

西安市水资源生态足迹与生态承载力分析

刘子怡, 张廷龙*

西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌

收稿日期: 2021年12月28日; 录用日期: 2022年2月9日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

为定量评价西安市水资源的可持续发展状态, 本文分析和评估了西安市2010~2020年水资源生态足迹与生态承载力等多项指标, 并应用LMDI法剖析了水资源生态足迹的影响因素。研究显示: 1) 2010~2020年间水资源生态足迹呈先逐年上升后略有下降的趋势; 降水量对水资源生态承载力有较大影响, 二者呈明显的正相关趋势。2) 除2011年外, 水资源生态盈亏均处赤字状态; 水资源生态压力指数有波动下降趋势; 万元GDP水资源生态足迹亦呈缓慢下降趋势。3) 生产用水生态足迹在总水资源生态足迹中占比最大, 生态用水足迹占比逐年上升; 一产用水生态足迹占比呈现缓慢下降, 二、三产占比波动上升。4) 经济因素是西安市水资源生态足迹增长的最主要驱动因子。技术因素对其增长有抑制作用。

关键词

水资源, 生态足迹, 承载力, LMDI, 可持续发展, 西安市

Spatial and Temporal Analysis of Water Resources Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity in Xi'an City

Ziyi Liu, Tinglong Zhang*

College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi

Received: Dec. 28th, 2021; accepted: Feb. 9th, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

To quantitatively evaluate the sustainable development status of water resources in Xi'an, various indicators such as the ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources were analyzed and evaluated, and the LMDI method was applied to analyze the influencing factors of the ecological footprint of water resources in Xi'an from 2010 to 2020. The results show that: 1) From 2010 to 2020, the ecological

作者简介: 刘子怡(2002-), 女, 陕西西安人, 本科生, 主要从事生态环境遥感方面研究。

*通讯作者 Email: dargon810614@126.com

文章引用: 刘子怡, 张廷龙. 西安市水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(1): 30-41.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.111003

footprint of water resources showed a trend of increasing first and then decreasing slightly; precipitation had a great impact on the ecological carrying capacity of water resources, which has an obvious positive correlation trend. 2) Except for 2011, the ecological profit and loss of water resources are all in deficit; the ecological pressure index of water resources shows a fluctuating downward trend; the ecological footprint of water resources per 10,000 yuan of GDP also shows a slow downward trend. 3) The ecological footprint of production water accounts for the largest proportion of the total ecological footprint of water resources, and the proportion of ecological water footprint increases annually; the proportion of water ecological footprint of the primary industry shows a slow decline; the proportion of the secondary and tertiary industries is fluctuated and increased. 4) Economic factors are the main driving factors for the growth of the ecological footprint of water resources in Xi'an, and technical factors have inhibited its growth.

Keywords

Water Resources, Ecological Footprint, Carrying Capacity, LMDI, Sustainable Development, Xi'an City

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程的加快,越来越多的地区为了提升区域竞争力,创造更多的社会经济价值,加大了对区域自然资源的开发和利用力度;随即区域资源短缺、生态环境破坏等现象频繁发生,进一步影响到区域整体的可持续发展。水资源是区域生态环境内部的基本自然资源[1],对其合理的利用有助于区域社会经济、生态环境以及人类群体本身健康良性的发展[2] [3] [4] [5];但目前国内许多快速城市化地区(诸如西安市)水资源同样面临日益短缺的问题。20世纪90年代,生态足迹(Ecological Footprint)模型,由加拿大生态经济学家 William 和 Wackernagel 提出、发展,并被广泛应用于区域资源可持续利用发展的综合评估研究当中[6] [7]。同时该模型方法也为水资源(单项资源)的可持续利用定量评价提供了新的思路[8] [9]。国内学者在有关区域性水资源生态足迹方面也做了诸多的研究:卢艳等[10]通过分析计算发现河南省大多城市水资源出现生态赤字;张养安等[11]对陕西省汉中市水域生态承载力进行了研究,结果表明:汉中市水域生态承载力整体处于安全状态。张义等[12]提出了改进型水资源生态足迹模型,并计算了广西的水资源生态足迹。王文国等[13]通过分析计算发现:四川省人均水资源生态足迹呈整体上升趋势但有一定的生态盈余。刘子刚等[14]通过将水生态足迹划分为水产品生态足迹、水资源生态足迹与水污染生态足迹三部分,建立了相应的水生态足迹模型。西安市作为典型的内陆快速城市化地区,而且也是中国西部地区重要的中心城市,它的可持续发展状态将影响和辐射至整个西北地区。因此,分析和评估该区域的水资源可持续发展状况,具有重要的现实意义。

本文以陕西省西安市为研究区域,评估计算了2010~2020年西安市水资源生态足迹和生态承载力,并对其空间分布特征进行分析,同时应用LMDI法分析了影响西安市水资源生态足迹的因素。文中研究结果可为西安市水资源科学的管理、有效的利用以及区域可持续发展的评估提供基础依据,同时也可同为类型城市水资源的可持续评价提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

陕西省西安市位于我国西北东部、关中平原中部,北濒渭河、南依秦岭,位于33°39'~34°44' N、107°41'~109°49'E之间,地势西北低东南高,辖境东西长约204 km,南北宽约116 km,土地总面积约为10,108 km²,

西安市自 2017 年代管西咸新区, 故 2017 年及以后的土地总面积积为 10,752 km²。暖温带半湿润大陆性季风气候在市内的平原地区分布, 四季分明(见图 1)。年降水量 522.4~719.5 mm, 由北向南递增, 全年中 7 月、9 月为两个明显降水高峰月。据陕西省 2020 年水资源公报显示, 西安市降水量位于陕西省所有地级市的第六位, 水资源总量位于第八位, 水资源总量较为匮乏。

2.2. 数据来源

本文研究区人口、GDP 等数据来源于《西安市统计年鉴(2010~2020)》和《陕西省统计年鉴(2010~2020)》; 水资源总量等相关数据来源于《陕西省水资源公报(2020)》和《西安市水资源公报(2010~2020)》。

2.3. 研究方法

2.3.1. 水资源生态足迹

水资源生态足迹反映区域人口、社会发展对水资源的占用情况。具体涵义是在一定的人口规模和经济水平条件下, 将人类生存和社会发展等所必需的水资源量折算为所必要的生态生产性面积, 再通过水资源产量因子和均衡因子等参数的校正, 得到区域内可以相互比较的均衡值[1]:

$$WF = T \times a_{wf} = T \times \varepsilon \times (W/a) \quad (1)$$

式中: WF 为区域水资源总生态足迹(hm²); T 为区域的人口数量; a_{wf} 为区域的人均水资源生态足迹(hm²/人); ε 为区域水资源均衡因子; W 为区域人均消耗的水资源量(m³); a 为世界水资源的平均生产能力(m³/hm²)。本文水资源均衡因子 ε 取值 5.19 (黄林楠等[15]); 水资源全球平均生产能力 a 取值 3140 m³/hm² (孟丽红等[16])。

2.3.2. 水资源生态承载力

水资源生态承载力反映区域水资源的供给状况。具体涵义是在一定的历史发展阶段, 水资源最大供给能够支持维系有限发展目标的资源 - 环境 - 社会 - 经济可持续发展最大规模[17], 计算公式如下[18]:

$$WC = T \times a_{wc} = 0.4 \times \theta \times \varepsilon \times (Q/a) \quad (2)$$

式中: WC 为区域的水资源承载力(hm²); a_{wc} 为区域的人均水资源承载力(hm²/人); θ 为区域水资源产量因子(该区域水资源平均生产能力与世界水资源平均生产能力之比), 文中取值 1.5 (全球生态足迹网于 2017 年发布的《Working Guidebook to the National Footprint Accounts》[19]); Q 为区域的水资源总量(m³); ε 和 a 同式(1)。已有研究表明: 区域水资源开发利用超过 30%~40%将会引发生态环境的恶化[20], 因此水资源承载力中需预留 60%用于维护生态环境稳定[21]。

2.3.3. 水资源生态盈亏

水资源生态盈亏反映区域水资源的供需平衡状态, 用于判别和衡量区域水资源的可持续利用情况[18]。具体涵义是生态承载力与水资源生态足迹的差值, 计算公式如下:

$$D = WC - WF \quad (3)$$

式中: D 为水资源的生态盈亏。 D 大于 0, 表明区域内水资源的供大于需, 处于盈余状态, 水资源可持续利用; D 等于 0, 表明区域水资源处于供给与需求的临界状态; D 小于 0, 表明区域内水资源的供不应求, 处于赤字状态, 水资源不可持续利用。

2.3.4. 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源生态足迹用来判断与衡量区域的用水效率[18], 具体涵义为区域水资源生态足迹与 GDP 的比, 计算公式如下:

$$R = WF/GDP \quad (4)$$

式中： R 为区域的万元 GDP 生态足迹。 R 值越大，区域水资源利用效率越高，反之亦然。

2.3.5. 水资源生态压力

生态压力指数反映人类的活动对生态系统的干扰程度[22]，具体涵义为区域水资源生态足迹与水资源承载力之比，计算公式如下：

$$EPI = WF/WC \quad (5)$$

式中： EPI 为区域水资源生态压力。当 EPI_w 小于 1 时，表明人类活动对生态系统的干扰强度尚未超过区域生态系统自身的反馈阈值，生态系统仍处于平衡状态。而 EPI 大于 1，表明人类活动对生态系统的干扰超过了生态系统自身的反馈阈值；并且其值越大，干扰越强，区域就越有可能面临生态环境安全和生态系统崩溃的问题[23]。

2.3.6. 对数平均迪氏指数法

近年来在资源环境领域，因素分解法逐渐成为一种重要的研究方法，该方法能够提供一个完整的框架来分析各变量的影响程度[24]。LMDI 模型是由 Ang 等[25]提出的将研究对象划分为若干影响因子的分解法[26]，不产生无法分解的残差，适用范围较广，用于测度不同因子对研究对象的影响及其驱动力分析[27]。

基于 LMDI 模型首先将水资源生态足迹模型进行指数分解，如下：

$$WF_t = \sum_i WF_{it} = \sum_i \frac{WF_{it}}{WF_t} \cdot \frac{WF_t}{g_t} \cdot \frac{g_t}{p_t} \times p_t = \sum_i s_{it} t_i e_i p_i \quad (6)$$

$$\Delta WF_t = WF_t - WF_0 = \sum_i s_{it} t_i e_i p_i - \sum_i s_{i0} t_0 e_0 p_0 = \Delta WF_s + \Delta WF_t + \Delta WF_e + \Delta WF_p \quad (7)$$

其中， $s_{it} = WF_{it}/WF_t$ ， $t_i = WF_t/g_t$ ， $e_i = g_t/p_t$ ，将区域水资源生态足迹，按照生产、生活和生态等 3 类生产账户进行分解。式中： WF_{it} 为第 t 时期第 i 类水资源的生态足迹(hm^2)； WF_t 为第 t 时期水资源总生态足迹(hm^2)； g_t 为第 t 时期区域国内生产总值 GDP (亿元)； p_t 为第 t 时期区域常住人口数(万人)； WF_t, WF_0 分别是第 t 年和基准年的水资源生态足迹量(hm^2)。

将西安市水足迹变化的驱动因素分解为结构因素、人口因素、经济因素和技术因素四方面： s_{it} 为第 t 时期第 i 类水资源利用占水资源总生态足迹比重，代表水足迹结构因素； t_i 为第 t 时期单位 GDP 水资源生态足迹，代表水足迹技术因素； e_i 为第 t 时期人均 GDP，代表水足迹经济因素； p_t 代表水足迹人口因素； ΔWF_t 为水资源总生态足迹变化量(hm^2/a)。接下来对这四个因素分别引起的水足迹变化量进行计算，即利用 LMDI 加和分解对(7)式进行分解，如下：

$$\Delta WF_s = \ln \frac{s_{it}}{s_{i0}} \sum_i \frac{WF_{it} - WF_{i0}}{\ln WF_{it} - \ln WF_{i0}} \quad (8)$$

$$\Delta WF_t = \ln \frac{t_t}{t_0} \sum_i \frac{WF_{it} - WF_{i0}}{\ln WF_{it} - \ln WF_{i0}} \quad (9)$$

$$\Delta WF_e = \ln \frac{e_t}{e_0} \sum_i \frac{WF_{it} - WF_{i0}}{\ln WF_{it} - \ln WF_{i0}} \quad (10)$$

$$\Delta WF_p = \ln \frac{p_t}{p_0} \sum_i \frac{WF_{it} - WF_{i0}}{\ln WF_{it} - \ln WF_{i0}} \quad (11)$$

分解结果若大于 0，则表明该因素起到推动作用，否则，表明该因素具有抑制效果[28]。

3. 结果与分析

3.1. 西安市 2010~2020 年间水资源生态足迹各指标分析

西安市地处内陆地区，水资源并不丰富，但随着经济的发展，产业的扩张，水资源生态足迹呈逐年平稳上

升又缓慢下降(自 2019 年起)趋势;如图 2 所示:本文研究时段内,其最小值为 $2.94 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (2010 年),最大值为 $3.70 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (2018 年),涨幅达 25.87%,年均涨幅 2.92%。

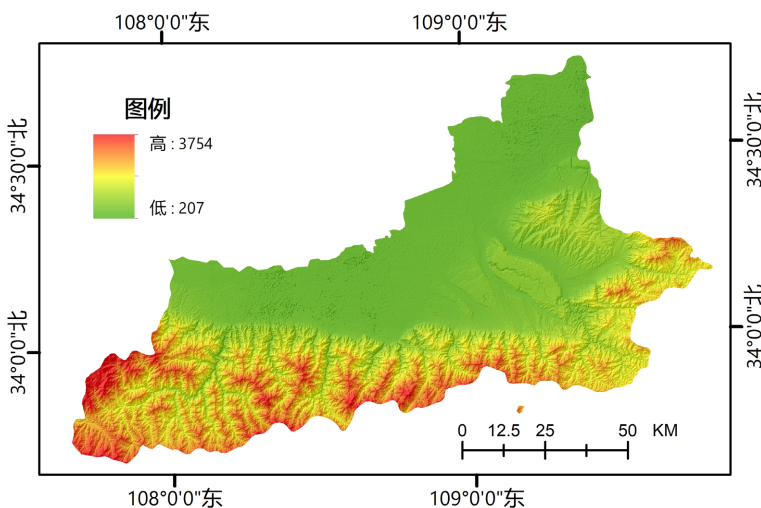


Figure 1. Hill-shading map of Xi'an city

图 1. 西安市地貌晕渲图

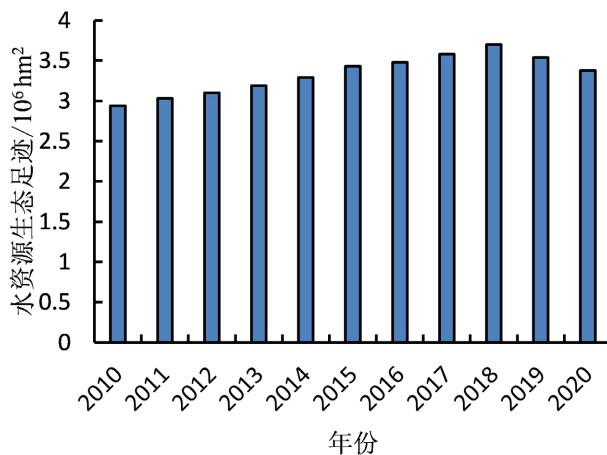


Figure 2. Changes in the ecological footprint of water resources in Xi'an from 2010 to 2020

图 2. 西安市 2010~2020 年水资源生态足迹变化

Table 1. Total precipitation and total water resources in Xi'an from 2010 to 2020

表 1. 西安市 2010~2020 年降水总量和水资源总量

| 年份 | 降水量/mm | 降水总量/亿 m ³ | 水资源总量/亿 m ³ | 年份 | 降水量/mm | 降水总量/亿 m ³ | 水资源总量/亿 m ³ |
|------|--------|-----------------------|------------------------|------|--------|-----------------------|------------------------|
| 2010 | 646.90 | 65.39 | 24.10 | 2016 | 571.78 | 57.80 | 21.56 |
| 2011 | 825.25 | 83.42 | 30.74 | 2017 | 764.4 | 77.30 | 24.45 |
| 2012 | 659.10 | 65.80 | 18.86 | 2018 | 583.03 | 59.90 | 21.90 |
| 2013 | 494.30 | 49.96 | 18.87 | 2019 | 705.17 | 75.8 | 27.62 |
| 2014 | 701.10 | 70.85 | 23.36 | 2020 | 732.9 | 78.8 | 26.78 |
| 2015 | 691.3 | 69.88 | 23.08 | | | | |

资料来源:《西安市水资源公报》《西安市统计年鉴》。

西安市是典型的内陆城市,其水资源总量,强烈依赖于降水量。如图 3 所示,本文研究时段内,西安市水资源生态承载力最大值为 $3.05 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (2011 年),最小值为 $1.87 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (2012 年),其他年份整体平稳波动。如表 1 所示:2011 年西安市降水总量为 $83.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源总量为 $30.74 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比上年增加 27.57% 和 27.55%;该年分水资源生态承载力也同比上年增加 27.62%,属于丰水年。将这 11 年间区域水资源生态承载力与区域降水量之间进行回归分析,如图 4 所示:两者之间的相关系数达 0.6557,呈显著正相关。数据分析表明:西安市水资源的承载力同样受区域降水量(自然因素)的强烈影响。

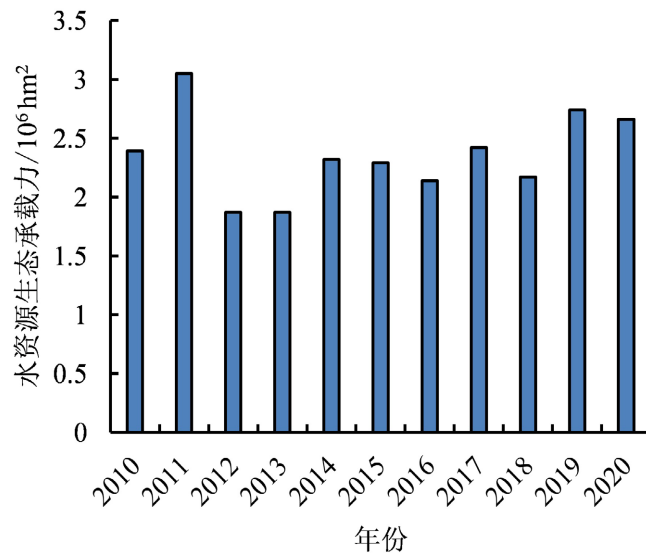


Figure 3. Changes of water resources ecological carrying capacity in Xi'an from 2010 to 2020

图 3. 西安市 2010~2020 年水资源生态承载力变化

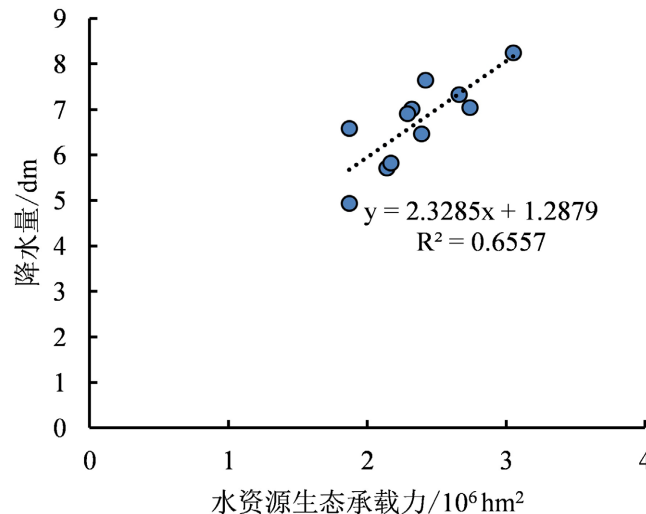


Figure 4. The relationship between precipitation and water resources ecological carrying capacity in Xi'an

图 4. 西安市年降水量与水资源生态承载力之间的关系

如表 2 所示:2010~2020 年 11 年间,西安市的水资源生态盈亏状态,大多数年份呈现生态赤字,只有 2011 年有少量的盈余。在水资源生态足迹逐年增加和降水量年际波动的交互影响下,区域生态亏损加剧。生态赤字

最大值出现在 2018 年，其值为 $-1.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，生态盈余唯一出现在 2011 年，约为 $0.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。西安市水资源的供给，对自然的依赖比较严重，随着经济的不断发展，对水资源的需求进一步加剧，区域水资源的供需失衡，甚至区域水资源的短缺，都是未来该区域可持续发展将要面临和亟待解决的重要问题。

Table 2. Per capita ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological surplus and ecological stress index of various water resources in Xi'an over the years/($10^6 \text{ hm}^2/\text{person}$)

表 2. 西安市历年各水资源人均生态足迹、生态承载力、生态盈余与生态压力指数/($10^6 \text{ hm}^2/\text{人}$)

| 年份 | 生态足迹 | 生态承载力 | 生态盈亏 | 生态压力 | 年份 | 生态足迹 | 生态承载力 | 生态盈亏 | 生态压力 |
|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| 2010 | 2.94 | 2.39 | -0.55 | 1.23 | 2016 | 3.48 | 2.14 | -1.34 | 1.63 |
| 2011 | 3.03 | 3.05 | 0.02 | 0.99 | 2017 | 3.58 | 2.42 | -1.16 | 1.48 |
| 2012 | 3.10 | 1.87 | -1.23 | 1.66 | 2018 | 3.70 | 2.17 | -1.52 | 1.71 |
| 2013 | 3.19 | 1.87 | -1.32 | 1.71 | 2019 | 3.54 | 2.74 | -0.8 | 1.29 |
| 2014 | 3.29 | 2.32 | -0.97 | 1.42 | 2020 | 3.38 | 2.66 | -0.72 | 1.27 |
| 2015 | 3.43 | 2.29 | -1.14 | 1.50 | | | | | |

资料来源：《西安市水资源公报》。

如图 5 所示，西安市万元 GDP 水资源生态足迹最大值出现在 2010 年，为 $9.06 \times 10^{-6} \text{ hm}^2$ ，最小值出现在 2020 年，为 $3.37 \times 10^{-6} \text{ hm}^2$ 。从各年数据来看，万元 GDP 水资源生态足迹总体上呈缓慢下降趋势，下降幅度最大的年份在 2011 年、2017 年。究其原因，一方面西安市在发展经济的同时，民众节水意识增强，水资源利用效率提高；另一方面政府各类污水的处理上取得了较好的成效。

如图 6 所示，西安市 2010~2018 年生态压力指数呈波动上升趋势，在 2019 年后有显著下降的趋势。最小值出现在 2011 年，约为 0.99；最大值出现在 2018 年，约为 1.70。上述情形表明：随着西安市社会经济活动的不断发展与加强，对水资源生态系统的干扰越来越大，面临水资源生态安全和水资源生态系统崩溃的风险和可能性也越来越大，但是在 2019 年之后，生态压力指数也有逐渐降低的趋势，这表明政府和社会对区域生态以及水资源可持续发展越来越重视。

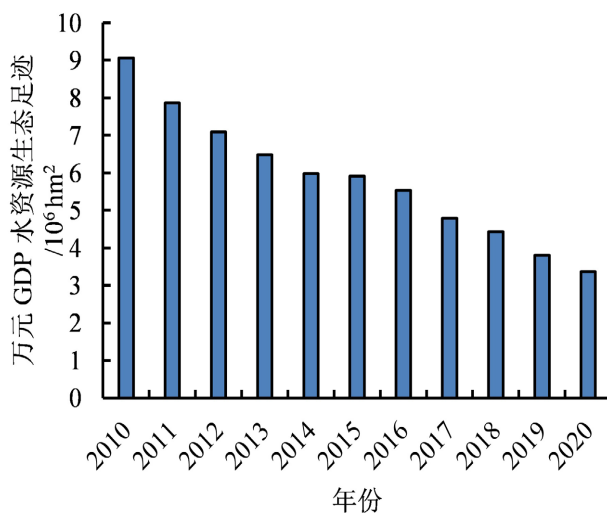


Figure 5. Changes of water resources ecological footprint in Xi'an from 2010 to 2020

图 5. 西安市 2010~2020 年万元 GDP 水资源生态足迹变化

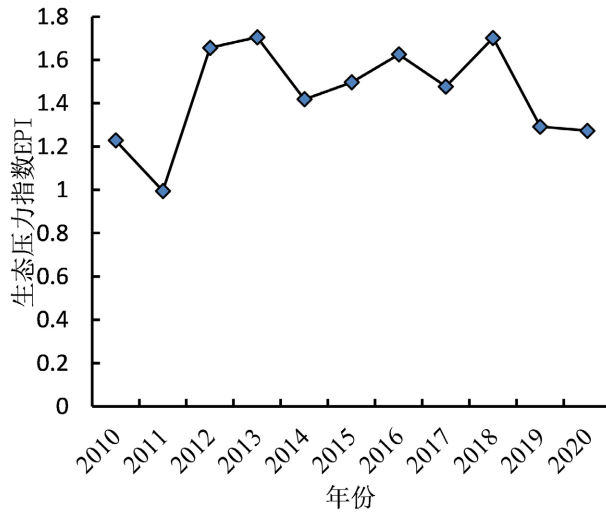


Figure 6. Changes in the ecological stress index of Xi'an from 2010 to 2020

图 6. 西安市 2010~2020 年生态压力指数变化

3.2. 西安市 2010~2020 年间各生产账户生态足迹分析

将区域水资源生态足迹，按照生产、生活和生态等 3 类生产账户进行分解，并分析各账户内的水资源生态足迹随时间的变化趋势。如图 7 所示，各账户中生产账户占比最大，约占总账户的 60%~75%。其次为生活账户，约占 20%~25%，最后是生态账户，约占总账户的 3%~15%。但随着可持续发展理念的不断落实与深化，生态文明建设的不断推进，西安市生态账户的比重逐年上升，且增速较快，生产账户比重有所下降，生活账户基本不变。

3.3. 西安市 2010~2020 年间三大产业水资源生态足迹分析

将区域水资源生态足迹中生产用水生态足迹，按照三大产业进一步细化区分，并分析各产业人均生产用水

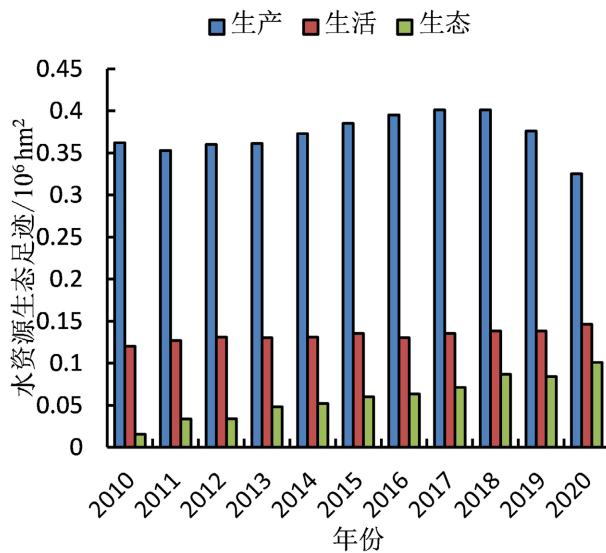


Figure 7. Changes in the ecological footprint of water resources per capita in each production account in Xi'an from 2010 to 2020

图 7. 西安市 2010~2020 年各生产账户人均水资源生态足迹变化

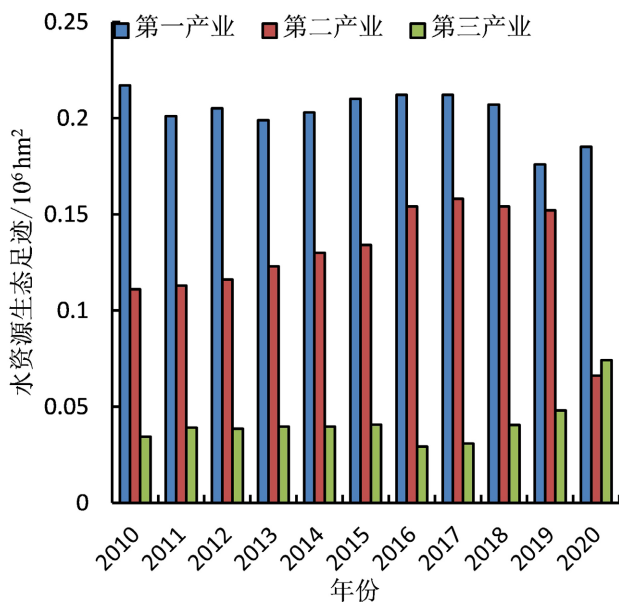


Figure 8. Changes in the ecological footprint of water resources per capita in the three major industries in Xi'an from 2010 to 2020

图 8. 西安市 2010~2020 年三大产业人均水资源生态足迹变化

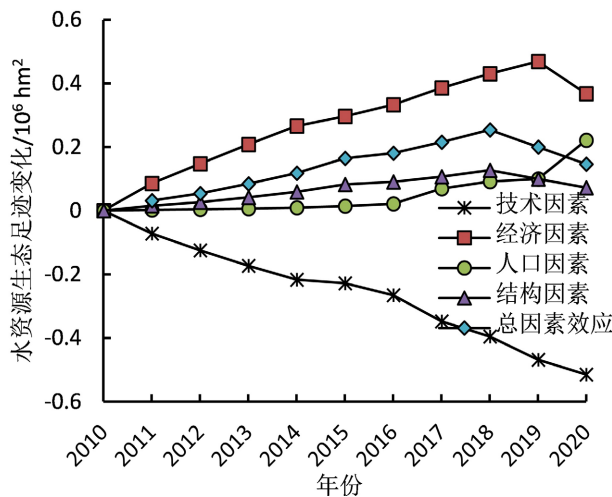


Figure 9. Decomposition of driving factors of ecological footprint of water resources in Xi'an from 2010 to 2020

图 9. 西安市 2010~2020 年水资源生态足迹因素分解

生态足迹随时间的变化趋势。如图 8 所示：西安市第一产业人均水资源足迹整体上呈现下降的趋势(2019~2020 年下降幅度最大，其余年份间变化平稳)；第二产业呈上升后陡降的态势(2020 年受新冠肺炎疫情疫情影响第二产业水资源生态足迹大幅下降)；第三产业的前期平稳，2016 年略有下降，随后逐渐上升，2019~2020 年增幅最大，整体变动趋势与第二产业相反。

3.4. 西安市 2010~2020 年间水资源生态足迹变化驱动因素分析

为了进一步探讨西安市水资源生态足迹变化的驱动因素，本文以 2010 年为基准年，采用 LMDI 模型的加和

形式对其进行因素分解, 计算 2010~2020 年西安市水资源生态足迹的分解因素, 并分析其趋势如下。

图 9 可知, 水足迹经济因素、人口因素和结构因素对西安市水资源生态足迹的增长起到正效应, 水足迹技术因素起到负效应。经济因素是西安市水资源生态足迹增长的主要因素, 结构和人口因素次之。上述结果表明, 程度十分有限, 且在 2019 年后有所下降; 对于技术因素来说, 整体呈下降趋势, 对水资源生态足迹过快增长的抑制作用明显, 反映了西安市加大污水治理和提高水资源重复回收利用等方面的技术投入。这就说明通过技术手段提高单位 GDP 的用水量, 可以在一定程度上减少水资源生态足迹。技术因素虽然很大程度上抑制西安市水资源生态足迹的增长, 但是其抑制作用远远比不上经济因素与人口因素引起的拉动作用, 从而导致西安市水资源生态足迹整体上呈现增长趋势。

4. 讨论

总体而言, 西安市是一个典型水资源不足的内陆城市, 为了缓解区域水资源短缺, 改善水生态赤字的情况, 首先: 应该做好节水的相关规划, 采取切实可行的措施, 实现节水的目标[29] [30]; 其次: 应该加强环境保护与治理, 尤其需要进一步加强渭河、黑河等现有水资源及其重要供水河流的环境保护与污染治理, 改善水环境, 提高水功能, 控制地表水污染、减少地下水超采、增大污水和雨水的回用量, 使有效供水量增加, 提高城市水资源和水环境的承载力[31] [32]; 再次: 由本研究对西安市水资源生态足迹在各种账户、各个产业之间变化趋势的对比分析, 也可以看出产业调整对水资源需求的影响。今后西安市也应该在充分考虑社会经济现实情况的基础上, 进行产业结构的调整和优化; 促成水资源在各产业之间的合理分配, 提高其利用效率[14] [33], 从而促进西安市整体社会的可持续发展。

从水资源生态足迹驱动因素分析方面来看, 经济发展因素是导致水资源生态足迹增长的主要原因, 技术因素是降低水资源生态足迹的关键因素, 西安市应加大清洁生产、节能降耗、回收利用等技术方面的投入。此外, 在上述各项措施仍无法满足西安市整体用水需求时, 亦可适当考虑实施开辟当地新水源或者采取区外调水的措施[31]。从而统筹兼顾, 多种渠道谋取解决西安市区域水资源短缺的问题。

5. 结论

1) 2010~2020 年西安市水资源生态足迹呈逐年上升又下降(自 2019 年起)趋势; 总水资源生态足迹中生产用水生态足迹占比最大, 生态用水生态足迹以较快增速逐年上升。三类产业人均水资源生态足迹中, 一产呈现缓慢下降趋势, 2019~2020 年下降幅度最大, 二产呈上升后陡降的态势(2020 年受新冠肺炎疫情影响大幅下降); 三产前期平稳, 随后逐渐上升, 2019~2020 年增幅最大, 整体变动趋势与二产相反。万元 GDP 水资源生态足迹总体呈缓慢下降趋势。

2) 西安市水资源生态承载力受区域降水影响较大, 二者呈明显的正相关关系; 除 2011 年外, 西安市的水资源生态盈亏大多年份处于生态赤字状态, 而且赤字在 2019 年前有上升的趋势, 在 2019 年后赤字情况得到一定的缓解。在研究时段内西安市水资源生态压力指数除个别年份外, 大多数年份呈上升的趋势, 但整体有下降趋势, 水资源生态压力有所放缓。

3) 影响西安市水资源生态足迹的最主要驱动因子为经济因素。技术因素对水资源生态足迹的增加起到抑制作用, 通过提高单位 GDP 的用水量, 可以减少水资源生态足迹。

各种迹象表明: 西安市随经济的发展, 用水需求增加, 水资源生态足迹逐年扩大; 但水资源的供给对自然的依赖强, 供需矛盾突出, 长期处于生态赤字状态, 未来水资源短缺或将成为区域可持续发展重要的制约因素。

基金项目

国家自然科学基金: 多源观测信息与陆表水碳通量过程模型的数据同化研究(41301451); 中央高校基本科研

业务费：基于路径和空间异质运算的遥感影像地表信息提取分析方法研究(2452018144)。

参考文献

- [1] 侯焮晨, 谢世友. 中小城市水资源生态足迹与生态承载力时空分析——以宿迁市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(12): 134-141.
HOU Yinchen, XIE Shiyu. A spatial and temporal analysis of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in small and middle sized cities: A case study of Suqian City. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(12): 134-141. (in Chinese)
- [2] 周文华, 张克锋, 王如松. 城市水生态足迹研究——以北京市为例[J]. 环境科学学报, 2006(9): 1524-1531.
ZHOU Wenhua, ZHANG Kefeng and WANG Rusong. Urban water ecological footprint analysis—A case study in Beijing, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006(9): 1524-1531. (in Chinese)
- [3] 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.
TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3559-3568. (in Chinese)
- [4] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
FENG Zhiming, YANG Yanzhao, YAN Huimin, *et al.* A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395. (in Chinese)
- [5] 赵亮生, 邱书志, 薄乖民, 等. 洮河国家级自然保护区生态需水与水资源承载力评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 192-197.
ZHAO Liangsheng, QIU Shuzhi, BO Guaimin, *et al.* Ecological water demand and water resources carrying capacity in Taohe River national nature reserve. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 192-197. (in Chinese)
- [6] WILLIAM, E. R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leave out? *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130. <https://doi.org/10.1177/095624789200400212>
- [7] WACKENAGEL, M., WILLIAM, E. R. Our ecological footprint reducing human impact on the earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 2-17.
- [8] LUCK, M. A., JENERETTE, G. D. and WU, J. G. The urban funnel model and the spatially heterogenous ecological footprint. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 782-796. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0046-8>
- [9] VENETOULIS, J. Assessing the ecological impact of a university: The ecological footprint for the University of Redlands. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2001, 2(2): 180-196. <https://doi.org/10.1108/14676370110388381>
- [10] 卢艳, 于鲁冀, 王燕鹏, 等. 河南省水资源生态足迹和生态承载力分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 182-186.
LU Yan, YU Lujin, WANG Yanpeng, *et al.* Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Henan province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 182-186. (in Chinese)
- [11] 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.
ZHANG Yangan, ZHENG Zhifeng and WANG Yonghong. Research and analysis on ecological carrying capacity of Hanzhong city. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 356-360. (in Chinese)
- [12] 张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1601-1610.
ZHANG Yi, ZHANG Heping, LI Fengsheng, *et al.* Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved mode. *Resources Science*, 2013, 35(8): 1601-1610. (in Chinese)
- [13] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565.
WANG Wenguo, HE Mingxiong, PAN Ke, *et al.* Analysis of spatiotemporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan province. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1555-1565. (in Chinese)
- [14] 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[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088.
LIU Zigang, ZHENG Yu. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: A case study of Huzhou city. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1083-1088. (in Chinese)
- [15] 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 Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, *et al.* Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286. (in Chinese)
- [16] 孟丽红, 叶志平, 袁素芬, 等. 江西省 2007~2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 256-261.
MENG Lihong, YE Zhiping, YUAN Sufen, *et al.* Dynamic characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Jiangxi province during 2007-2011. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 256-261. (in Chinese)

- [17] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 249-253.
XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 249-253. (in Chinese)
- [18] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.
FAN Xiaoliu. Research and application of water resources ecological footprint. Master's Thesis, Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [19] 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.
ZHANG Yue. Water resources and sustainable development in china. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 杨屹, 樊明东, 张景乾. 陕西省区域生态足迹动态变化及驱动因素差异研究[J]. 生态科学, 2018, 37(3): 67-76.
YANG Yi, FAN Mingdong and ZHANG Jingqian. Study of dynamic changes and driving factors of regional ecological footprint of Shaanxi province. *Ecological Science*, 2018, 37(3): 67-76. (in Chinese)
- [21] 王俭, 张朝星, 于英谭, 等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用——以沈阳市为例[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2257-2262.
WANG Jian, ZHANG Chaoxing, YU Yingtan, *et al.* Calculation model of urban water resources ecological footprint and its application: A case study in Shenyang city of northeast China. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2257-2262. (in Chinese)
- [22] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016(5): 5-21.
SHI Dan, WANG Junjie. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint. *China Industrial Economics*, 2016(5): 5-21. (in Chinese)
- [23] 王书华, 毛汉英, 王忠静. 生态足迹研究的国内外近期进展[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 776-781.
WANG Shuhua, MAO Hanying and WANG Zhongjing. Progress in research of ecological footprint all over the world. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 776-781. (in Chinese)
- [24] 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[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 19-24+32.
SHAO Jun, LU Mansheng, DU Tao and WANG Zhengxiang. The ecological footprint of water resources in the Yangtze River basin and its driving factors. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(12): 19-24+32. (in Chinese)
- [25] ANG, B. W., LIU, F. L. A new energy decomposition method. *Energy*, 2001, 26(6): 1-12.
[https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00022-6)
- [26] ANG, B. W., ZHANG, F. Q. and CHOI, K.-H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. *Energy*, 1998, 23(6): 489-495. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00016-4)
- [27] 杨洋, 丁镭, 曾克峰. 基于LMDI模型的广西水足迹驱动力分析[J]. 国土资源科技管理, 2017, 34(2): 20-29.
YANG Yang, DING Lei and ZENG Kefeng. The driving force analysis of Guangxi water footprint based on LMDI model. *Land and Resources Science and Technology Management*, 2017, 34(2): 20-29. (in Chinese)
- [28] 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[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 370-376.
JIA Chenzhong, QIAO Yangyuan, GUAN Gege and ZHAO Kaili. Temporal and spatial changes of water resources ecological footprint and driving factors in Shanxi province. *Research on Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 370-376. (in Chinese)
- [29] 樊春贤. 西安市水资源可持续利用的探讨[J]. 地下水, 2007(1): 17-19.
FAN Chunxian. Discussion on the sustainable utilization of water resources in Xi'an city. *Groundwater*, 2007(1): 17-19. (in Chinese)
- [30] 陈爱侠. 陕西省水资源利用效率及其影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 178-182.
CHEN Aixia. Analysis on the utilization efficiency of water resource in Shaanxi province and its effecting factors. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(1): 178-182. (in Chinese)
- [31] 薛小杰, 惠泱河, 黄强, 等. 城市水资源承载力及其实证研究[J]. 西北农业大学学报, 2000(6): 135-139.
XUE Xiaojie, HUI Yanghe, HUANG Qiang, *et al.* Research on city water resources capacity and its practical example. *Journal of Northwest Agricultural University*, 2000(6): 135-139. (in Chinese)
- [32] 田坤, 张广军, 翟平阳. 黑龙江流域黑河江段的水资源承载能力评价研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 18-21, 46.
TIAN Kun, ZHANG Guangjun and ZHAI Pingyang. The studies on the appraisal of water resources carrying capacity along Heilong River valley in Heihe. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(1): 18-21, 46. (in Chinese)
- [33] 唐亦功, 李泰运, 李茜茜. 西安市水资源可持续利用措施研究[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2011, 40(5): 132-136.
TANG Yigong, LI Taiyun and LI Qianqian. A study of measures for sustainable utility of Xi'an's water resources. *Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2011, 40(5): 132-136. (in Chinese)