

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

杜轶¹, 郭青霞¹, 张勇^{2,3}

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.山西农业大学水土保持科学研究所,
太原 030045;3.山西省水土保持科学研究所,太原 030045)

摘要:为分析比较全球公顷和国家公顷核算水资源生态足迹的异同,基于水资源生态足迹理论与方法,构建出“全球公顷”和“国家公顷”的山西省水资源生态足迹计算模型,对其 2007—2018 年水资源生态足迹进行了测算与比较分析。结果表明:(1)2 种不同算法得出 12 年间山西省人均水资源生态足迹、人均水资源承载力、人均水资源生态赤字变化趋势相似,整体均呈上升趋势,但用国家公顷法得出的结果均大于用全球公顷法得出的同 1 年份的结果。(2)2 种不同算法得出山西省 2007—2018 年万元 GDP 水资源生态足迹均呈下降趋势,说明 12 年间其水资源利用率在提高。(3)2 种不同算法得出这 12 年间山西省水资源生态压力指数远 >1 ,说明其水资源开发利用处于不安全状态。研究认为:(1)2 种算法产生差异的主要原因在于采用的水资源均衡因子、水资源产量因子及区域水资源平均生产能力存在差异。国家公顷法比全球公顷法能更好地反映国家级以下空间尺度水资源开发利用态势。(2)需根据不同的研究目的,构建相应的计算模型进行水资源生态足迹的核算与分析,既有助于真实反映不同空间尺度上区域水资源开发利用态势,也有利于同级空间区域尺度上水资源生态足迹的比较。

关键词:水资源生态足迹;水资源生态承载力;国家公顷;全球公顷;山西省

中图分类号:X24;TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0165-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.023

Dynamic Comparative Analysis of Water Resources Ecological Footprint Based on Two Different Algorithms

—Taking Shanxi Province as an Example

DU Yi¹, GUO Qingxia¹, ZHANG Yong^{2,3}

(1.College of Resource and Environment, Shanxi Agriculture University, Taigu,

Shanxi 030801; 2.Soil and Water Conservation Institute of Science, Shanxi Agriculture

University, Taiyuan 030045; 3. Shanxi Institute of Soil and Water Conservation Science, Taiyuan 030045)

Abstract: In order to compare and analyze the similarities and differences between global hectare and national hectare in water resources ecological footprint accounting, based on the theory and method of water resources ecological footprint, two calculation models of water resources ecological footprint in Shanxi Province with “global hectare” and “national hectare” were constructed, and the water resources ecological footprint of Shanxi Province in 2007—2018 were calculated. The results showed that: (1) The change trends of the per capita water resources ecological footprint, per capita water resources ecological carrying capacity and per capita water resources ecological deficit of Shanxi Province during the past 12 year obtained by the two models were similar, and the overall trends of all above indexes were upward. However, the results obtained by the national hectare method were all greater than the results obtained by the global hectare method in the same year. (2) Two different algorithms both showed that the water resources ecological footprint per 10 000—yuan GDP in Shanxi Province from 2007 to 2018 was declining, indicating that water resource utilization rate was improving in the past 12 years. (3) Two different methods showed that the ecological pressure index of water resources in Shanxi Province was far greater than one in the past 12 years, indicating that development and

收稿日期:2021-03-21

资助项目:山西省软科学研究计划项目(2016041027-4)

第一作者:杜轶(1978—),女,硕士,讲师,主要从事土地资源可持续利用研究。E-mail:sfglrw_0615@163.com

通信作者:张勇(1978—),男,硕士,正高级工程师,主要从事水土资源可持续利用研究。E-mail:okokhere@sina.com

utilization of water resources was in an unsafe state. The research thought that: (1) The main reasons for the differences between the two algorithms were the differences in the water resources equivalence factor, water resources yield factor and the average production capacity of regional water resources. Compared with the global hectare method, the national hectare method could better reflect the development and utilization situation of water resources at the spatial scale below the national level. (2) According to different research purposes, it was necessary to construct the corresponding calculation models to calculate and analyze the water resources ecological footprint, which was not only conducive to better reflect the development and utilization situation of regional water resources on different spatial scales, but also was conducive to the comparison of the water resources ecological footprint on the same spatial and regional scale.

Keywords: water resources ecological footprint; ecological carrying capacity of water resources; national hectare; global hectare; Shanxi Province

水资源生态足迹概念的提出是基于生态足迹理论。生态足迹概念最早由著名的生态经济学家 William Rees 教授(加拿大)和他的博士生 Wackernagel 于 1992 年提出的,1996 年 Wackernagel 等^[1]对其方法和模型进行了完善。它作为可持续发展测度中的一个重要的定量测度方法,得到了广泛的应用。

生态足迹概念引入国内^[2-4]后,有关生态足迹的研究迅速展开。在研究应用中,我国学者^[5-6]为弥补生态足迹在测算水资源消费方面的局限,提出水资源生态足迹概念及其计算模型,为评价水资源持续利用提供了一种定量方法。近年来,研究应用尺度上较多涉及到省级^[7-13]、市级^[14-15]、流域^[16-17]等国家级以下尺度的空间区域。然而,学者们基本上仍以全球公顷为计量单位进行区域水资源生态足迹的核算,几乎没有学者以国家公顷为计量单位进行区域水资源生态足迹的核算。为此,本文以山西省为例,基于水资源生态足迹理论和方法,构建“国家公顷”和“全球公顷”2 种算法模型,核算 2007—2018 年水资源生态足迹,并比较分析 2 种算法之间的异同,为真实反映区域水资源开发利用态势提供参考依据。

1 研究区概况

山西省位于黄河中游,黄土高原东部,华北平原西侧,北以外长城与内蒙古自治区接壤,西隔黄河与陕西省相望,东面和南面倚太行山与河北、河南省毗连。南北介于 34°35′—40°43′N,东西介于 110°15′—114°33′E。全省总土地面积为 1 562.7 万 hm²,约占全国总面积的 1.63%。

全省河流众多,但以季节性河流为主。共有大小河流 1 000 余条,分属黄河、海河 2 大水系。黄河流域在山西省境内的面积有 97 138 km², 占全省总面积的 62%,海河流域在山西省境内的面积为 59 133 km², 占全省总面积的 38%。

根据山西省第 2 次水资源评价成果,1956—2000 年全省多年平均水资源量为 123.8 亿 m³,人均占有

量不足全国平均水平的 1/5,相当于世界人均占有水量的 4.3%,亩均占有水量只有全国的 9.3%。山西地下水资源储量约 93.1 亿 m³,但可开采水资源仅占 45%,且多分布于盆地边缘及省境四周。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用的数据主要来自《山西省统计年鉴(2008—2019 年)》《中国统计年鉴(2008—2019 年)》和《山西省水资源公报(2007—2018 年)》。

2.2 研究方法

2.2.1 水资源生态足迹计算模型 基于生态足迹理论的内涵,水资源生态足迹可理解为在人类生产生活与维持自然生态发展的过程中,将消耗的水资源量转化为相应账户的水资源用地面积^[6]。

计算中,将水资源账户划分为生活用水、生产用水和生态用水 3 大类型。水资源账户的计算模型^[5-6]为:

$$WEF = N \times \sum_{i=1}^3 wef_i = N \times \sum_{i=1}^3 (\gamma_w \times \frac{AW_i}{AP_w}) \quad (1)$$

式中:WEF 为水资源生态足迹(hm²);N 为区域人口总数(人);i 为水资源类型;wef_i 为第 i 类水资源类型的人均水资源生态足迹(hm²/cap);γ_w 为水资源均衡因子;AW_i 为第 i 类水资源的人均消耗水资源量(m³);AP_w 为区域水资源平均生产能力(m³/hm²)。

据此,基于国家公顷法的水资源生态足迹核算方法和基于全球公顷法的水资源生态足迹核算方法基本类似,不同之处在于前者计算过程中采用国家水资源平均生产能力,以及相应的以国家公顷为核算标准的水资源均衡因子,后者采用全球水资源平均生产能力,以及相对应的全球公顷的水资源均衡因子。

2.2.2 水资源生态承载力计算模型 基于生态足迹理论的内涵,水资源生态承载力可理解为某区域在特定历史发展阶段,水资源的最大供给量可支持该区域资源、环境和社会(生产、生活和生态)可持续发展的能力,即水资源对生态系统和经济系统良性发展的支

撑能力^[5-6]。其计算模型为:

$$WEC = N \times wec = 0.4 \times \left(\frac{Q_{\text{水}}}{AP_{\text{水}}} \right) \times \gamma_{\text{水}} \times \varphi_{\text{水}} \quad (2)$$

式中:WEC 为水资源生态承载力 (hm^2);wec 为人均水资源生态承载力 (hm^2/cap); $Q_{\text{水}}$ 为区域水资源总量 (m^3); $\varphi_{\text{水}}$ 为区域水资源的产量因子。据研究^[18], 一个国家和地区的水资源承载力中必须至少扣除 60% 用于维持生态环境, 因此在水资源生态承载力计算中乘以系数 0.4。

据此, 基于国家公顷法的水资源生态承载力核算方法和基于全球公顷法的水资源生态承载力核算方法也基本相似, 不同之处在于前者计算过程中采用国家水资源平均生产能力, 以及相应的以国家公顷为核算标准的水资源均衡因子和产量因子, 后者采用全球水资源平均生产能力, 以及相对应的全球公顷的水资源均衡因子和产量因子。

2.2.3 水资源生态赤字/盈余 将区域内水资源消耗产生的生态足迹和生态承载力相比较, 得出水资源生态赤字和水资源生态盈余, 此指标可用来判断研究区域内水资源的可持续利用情况^[5-6]。其计算公式为:

$$wes = wec - wef \quad wed = wef - wec \quad (3)$$

式中:wes 为人均水资源生态盈余 (hm^2/cap);wed 为人均水资源生态赤字 (hm^2/cap);wef 为人均水资源生态足迹 (hm^2/cap)。

2.2.4 水资源利用效率 水资源利用效率可利用万元 GDP 水资源生态足迹值来衡量。万元 GDP 水资

源生态足迹是指区域水资源总生态足迹 (WEF) 与区域国内生产总值 (GDP) 的比值^[19], 其计算公式为:

$$\text{万元 GDP 水资源生态足迹} = \frac{WEF}{GDP} \quad (4)$$

万元 GDP 水资源生态足迹值越高, 表明水资源利用效率越低; 反之, 则利用效率越高。

2.2.5 水资源生态压力指数 水资源生态压力指数 (WEPI) 是指某地区水资源生态足迹 (WEF) 与水资源生态承载力 (WEC) 的比率, 可衡量水资源生态安全性^[19], 其计算公式为:

$$WEPI = \frac{WEF}{WEC} = \frac{wef}{wec} \quad (5)$$

WEPI 值越大, 说明该区域水资源安全受到的威胁就越大。当 $0 < WEPI < 1$ 时, 表明该区域水资源开发利用处于安全状态, 具有进一步开发利用的空间; 当 $WEPI = 1$ 时, 表明该区域水资源供需均衡, 水资源利用达到最大值, 水资源安全处于临界状态; 当 $WEPI > 1$ 时, 表明该区域水资源消费量大于供给量, 水资源开发利用处于不安全状态。

2.3 主要参数的确定

2.3.1 水资源均衡因子的确定 根据我国学者们^[5-6]的研究成果, 基于全球公顷的水资源均衡因子取 5.19。

根据我国学者们^[20-21]提出的均衡因子的修订计算方法, 计算出基于国家公顷的耕地均衡因子, 再借鉴范晓秋^[5]对水资源均衡因子的计算方法, 计算出基于国家公顷的水资源均衡因子, 结果见表 1。

表 1 基于国家公顷法的山西省 2007—2018 年耕地及水资源的均衡因子

项目	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
耕地	5.4310	5.3125	5.3684	5.2841	5.2352	5.1861	5.2207	5.1893	5.2036	5.2025	5.2054	5.2210
水资源	6.5494	6.7332	6.9126	6.7620	7.0268	6.9156	7.0375	7.1641	7.3448	7.6828	7.6555	7.8072

2.3.2 水资源产量因子的确定 根据生态足迹理论产量因子的定义, 基于全球公顷的区域水资源产量因子为该区域水资源平均生产能力与全球水资源平均生产能力的比重。根据学者们^[5-6]的研究成果, 全球水资源平均生产能力为 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。据此, 计算出基于全球公顷的山西省 2007—2018 年历年的水资源产量因子 (表 2)。

根据全球公顷水资源产量因子的概念, 基于国家公顷的区域水资源产量因子可以定义为该区域水资源平均生产能力与全国水资源平均生产能力的比重。据此, 计算出基于国家公顷的山西省 2007—2018 年历年的水资源产量因子 (表 2)。

3 结果与分析

3.1 山西省人均水资源生态足迹

根据公式(1), 计算出 2 种算法的山西省 2007—

2018 历年的各子账户及用水总量的人均水资源生态足迹, 结果见图 1。

从图 1 可以看出, 国家公顷法和全球公顷法核算的山西省 2007—2018 年用水总量、农业用水、工业用水、生活用水、生态用水的人均生态足迹整体变化趋势相似。其中, 用水总量、农业用水、生活用水的人均生态足迹呈上升趋势, 前者算法得出的上升率分别为 26.51%, 26.19%, 40.64%, 后者算法得出的上升率分别为 15.41%, 15.11%, 28.29%; 而工业用水的人均生态足迹 12 年间整体出现下降趋势, 前者算法得出下降率为 3.03%, 后者算法得出下降率为 11.54%; 生态用水的人均生态足迹 12 年间变化幅度最大, 前者算法得出上升 7.8 倍, 后者算法得出上升 7.1 倍。产生的原因在于: 12 年间山西省用水总量呈上升趋势, 上升 26.49%, 其中, 农业用水、生活用水、生态用水均

呈上升趋势,分别上升 26.17%,40.61%,677.78%;而工业用水下降 3.05%。这与山西省政府实施转型发展、高质量发展、转变经济发展方式、优化产业结构等政策息息相关。尤其是 2010 年山西省获批“国家

资源型经济转型综合配套改革试验区”之后,围绕“农业现代化、工业新型化、市域城镇化、城乡生态化”战略目标,加快转型发展的步伐,这也是 2011 年前后水资源生态足迹发生较大变化的原因。

表 2 山西省 2007—2018 年水资源产量因子

年份	全球水资源平均生产力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	国家水资源平均生产力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	山西省水资源平均生产力/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量因子	
				全球公顷法	国家公顷法
2007		2630.75	661.67	0.2107	0.2515
2008		2857.74	559.28	0.1781	0.1957
2009		2518.77	548.79	0.1748	0.2179
2010		3219.42	585.52	0.1865	0.1819
2011		2422.57	795.67	0.2534	0.3284
2012	3140	3075.72	679.91	0.2165	0.2211
2013		2912.28	809.81	0.2579	0.2781
2014		2840.30	710.37	0.2262	0.2501
2015		2912.77	601.52	0.1916	0.2065
2016		3381.92	858.12	0.2733	0.2537
2017		2995.96	833.17	0.2653	0.2781
2018		2860.68	780.06	0.2484	0.2727

比较 2 种算法得出的山西省 2007—2018 历年人均水资源生态足迹结果,显然这 12 年间,不管是用水总量的人均水资源生态足迹,还是其构成组分的人均水资源生态足迹,采用国家公顷法得出的结果均高于采用全球公顷法得出的同年份结果,最高为 2011 年,达 1.75 倍,最低为 2010 年,为 1.27 倍。说明同全球公顷法相比,用国家公顷法计算出山西省需要较大的水资源用地面积。原因在于 2 种算法中选取的水资源均衡因子存在差异,国家公顷法中的取值比同年份全球公顷法中的取值相对高,最低为 1.26 倍(2007 年),最高可达 1.50 倍(2018 年);同时,国家公顷法中采用的国家水资源平均生产能力,与全球公顷法中采用的全球水资源平均生产能力也存在差异,除 2010 年和 2016 年中国水资源平均生产能力比全球水资源平均生产能力略高之外,其余同年份均偏低,最高为 0.98 倍(2012 年),最低为 0.77 倍(2011 年)。

通过对山西省 2007—2018 年人均水资源生态足迹组成组分比重的分析(图 2)得出:(1)农业用水人均生态足迹比重最高,达 55%以上,说明 12 年间山西省水资源的利用方向主要用于农业生产,也导致用水总量人均生态足迹的变化主要受农业用水人均生态足迹的变化而变化;(2)工业用水人均生态足迹的比重占 17%以上,但整体呈下降趋势,下降 23.35%;(3)生活用水人均生态足迹的比重在 16%以上,整体呈上升趋势,上升 11.16%;(4)生态用水人均生态足迹的比重虽然最小,但是变化幅度最大的 1 种类型,上升近 5 倍,也充分说明山西省在优化产业结构、生态环境建设方面做出了成效。

3.2 山西省人均水资源生态承载力

根据公式(2),计算出 2 种算法的山西省 2007—

2018 历年的人均水资源生态承载力。从图 3 可以看出,国家公顷法和全球公顷法核算的山西省 2007—2018 年人均水资源生态承载力整体变化趋势相似,均呈波浪式上升趋势,上升率分别为 27.85%,26.80%,这与 12 年间山西省水资源总量呈波动变化有关。

比较 2 种算法得出的山西省 2007—2018 历年人均水资源生态承载力,显然 12 年间,采用国家公顷法得出的结果均高于采用全球公顷法得出的同年份结果,最高年份为 2011 年,为 2.27 倍,最低年份为 2010 年,为 1.23 倍。说明同全球公顷法相比,用国家公顷法计算出山西省可提供较多的水资源用地面积。原因在于:2 种算法中选取的除水资源均衡因子、区域水资源平均生产能力存在差异外,水资源产量因子也存在差异。同样除 2010 年和 2016 年国家公顷法中水资源产量因子比全球公顷法中水资源产量因子稍低外,其余年份国家公顷法中水资源产量因子均高于全球公顷法中水资源产量因子,最高为 1.30 倍(2011 年),最低为 1.02 倍(2012 年)。

3.3 山西省人均水资源生态赤字/盈余

根据公式(3),计算出 2 种算法的山西省 2007—2018 历年人均水资源生态赤字。从图 4 可以看出,国家公顷法和全球公顷法核算的山西省人均水资源生态赤字整体均呈上升趋势,上升率分别为 26.23%,13.42%,且其变化趋势与同种算法得出的人均水资源生态足迹的变化趋势大体相似。说明 12 年间,人均水资源生态足迹不仅大于人均水资源生态承载力,而且也直接影响人均水资源生态赤字的变化。

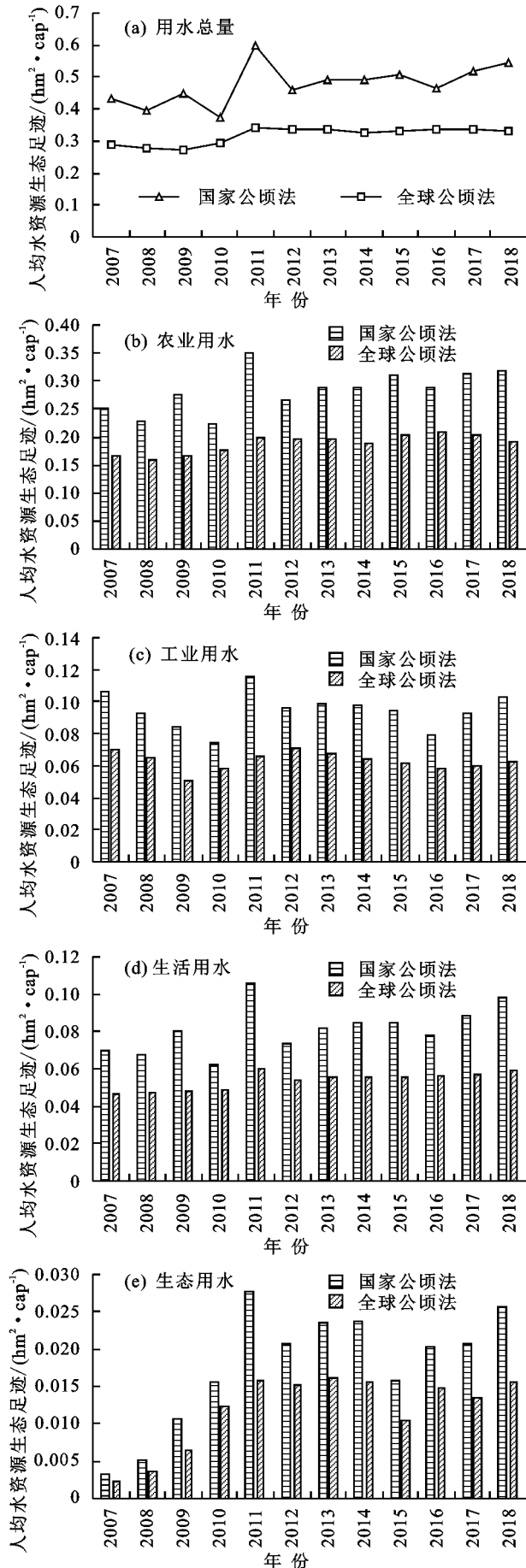


图 1 山西省 2007—2018 历年人均水资源生态足迹 2 种算法结果比较

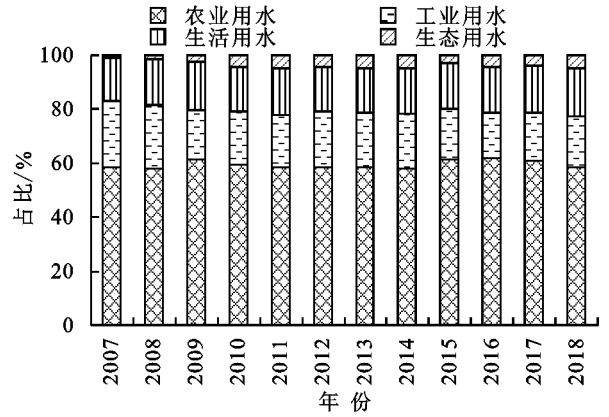


图 2 山西省 2007—2018 历年人均水资源生态足迹组成组分比重变化趋势

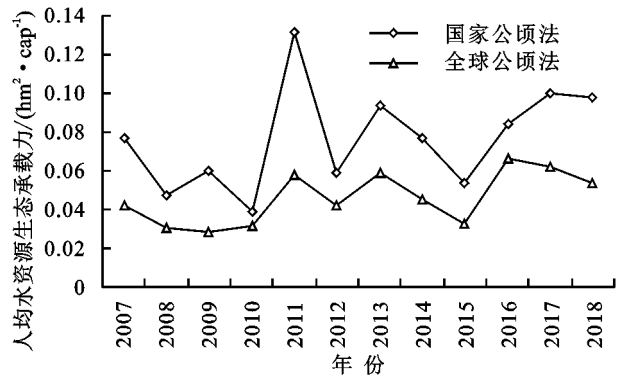


图 3 山西省 2007—2018 历年人均水资源生态承载力 2 种算法结果比较

比较 2 种算法得出的山西省 2007—2018 历年人均水资源生态赤字,显然这 12 年间采用国家公顷法得出的结果均高于采用全球公顷法得出的同年份结果,最高年份为 2011 年,为 1.65 倍,最低年份为 2010 年,为 1.27 倍。说明同全球公顷法相比,用国家公顷法计算出山西省水资源持续利用的态势更不容乐观。

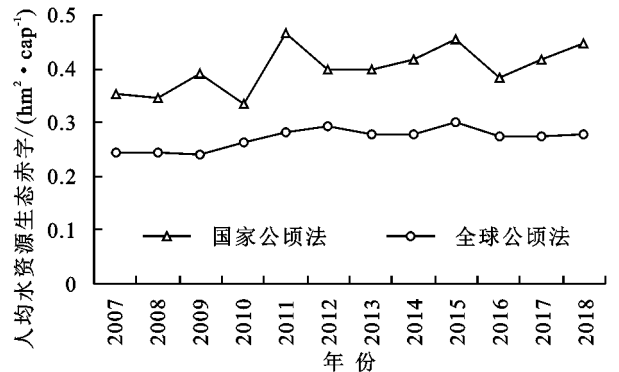


图 4 山西省 2007—2018 历年人均水资源生态赤字 2 种算法结果比较

3.4 山西省水资源利用效率

根据公式(4),计算出 2 种算法的山西省 2007—2018 年万元 GDP 水资源生态足迹。从图 5 可以看出,不管是采用国家公顷法,还是全球公顷法,均得出山西省 2007—2018 年万元 GDP 水资源生态足迹均呈下降趋势,12 年间分别下降 50.33%,54.69%。说

明不管采用哪种算法,这 12 年期间山西省的水资源利用率在提高。但比较 2 种算法的结果,显然采用国家公顷法得出万元 GDP 的水资源生态足迹偏高,最高为 2011 年,为 1.75 倍,最低为 2010 年,为 1.27 倍。说明采用国家公顷法,水资源的耗用量相对偏高。

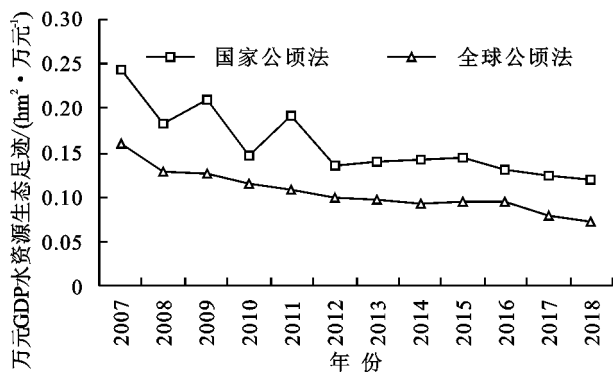


图 5 山西省 2007—2018 年万元 GDP 水资源生态足迹

3.5 山西省水资源生态压力指数

根据公式(5),计算出 2 种算法的山西省 2007—2018 历年水资源生态压力指数。从图 6 可以看出,2 种算法均得出这 12 年山西省水资源生态压力指数远大于 1,说明不管采用哪种算法,均得出其水资源开发利用处于不安全状态,但水资源压力指数呈下降趋势,说明随着水资源利用率的提高,可改善水资源开发利用的不安全状态。同全球公顷法相比,采用国家公顷法计算出山西省水资源生态压力指数较小,说明一个国家公顷生态足迹单位的水资源用地可以为人类提供的水资源利用的消费较少。

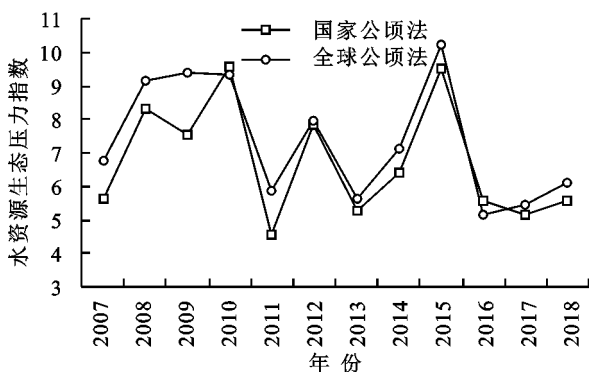


图 6 山西省 2007—2018 历年水资源生态压力指数

4 讨论

采用国家公顷法和全球公顷法 2 种不同算法对山西省 2007—2018 年水资源生态足迹进行测算与分析,结果表明,2 种算法得出的结果存在差异,主要原因在于 2 种核算方法采用的水资源均衡因子、水资源产量因子、区域水资源平均生产能力存在差别。

水资源均衡因子、水资源产量因子参数确定中均需考虑区域水资源生产能力。事实上,不同区域自然经济社会条件存在差异,水资源分布也不均衡,导致不同空间地域水资源生产能力存在差异。所以,认为

全球公顷法中的全球水资源平均生产能力并不能准确反映国家级及以下区域空间水资源生产状况,也不能更好地反映区域空间水资源开发利用态势,即全球公顷法进行区域水资源生态足迹的核算,有利于国际间水资源生态足迹的比较,国家公顷法进行区域水资源生态足迹的核算,有利于同一国家不同省、市级等空间尺度范围上进行比较,这与学者们^[20-23]研究生态足迹模型改进时构建的国家公顷模型得出的结论具有相似之处。

因此,需根据不同的研究目的,构建相应的计算模型,进行水资源生态足迹的分析,以较客观真实地反映区域水资源开发利用态势。

5 结论

(1)采用国家公顷法和全球公顷法 2 种不同算法均得出 2007—2018 年山西省人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力、人均水资源生态赤字整体呈上升趋势,且人均水资源生态赤字的变化趋势与人均水资源生态足迹的变化趋势相似。

(2)2007—2018 年山西省人均水资源生态足迹组分中,农业用水人均生态足迹比重最高,其次是工业用水人均生态足迹比重。生活用水和生态用水的人均生态足迹比重呈上升趋势。说明山西省在优化产业结构、生态环境建设方面取得一定成效。

(3)2 种算法均得出 2007—2018 年山西省水资源开发利用处于不安全状态,但其水资源利用率处于逐年提高状态。建议转型发展、高质量发展中继续优化产业结构,保护水资源,合理开发利用水资源,节约集约用水,保持水资源的可持续利用。

(4)比较 2 种算法,2007—2018 年山西省人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力、人均水资源生态赤字、万元 GDP 水资源足迹采用国家公顷法得出的结果均高于同年份全球公顷法得出的相应结果。产生差异的主要原因在于 2 种方法中涉及的水资源均衡因子、水资源产量因子、区域水资源平均生产能力存在差异,且国家公顷法比全球公顷法能更好地反映国家级以下空间尺度水资源开发利用态势。

参考文献:

- [1] Wackernagel M, Rees W. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [2] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616.
- [3] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630-636.
- [4] 李利锋, 成升魁. 生态占用: 衡量可持续发展的新指标

- [J].资源科学,2000,15(4):375-382.
- [5] 范晓秋.水资源生态足迹研究与应用[D].南京:河海大学,2005.
- [6] 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.
- [7] 杜轶,张治国,董晓辉,等.基于水资源生态足迹模型的水资源可持续性研究[J].山西水土保持科技,2015(4):15-17.
- [8] 张勇,张治国,董晓辉,等.基于 ARIMA 模型的山西省水资源生态足迹时间序列分析[J].安徽农业科学,2016,44(22):53-55,59.
- [9] 关格格,贾陈忠,秦巧燕.基于水生态足迹的山西省水资源利用研究[J].人民黄河,2017,39(7):96-99.
- [10] 赵春芳,董朝阳,伍磊,等.浙江省水资源生态足迹时空格局[J].水土保持通报,2016,36(1):242-248.
- [11] 张义,邹永福,李丰生,等.基于灰色神经网络模型的水资源生态足迹预测:以广西为例[J].人民长江,2017,48(1):37-42.
- [12] 贾陈忠,乔扬源,关格格,等.山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J].水土保持研究,2019,26(2):370-376.
- [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.
- [14] 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,2019,38(2):93-100.
- [15] 张养安,郑志峰,王永红.汉中市水域生态承载力的研究与分析[J].水土保持学报,2017,31(5):356-360.
- [16] 李睿佳,宋厚娟,赵冰清,等.黄河中游(禹门口—汾河入黄口)区域水资源生态赤字的动态研究[J].山西农业科学,2017,45(9):1507-1512.
- [17] 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.
- [18] 张岳.中国水资源与可持续发展[M].南宁:广西科学技术出版社,2000:2-3.
- [19] 谭秀娟,郑钦玉.我国水资源生态足迹分析与预测[J].生态学报,2009,29(7):3559-3568.
- [20] 张宇鹏.我国生态足迹区域差异比较研究[D].长春:吉林大学,2010.
- [21] 高中良,郑钦玉,谭秀娟,等.“国家公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算及应用:以重庆市为例[J].安徽农业科学,2010,38(15):7868-7871.
- [22] 顾晓薇,王青,刘建兴,等.基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(4):295-298.
- [23] 吴开亚,王玲杰.基于全球公顷和国家公顷的生态足迹核算差异分析[J].中国人口·资源与环境,2007,17(5):80-83.
- (上接第164页)
- [10] 王法奎.生化黄腐酸的生物学功能及其在饲料中的应用[J].饲料与畜牧,2013(6):10-12.
- [11] 汪善锋,汪海峰,陈安国.生化黄腐酸的应用效果与作用机理[J].中国饲料,2004(22):12-13.
- [12] 吴军虎,任敏.羟丙甲纤维素对土壤水分入渗特性及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):66-71,235.
- [13] 吴军虎,刘侠,邵凡凡,等.天然沸石对土壤水分运动特性及水稳性团聚体的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(4):34-41.
- [14] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(2):362-369.
- [15] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等.河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2020,36(10):116-123.
- [16] 吴军虎,邵凡凡,刘侠.蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):81-87.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57(4):1071-1076.
- [18] 罗珍,朱敏,线岩相洼,等.丛枝菌根真菌侵染对紫色土水稳性团聚体特征的影响[J].土壤通报,2012,43(2):310-314.
- [19] 尚应妮,胡斐南,赵世伟,等.不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):204-208,239.
- [20] 吴军虎,陶江海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [21] 马任甜,胡斐南,刘婧芳,等.黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化学性质演变特征[J].土壤学报,2020,57(2):392-402.
- [22] 牛岩.在不同温度下土壤胶体分散系稳定性分析[J].现代农业科技,2018(9):223,227.
- [23] 牛岩.砒砂岩与沙复配土在不同 pH 条件下的 Zeta 电位特性[J].黑龙江农业科学,2018(4):42-45.