来自2011~2015年《舟山统计年鉴》和《浙江省水资源公报》.经计算其水足迹见表2.

表2 2010~2014年舟山群岛新区工业、生活及其他水足迹 10^8 m^3

年份	工业	人均工业	生活	人均生活	其他	人均其他
2010	0.46	47.53×10^{-8}	0.57	58.90×10^{-8}	0.08	8.27×10^{-8}
2011	0.52	53.62×10^{-8}	0.58	59.80×10^{-8}	0.08	8.25×10^{-8}
2012	0.56	57.63×10^{-8}	0.60	61.74×10^{-8}	0.07	7.20×10^{-8}
2013	0.57	58.58×10^{-8}	0.62	63.72×10^{-8}	0.07	7.19×10^{-8}
2014	0.56	57.44×10^{-8}	0.66	67.70×10^{-8}	0	0

2010~2014年,工业和人均工业水足迹呈波动变化,生活和人均生活水足迹缓慢上升,其他和人均其他水足迹呈下降趋势.工业水足迹变化较小,均值为 $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,2012年以来工业水足迹值始终高于 $0.55 \times 10^8 \text{ m}^3$,表明舟山群岛新区工业对水资源的需求逐渐增加;人均工业水足迹较低,均值为 54.96 m^3 ,呈波动变化趋势.生活水足迹和人均生活水足迹均呈增长趋势,这在一定程度上表明生活用水保障正在逐渐提高.

2.3 水足迹演化分析

2.3.1 水足迹总量演化

除2012年略有下降外,2010~2014年舟山群岛新区水足迹呈缓慢上升趋势(图4).在各组分中,其他用水水足迹最低,工业水足迹与生活水足迹较

为接近,畜产品水足迹最高,农作物水足迹次之.

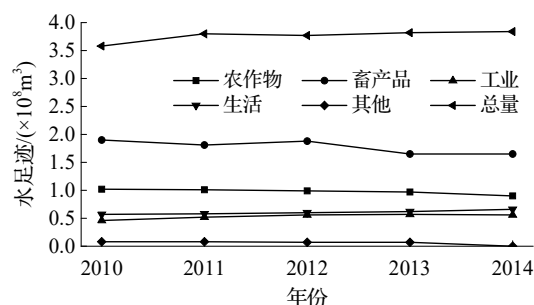


图4 2010~2014年舟山群岛新区水足迹

对比农作物与畜产品的水足迹,前者年际差别小,后者波动较大,这主要是因为市场对畜产品影响较大.由于经济整体发展,工业水足迹整体稳定;而生活水足迹随着人口增加生活用水总量不断上升;其他用水主要包括生态环境、城镇公共用水等,随着城镇化加速和对生态环境的重视程度加强,使得水资源使用量随之增加.

2.3.2 水足迹强度与人均水足迹演化

水足迹强度反映了经济增长对水资源的消耗程度,其值越高表示水资源的利用率越低(图5).

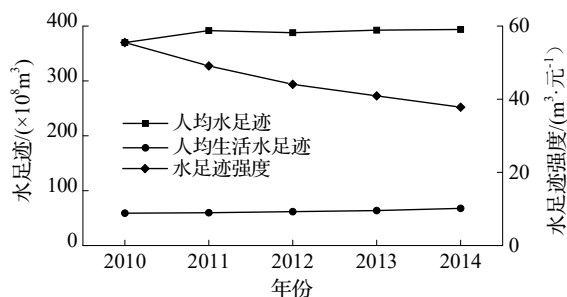


图5 2010~2014年舟山群岛新区人均水足迹与水足迹强度

从图5可知,水足迹强度呈下降趋势,由2010年 $55.50 \text{ m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ 下降至2014年 $37.82 \text{ m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$,年均降速6.37%.其中2010~2011年下降了 $6.39 \text{ m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$,降幅最大,达11.51%,为水资源利用效率提高程度最为显著的年份.

人均水足迹是区域水足迹与总人口的比值,反映区域个人消费水足迹的平均水平.2010~2014年舟山群岛新区人均水足迹呈上下波动,均值为 387.24 m^3 ,远低于国际平均水平(1240 m^3)和我国平均水平(609 m^3)^[24],为国际平均水平的31.23%^[25].人均生活水足迹平均是 62.37 m^3 ,仅占人均水足迹的16.11%,故较大比例的人均水足迹经虚拟水的形式消费.

2.3.3 水资源生态盈余或赤字分析

对比地区水资源量与内部水足迹值, 计算二者差值, 差值的大小反映水资源量自给能力、丰歉程度。一般认为, 为避免损害环境质量, 水资源开发利用率应低于40%^[4]。选取2010~2014年舟山群岛新区水资源总量的40%作为开发阈值, 与内部水足迹进行对比, 并分析该区水资源丰歉程度。

2010~2014年期间, 仅2012年为盈余状态, 其余年份均为赤字状态(表3)。2012年降水量最多, 水资源相对充沛, 说明气候和水资源年际变化差异对区域发展有直接影响。内部水足迹为增长趋势, 水资源的需求量增加, 而总量有限, 且受制于气候条件, 致使当地的水资源盈余状况并不能维持稳定。

表3 2010~2014年舟山群岛新区水资源生态状况

年份	降水量/mm	内部水足迹/m ³	水资源开发阈值/m ³	水生态盈余或赤字/m ³
2010	1 275	3.03×10 ⁸	3.01×10 ⁸	-0.02×10 ⁸
2011	1 040	3.12×10 ⁸	1.70×10 ⁸	-1.42×10 ⁸
2012	1 630	3.12×10 ⁸	5.22×10 ⁸	2.10×10 ⁸
2013	1 051	3.22×10 ⁸	2.28×10 ⁸	-0.94×10 ⁸
2014	1 436	3.26×10 ⁸	3.18×10 ⁸	-0.08×10 ⁸

3 舟山群岛新区水资源可持续利用评价

舟山群岛新区水资源利用状况从水足迹的结构、效益、安全性与水资源可持续性^[26]这4个方面进行评价, 结果见表4。

表4 舟山群岛新区水资源可持续利用评价结果

评价	指标	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
结构	WSS/%	84.64	82.11	82.76	84.29	84.90
	WD/%	15.36	17.89	17.24	15.71	15.10
效益	WFD/(人·万t ⁻¹)	27.03	25.52	25.78	25.47	25.39
	WFB/(元·m ⁻³)	180.20	203.63	226.92	244.38	264.39
	WFLD/(m ³ ·km ⁻²)	1.60×10 ⁴	1.71×10 ⁴	1.70×10 ⁴	1.72×10 ⁴	1.73×10 ⁴
	WFNT/(亿m ³)	0.45	0.20	0.33	0.06	-0.07
	WC/%	6.00	4.64	2.52	1.09	-0.87
生态	WS/%	47.54	89.20	28.89	67.14	48.36
安全	WP/%	53.52	93.90	31.42	68.19	47.48
可持续	WFPR/%		6.15	-0.79	1.33	0.52
	WAR/%		-43.43	206.34	-56.4	39.54
	WSI		0.141 5	0.003 8	0.023 5	0.013 2

表4中各指标参考文献^[26], 其中WSS为水资源自给率; WD为水资源进口依赖度; WFD为水足迹密度; WFB为水足迹效益; WFLD为水足迹土地密度; WFNT为水足迹净贸易量; WC为水资源贡献率; WS为水资源匮乏指标; WP为水资源压力指数; WFPR为水足迹增长指数; WAR为可用水资源增长指数; WSI为水资源可持续利用指标。

3.1 结构评价

2010~2014年, 舟山群岛新区WSS均值为83.74%(全球和中国均值分别为84%和93.6%^[26]), 足见其水资源自给能力仍有待提升。2010~2014年, 该区WD均值约为16.21%, 平均进口虚拟水0.61×10⁸m³, 说明舟山群岛新区对外部水资源的依赖程度较高, 整体水资源结构和水资源开发利用有待优化提升。

3.2 效益评价

3.2.1 内部效益评价

2010~2014年, 舟山群岛新区WFD均值约为26人·万t⁻¹, 高于福建省(11人·万t⁻¹)^[22]和大连市(19人·万t⁻¹)^[26]; 万吨水足迹人口密度介于25~27人之间, 整体较稳定, 故其水足迹人口承载能力较高。WFB从2010年(180.20元·m⁻³)到2014年(264.39元·m⁻³)逐年提高, 年均增长率达9.34%。WFLD均值为1.69×10⁴m³·km⁻², 状态较稳定, 变化较小, 且远低于福建省(2.72×10⁵m³·km⁻²)^[21], 表明该区单位土地面积耗水量较小。

综上表明, 水资源在该区内部作用显著。在水足迹结构中, 尤其是万吨人口密度呈现稳定状态, 水足迹支撑人口数量较大。水足迹经济效益持续增加, 水资源产生的经济效益加大, 水资源的高利用率和可持续经济社会发展的趋势良好。

3.2.2 外部效益评价

2010~2013年, 舟山群岛新区WFNT属于水资源输出地, 虚拟水总量值是进口商品小于出口商品, 水资源外流, 仅在2014年水资源属于输入地。水足迹净贸易量变化较大, 稳定性差, 2013年较2012年显著减少, 2014年减至负值, 主要受到贸易量与贸易商品种类的间接影响。

2010~2013年, WC均高于1%, 表明该区能一定程度缓解邻近区域用水压力; 2014年水资源贡献率为负, 表明2014年该区依靠其他区域水资源发

展自身经济,可见其水资源贡献率不稳定.

3.3 生态安全评价

2010~2014年,舟山群岛新区WS均值为56.23%,其中2011年最高(89.20%),水资源量基本可实现消费和服务自给.WP均值为58.90%,低于100%,表明其需水量在可用水资源容量范围内,但其水资源压力指数已高于全国水平(27%~41%)^[23],且波动较大,2011~2012年由93.90%(最高)降到31.42%(最低),枯水年份的数值明显增加,如2011年.水资源压力指数没有随其需求量的上升而持续增长,说明舟山群岛新区在水资源的利用效率上应该重点提升.总体看,舟山群岛新区水资源现阶段仍处于安全开采期,但生态安全程度不够高,且缺乏稳定性.

3.4 可持续性评价

舟山群岛新区水资源可持续状态(表5)表明,该区水足迹变化总体呈现一定的不稳定性,2010~2014年水足迹增长指数(WFPR)变化较大.2010~2014年,该区人口增长指数(P)均值约为0.16%,GDP增长指数(G)均值约为12.10%,一定程度上反映出该区水资源对经济和社会发展的支持能力较强,但用水效率仍有提升空间.舟山群岛新区可用水资源增长指数(WAR)的年际差值较大,且正负值交替,波动明显;而水资源可持续利用指数(WSI)在0~0.14之间波动.综合WFPR、WAR和WSI指标,再结合降水量增长指数(R),运用文献[26]的判断程序,得出舟山群岛新区历年水资源可持续状态(S),发现该区水资源可持续状态表现出一定的不确定性.

表5 2011~2014年舟山群岛新区水资源可持续状态 %

年份	指标						
	WFPR	P	G	WAR	R	WSI	S
2011	6.15	0.22	19.95	-43.43	-18.43	0.14	不可持续
2012	-0.79	0.19	10.56	206.34	56.73	0.00	可持续
2013	1.33	0.13	9.12	-56.40	-35.52	0.02	不可持续
2014	0.52	0.19	8.75	39.54	36.63	0.01	可持续

4 结论

(1)1995~2014年舟山群岛新区农业水足迹中农作物水足迹波动,且有下降趋势,畜产品水足迹整体呈波动上升趋势;2010~2014年,舟山群岛新

区,工业水足迹和人均工业水足迹呈小幅波动状态,生活水足迹和人均生活水足迹缓慢增加,其他水足迹和人均其他水足迹呈下降趋势;2010~2014年该区水足迹呈波动上升趋势,水足迹强度呈下降趋势,人均水足迹远低于世界及我国平均水平,除2012年外,2010~2014年舟山群岛新区水足迹均为赤字状态;

(2)舟山群岛新区水足迹结构较稳定,水资源自给能力处于较低水平.水资源在舟山群岛新区内部效益的作用显著;但水足迹外部效益缺乏稳定性.2010~2014年,该区水资源处于安全开发开采期,但生态安全程度不够高,且缺乏稳定性.

(3)由于水资源可持续利用能力较弱,可持续状态不稳定,从而影响经济社会的稳定发展.因此,必须减小水资源受不可控因素的影响程度,通过节水、储水、输水、增加重复率、减少污染等途径,减轻水资源的系统压力,提高水资源的综合利用效率,保障地区水资源利用的可持续性,促进经济社会的可持续发展.

参考文献:

- [1] 王梦依,高波.中国经济发展面临水危机[J].生态经济,2018,34(5):10-13.
- [2] 熊鹰,苏孟婷,张方明,等.长株潭城市群城镇化进程与水资源利用响应关系研究[J].人文地理,2018,33(6):69-76.
- [3] 汪芳,王舜奕, Prominski M. 城镇化与地方性中的水资源:可持续视角的水环境保护利用与水空间规划设计[J].地理研究,2018,37(12):2576-2584.
- [4] Arjen Y H. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国,译.北京:科学出版社,2012.
- [5] 诸大建,田园宏.虚拟水与水足迹对比研究[J].同济大学学报(社会科学版),2012,23(4):43-49.
- [6] 马晶,彭建.水足迹研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5458-5466.
- [7] 钱逸颖,董会娟,田旭,等.应对水资源危机的中国水足迹研究综述[J].生态经济,2018,34(7):162-166;173.
- [8] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7):1259-1276.
- [9] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. Ecosystems, 2012, 15(3):401-415.

- [10] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978-2010[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6):122-128.
- [11] 虞伟, 张晖, 胡浩. 基于水足迹理论的中国畜牧业水资源承载力研究[J]. 资源科学, 2012, 34(3):394-400.
- [12] 孙才志, 韩雪, 秦晓楠. 中国区际间主要农产品虚拟水流动格局稳定性[J]. 地理研究, 2014, 33(3):478-489.
- [13] 韩宇平, 贾冬冬, 黄会平, 等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素[J]. 水资源保护, 2019, 35(1):6-13.
- [14] 王雅洁, 刘俊国, 赵丹丹. 基于水足迹理论的水资源评价——以河北省张家口市宣化区为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5):219-225.
- [15] 孙才志, 刘淑彬. 基于 MRIO 模型的中国省(市)区水足迹测度及空间转移格局[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 945-956.
- [16] 贾浩, 李硕, 宋英杰, 等. 沧州市农业水足迹变化特征与驱动因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(6): 1-14.
- [17] 张蕾. 中国虚拟水和水足迹区域差异研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009.
- [18] 潘文俊, 曹文志, 王飞飞, 等. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价[J]. 资源科学, 2012, 34(10):1905-1912.
- [19] 赵春芳. 基于水足迹理论的浙江省水资源可持续利用研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [20] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水-耕地资源区域时空差异演变[J]. 资源科学, 2009, 31(1):84-93.
- [21] 孙才志, 张蕾. 中国农畜产品虚拟水区域分布空间差异[J]. 经济地理, 2009, 29(5):806-811.
- [22] 林彤. 福建省水足迹研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [23] 陈栓. 中国 1996-2010 年省际水足迹研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [24] 龙爱华, 徐中民, 王新华, 等. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3358-3365.
- [25] Chapagain A K, Hoekstar A Y. Water footprints of nations[EB/OL]. [2019-02-12]. <https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>.
- [26] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3):486-495.

Assessing water resources in Zhoushan Archipelago New District based on theory of water footprint

YU Fengrong, ZHAO Chunfang, TONG Yiqin*, TONG Chen, ZHU Zhaohong

(Ningbo University-University of Angers Joint Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the water footprint theory, this paper calculates the components of the water footprint of Zhoushan Archipelago New District, and analyzes the utilization status of water resources, as well as evaluates the water footprint's structure, benefit, safety and sustainability. The results demonstrate that the water footprint of agriculture in Zhoushan Archipelago New District is $3.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ to $3.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ from 1995 to 2014, presenting a fluctuating growth pattern. The average industrial water footprint is found to be $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ from 1995 to 2014, displaying a fluctuating trend. The average living water footprint is identified as being $0.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ with a slow rising trend. Other water footprints are going downward. The agricultural water footprint was stable from 1995 to 2014, but has been declining since 2006. At the same time, Zhoushan Archipelago New District has low water resources self-sufficiency as the external dependence is relatively high. The economic benefits of water resources continue to grow, which has a significant impact on other regions. Moreover, the ecological security degree is at low stable level and the sustainable utilization ability is insufficient.

Key words: water footprint; virtual water; water resources assessment; sustainability; Zhoushan Archipelago New District

(责任编辑 史小丽)