

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.01

宁夏沿黄城市带碳水足迹及其关联关系研究

刘子西¹, 席睿¹, 黑正军¹, 路畅¹, 唐莲^{1,2,3}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021)

摘要: 减碳、节水是黄河流域可持续发展面临的重要问题。从水资源生态及碳足迹角度出发, 将区域水碳关系进行耦合研究, 有助于揭示水资源质量与碳排放之间的关系, 为宁夏沿黄城市带实现生态环境保护可持续均衡发展提供指导。基于水资源生态足迹与碳足迹理论, 从时空分布差异、水碳关联性特征入手, 计算并分析了2010—2019年宁夏沿黄城市带4个中心城市的碳足迹、水资源生态足迹及其时空变化趋势。结果表明: 区域内已经形成了以吴忠市-银川市为重心的碳排放和水生态压力区, 且与经济高度发展区域有空间重合, 但不同地区由于产业结构及资源条件的不同, 碳排放与水资源的关联性差异明显, 其中水质生态足迹与碳足迹之间的关联性更显著, 呈现出水、碳、环境、产业等发展的区域不均衡性。

关键词: 水资源生态足迹; 碳足迹; 水碳关联性; 时空特征; 宁夏沿黄城市带

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)02-0001-08

Carbon and water footprints of the Yellow River Urban Belt in Ningxia and their correlations

LIU Zixi¹, XI Rui¹, HEI Zhengjun¹, LU Chang¹, TANG Lian^{1,2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Educations, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Carbon reduction and water conservation are important issues that affect the sustainable development of the Yellow River Urban. From the perspective of water resources ecology and carbon footprint, the coupling study of regional water – carbon relationship will help reveal the relationship between the quantity and quality of water resources and carbon emissions, and provide some guidance for the sustainable and balanced development of ecological environment protection along the Yellow River Urban Belt in Ningxia. Based on the theory of water resources ecological footprint and carbon footprint, the carbon footprint, water resources ecological footprint and their spatiotemporal change trend of the four central cities along the Yellow River Urban Belt in Ningxia were calculated and analyzed from the perspective of spatiotemporal distribution differences and water – carbon correlation characteristics. The results show that a carbon emission and water ecological pressure region has formed, with Wuzhong and Yinchuan as the center of gravity, which overlaps with the highly developed region in the belt; however, due to the different industrial structure and resource conditions, the correlation between carbon emissions and water resources in different regions is significantly differentiated, among which the correlation between water quality ecological footprint and carbon footprint is more significant, showing the regional imbalance of water, carbon, environment and industry development.

收稿日期:2022-09-04; 修回日期:2023-02-09

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2022AAC03093); 宁夏高等学校一流学科(水利工程学科)项目(NXYLXK2021A03); 2018宁夏重点研发计划项目(2018BEG03008)

作者简介:刘子西(1996—),女,宁夏银川人,博士研究生,研究方向为旱区水资源评价。

通讯作者:唐莲(1975—),女,宁夏银川人,博士,教授,硕士生导师,研究方向为旱区水资源调控理论及技术。

Key words: ecological footprint of water resources; carbon footprint; water – carbon correlation; spatio-temporal characteristics; the Yellow River Urban Belt in Ningxia

1 研究背景

水资源短缺问题是社会发展的关键限制性因素之一,随着国家“碳达峰、碳中和”目标和“黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设”的提出,减少碳排放已经成为与水资源节约同等重要的环境问题,从水资源角度入手,探索水资源短缺、水质污染与碳排放问题之间的关系是目前研究的重点。

近几年国内外学者逐渐从水资源角度出发解决碳排放问题和生态问题,将碳足迹的研究与水资源问题进行耦合对不同地区的碳水足迹进行评价,寻找碳排放与水资源的内在关联性及相互关系,以期同步解决区域水碳问题。目前对碳足迹与水足迹的综合分析主要包括碳水关联程度、碳水足迹空间分异情况以及二者之间相互影响等方面^[1-4]。国外学者 Casolani 等^[5]利用生命周期法计算了意大利小麦生产的碳足迹与水足迹,明确了二者具有一定内在关联性,共同关注可提高小麦生产的可持续性; Bonamente 等^[6]通过分析碳水足迹相关性,发现通过降低碳足迹或水足迹强度均可实现环境改善的目的。国内学者近几年也开展了碳水关联性的研究。杨文娟等^[7]从不同产业角度出发,通过对河南省不同产业的碳水足迹进行分析,指出了产业之间碳水足迹的差异性和影响因素;贾利^[8]对吉林省玉米生产中的碳足迹与水足迹的时空关系进行了研究,并通过皮尔逊相关系数法计算玉米生产过程中碳足迹与水足迹的相关性,分析了不同地区间两者关系的差异性。相关研究表明,不论是工业还是农业生产,碳水足迹之间均存在一定的联系,从节水减碳综合治理角度出发,关注二者的相互联系有助于全面实现生态环境改善。在“双碳”目标下进行碳排放控制过程中,水资源是重要的影响因素,通过调节水资源使用能够对碳足迹产生明显的影响^[6],“节水优先”“清洁水能”“生态水利”等水利策略将有效推进节能减排目标的实现^[9]。

在此背景下,有效评估碳水关系及其相互影响能够为碳水资源可持续开发利用提供决策依据。目前国内的研究大多以碳足迹与水足迹之间的关系为主,对于水资源生态足迹与碳足迹之间关系的关注较少,而水资源生态足迹通过量化水资源的消耗量,将水资源消费转化为水域面积进行计算,不仅覆盖了地表水和地下水部分,同时从各产业用水、土

地面积、人口和降水量等角度综合分析,将水资源的使用量转化为维持人们正常的生产生活、水资源消费以及消纳水污染所必须的生态生产性面积^[10],由此可见水资源生态足迹对水资源的评价较为全面且更加注重水资源的作用,朱向梅等^[11]以黄河流域为研究对象,对碳足迹和水资源生态足迹的广度和深度进行关联度分析,将碳水关系分析实践拓展到了水资源及生态领域,取得了较好的效果。

因此,本文以宁夏沿黄城市带为研究区,从碳水关联的角度出发在量化碳及水资源生态足迹的基础上,进一步分析碳足迹与水资源生态足迹的内在关联性和影响因素差异,明确宁夏沿黄城市带不同区域发展过程中水、碳、生态之间的相互关系,为区域节水、碳减排、经济社会与生态环境保护平衡发展提供依据。

2 研究区概况

宁夏沿黄城市带位于宁夏回族自治区北部,是宁夏回族自治区为促进区域经济发展打造的一体化经济城市带,区域以银川市为中心,以石嘴山市、吴忠市和中卫市 3 个地级市为主干而组成。宁夏沿黄城市带因覆盖宁夏全省内整个黄河流域而得名,是宁夏地区的政治、经济和社会发展的重点区域,也是西部经济发展的重要区域和主要交通枢纽之一。本文以宁夏沿黄城市带银川市、石嘴山市、吴忠市和中卫市的重点区域为研究区域,分析各城市碳足迹和水资源生态足迹特征及两者的时空关联性。研究区范围如图 1 所示。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

本研究中碳足迹模型所需要的能源消费量、不同地区降水量、不同类型土地面积以及经济社会发展状况等相关数据来自 2010—2019 年《中国城市统计年鉴》《银川统计年鉴》《石嘴山市统计年鉴》《吴忠市统计年鉴》《中卫市统计年鉴》《宁夏统计年鉴》等,部分年鉴中缺失数据来自各个地区统计局,另外水资源生态足迹模型中各领域用水数据来源于《宁夏水资源公报》及各个地市水务局。

3.2 研究方法

3.2.1 碳足迹计算 目前较为被认可的碳足迹理论有 4 种:投入产出法、生命周期法、IPCC(Intergov-

ernmental Panel on Climate Change)计算法和生态足迹法^[12],其中生态足迹法是在生态足迹基础上发展而来的,该方法能够对区域间能源的消耗、碳排放的强度和生态空间的占用情况进行合理的解释和说明,对于反映区域间实际碳足迹和碳排放具有较好的意义^[13]。

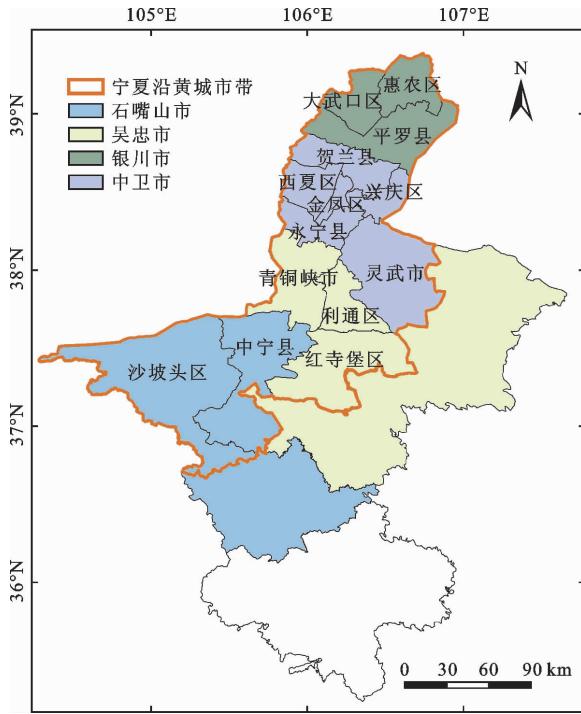


图1 研究区示意图

本文的碳排放计算是参考生态足迹碳排放计算方法,将碳足迹排放转化为所占用的生态土地面积:在化石能源燃烧过程中会排放大量的CO₂,因此通过收集研究区内的各种能源消耗量,乘以对应的标准煤转化系数和碳排放系数即可从宏观上得到区域内的碳排放量。最后用净生态系统生产量量化为生态生产性土地面积,通过植被对碳的净吸收能力与能源消耗碳排放相转化,得到各个区域内的碳足迹(即区域内植被对碳吸收能力)^[6]。

(1) 碳排放计算模型

$$C_e = \sum (Q_{ei} \cdot S_{ei} \cdot D_{ei}) \quad (1)$$

式中: C_e 为碳排放量,t; Q_{ei} 为第*i*种能源消费量,t; S_{ei} 为第*i*种能源折算为标准煤参考系数; D_{ei} 为各类能源对应的CO₂排放系数,本文根据大部分学者的研究及本研究区实际情况,选取原煤、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油、液化石油气和天然气共9种主要能源作为研究对象,各类能源系数取值均来自IPCC碳排放计算给定值^[14],如表1所示。

表1 主要能源类折算系数

能源种类	标准煤折算系数 S_{ei}	CO ₂ 排放系数 D_{ei}
原煤	0.7143	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
原油	1.4286	0.5857
燃料油	1.4286	0.6185
汽油	1.4714	0.5538
煤油	1.4714	0.5714
柴油	1.4571	0.5921
液化石油汽	1.7143	0.5042
天然气	1.33×10^{-4}	0.4483

注:表中焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油和液化石油汽的标准煤折算系数单位为kg/kg;天然气的标准煤折算系数单位为t/m³。

(2) 碳汇计算模型

$$C_s = S_m \cdot C_f + S_n \cdot C_g + S_p \cdot C_p \quad (2)$$

式中: C_s 为森林和草地的碳吸收量,t; S_m 、 S_n 、 S_p 分别为林地、草地、耕地的面积,hm²; C_f 、 C_g 、 C_p 分别为林地、草地、耕地的碳吸收系数,t/hm²,根据Warrick等^[15]的研究,取 $C_f = 3.81$ t/hm²、 $C_g = 0.95$ t/hm², C_p 表征耕地的固碳能力,参考朱向梅等^[11]计算的黄河流域省份耕地固碳系数,取 $C_p = 0.1532$ t/hm²。

(3) 碳足迹、碳生态承载力及碳生态盈余(赤字)计算模型

根据碳排放和碳汇值可计算得到碳足迹强度、碳生态承载力以及碳生态盈亏情况。碳足迹计算公式如下^[11]:

$$C_{ef} = C_e \left(\frac{P_f}{C_f} + \frac{P_g}{C_g} + \frac{P_p}{C_p} \right) \quad (3)$$

式中: C_{ef} 为碳足迹,hm²; P_f 、 P_g 、 P_p 则表示研究区内森林、草地、耕地所对应的碳吸收比例值,本文参考朱向梅等^[11]和谢鸿宇等^[16]的相关研究,分别取 $P_f = 52.33\%$ 、 $P_g = 9.57\%$ 、 $P_p = 38.10\%$ 。

3.2.2 水资源生态足迹模型 传统的生态足迹在水资源领域的内涵存在一定的缺失,因此为了弥补Wackernage等^[17]建立的生态足迹模型中水资源账户在经济社会发展和生态环境保护中的缺失,国内学者范晓秋^[18]在传统研究^[17]提出的生态足迹基础上进行了创新,将扩展后的水资源账户引入到生态足迹中,完善了水资源部分的生态足迹,被国内外学者广泛认可和使用。

本文将水资源生态足迹划分为水量生态足迹和水质生态足迹^[19]分别进行计算,水量生态足迹可以直接反映人类在从事生产消费生活中的水资源消耗

量^[20],水质生态足迹则更多是为了反映在稀释污水时用作生态的水资源消耗情况^[21]。水资源生态足迹模型计算公式如下:

$$W_{ef} = W_f + E_{fwq} \quad (4)$$

式中: W_{ef} 为水资源生态足迹, hm^2 ; W_f 为水量生态足迹, hm^2 ; E_{fwq} 为水质生态足迹, hm^2 。

(1) 水量生态足迹计算模型

$$W_f = N \sum_{i=1}^3 W_{efi} = N \sum_{i=1}^3 \left(r_{\text{水}} \cdot \frac{AW_i}{Ap_{\text{水}}} \right) \quad (5)$$

式中: W_f 为水量生态足迹, hm^2 ; N 为区域人口数; i 为研究区域内的水资源类型数; W_{efi} 为第*i*类水资源类型的人均水资源生态足迹, hm^2 ; $r_{\text{水}}$ 为全球水资源均衡因子,参照黄林楠等^[22]和世界自然基金会(World Wide Fund for Nature,WWF)的计算结果,取值为 $r_{\text{水}} = 5.19$; AW_i 为第*i*类水资源的人均消耗量, m^3 ; $Ap_{\text{水}}$ 为国家水资源平均生产能力, m^3/hm^2 ,本文根据全球多年统计数据得出全球产水模数取值为 $3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ^[23]。

(2) 水质生态足迹模型

水质生态足迹主要反映研究区域内主要水体污染物的排放情况并将其量化为消耗的水资源量后转化成生产性土地面积。目前在已有的水质生态足迹的研究中,学者们大多选择化学需氧量(COD)和氨氮(NH_3)作为主要的污染源进行计算,同时根据《宁夏水资源公报》可知,COD和 NH_3 是研究区内主要的污染源,因此本文在计算水质生态足迹时选用COD和 NH_3 污染物作为量化对象。水体在稀释污染物时可以同时稀释多种污染物,因此本文选取的水质生态足迹计算公式如下^[23]:

$$E_{fwq} = \max \left(\frac{A_{\text{COD}}}{P_{\text{COD}}}, \frac{A_{\text{NH}_3}}{P_{\text{NH}_3}} \right) \quad (6)$$

式中: E_{fwq} 为水质生态足迹, hm^2 ; A_{COD} 、 A_{NH_3} 分别为COD和 NH_3 的排放量,t; P_{COD} 和 P_{NH_3} 分别为单位水域对污染物COD和 NH_3 的吸纳能力^[24], t/hm^2 ,参考《地表水质量环境标准》(GB 3838—2002),取 $P_{\text{COD}} = 0.0629 \text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $P_{\text{NH}_3} = 0.0031 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。

4 宁夏沿黄城市带碳足迹与水资源生态足迹时空特征分析

4.1 碳足迹时空特征分析

根据碳足迹模型计算得到2010—2019年宁夏沿黄城市带4个城市的碳足迹如图2所示。由图2可知,宁夏沿黄城市带4市中,中卫市始终为碳足迹

最小的城市,其他3市的碳足迹则发生了显著的变化,其中银川市增幅明显,石嘴山市则逐步减小,吴忠市呈现缓慢波动增大趋势。从经济方面来看,宁东能源化工基地属于银川市行政区划,其多年来的迅速发展使得能源碳足迹排放强度增幅明显,而石嘴山市碳足迹的减小则与老煤炭工业基地的萎缩息息相关。2016—2018年各市的碳足迹略有减小,但2018—2019年各市的碳足迹又发生了小幅度的反弹,短期看有可能是“碳达峰”政策的初步响应。从碳足迹数值上看,2010年石嘴山市碳足迹为 $0.536 \times 10^8 \text{ hm}^2$,约为银川市碳足迹的1.6倍,随着时间推移,银川市碳足迹明显增大,而石嘴山市则呈减小趋势,至2017年,银川市碳足迹达到 $1.49 \times 10^8 \text{ hm}^2$,是石嘴山市碳足迹的3.9倍、吴忠市碳足迹的5.8倍,而石嘴山市、吴忠市、中卫市之间碳足迹的差异性逐渐缩小。

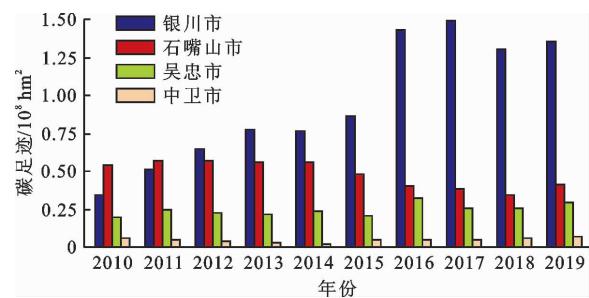


图2 2010—2019年宁夏沿黄城市带4个城市的碳足迹

4.2 水资源生态足迹时空特征分析

根据模型计算结果可知,2016年研究区各市水资源生态足迹发生了明显的变化,故本文选择2010、2016及2019年3个重点年份计算数据进行空间分类,分析研究区水资源的空间变化趋势。

4.2.1 水量生态足迹 3个重点年份各市水量生态足迹计算结果及构成变化如图3所示。由图3可以看出,宁夏沿黄城市带各市的水量生态足迹呈现先减小后增大的趋势。水量生态足迹排放重心随着时间的推移逐渐从银川市转向吴忠市,即整体重心向东南方向偏移。石嘴山市水量生态足迹在研究时段内一直处于最低水平,2010年石嘴山市的水量生态足迹为 $1.123 \times 10^6 \text{ hm}^2$,中卫市的水量生态足迹为 $1.124 \times 10^6 \text{ hm}^2$,之后中卫市的水量生态足迹处于较明显的波动上升的趋势,至2016年明显大于石嘴山市水量生态足迹;银川市2010年水足迹为 $2.264 \times 10^6 \text{ hm}^2$,之后年份水量生态足迹虽有所波动但相比于2010年均明显减小;吴忠市2010年水

量生态足迹为 $1.693 \times 10^6 \text{ hm}^2$,随后水量生态足迹处于波动上升的状态,2016年为波动的转折点。

生产用水足迹在水量生态足迹中占比最大,其中吴忠市生产用水足迹占总水量生态足迹的比例最大,达到97%左右,银川市生产用水足迹占总水量生态足迹的比例最小,平均约为85%。生产用水足迹包括农业、工业以及服务业用水,而吴忠市作为4座城市中面积最大的城市,农业生产用水量较大,随着近

几年经济的快速发展,服务业用水量也逐年上升;银川市作为省会城市,各个领域用水相比其他城市更加均衡,因此生产用水所占比例最小。生态用水代表区域范围内维持各类生态系统正常运转的水资源量,这部分水资源不作为社会和经济发展所用,仅用于区域间生态平衡,从区域水量生态足迹及占比可知银川市生态用水足迹及所占比例最高,吴忠市最低;各市生活用水量占比最小,产生的水足迹最小。

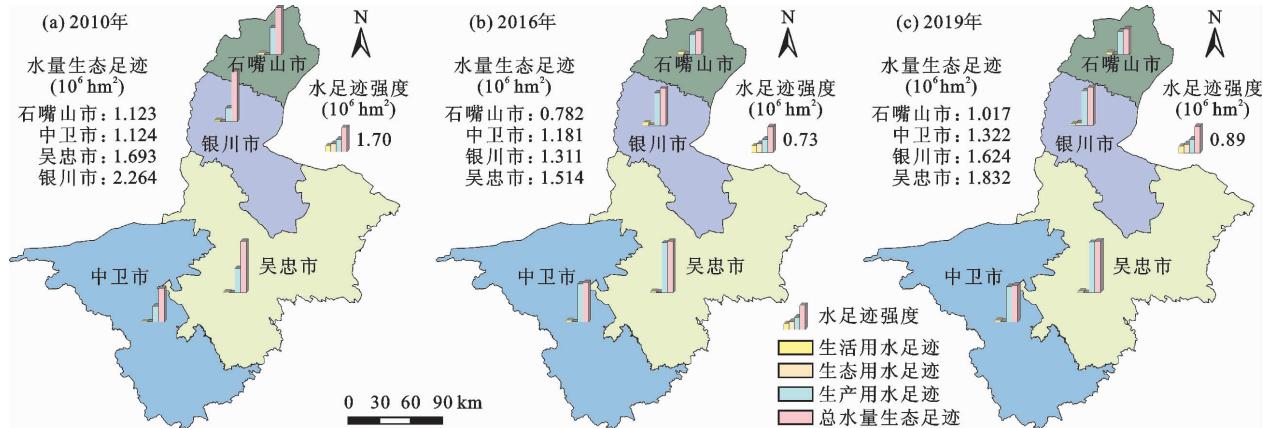


图3 2010—2019年重点年份宁夏沿黄城市带各市水量生态足迹及其构成变化

4.2.2 水质生态足迹 通过水质生态足迹模型计算可知,地区间稀释NH₃产生的水质生态足迹量均大于稀释COD时产生的水质生态足迹量,因此各个地区稀释NH₃产生的水足迹即为对应的水质生态足迹,计算结果显示各个地区的水质生态足迹逐年减小,表明研究区内的水质情况正在逐渐好转。

3个重点年份各市水质生态足迹计算结果如图4所示。由图4可知,在研究时段内银川市水质生

态足迹一直远远超过其他3市。银川市人口密度和城镇化率均较高,在研究时段内银川市平均每年城市生活NH₃排放量为2 644 t,而吴忠市、中卫市和石嘴山市分别为1 011、882和856 t,与银川市相差较大;同时经济快速发展带来的工业NH₃排放较多,研究时段内银川市平均每年工业NH₃排放量可达1 641 t,而吴忠市、中卫市和石嘴山市分别为1 417、1 234和725 t。

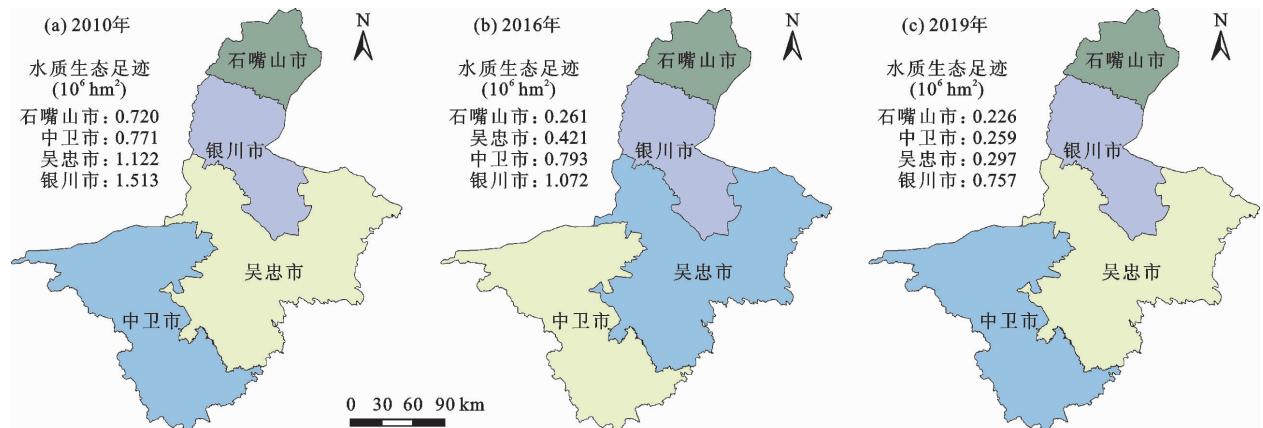


图4 2010—2019年重点年份宁夏沿黄城市带各市水质生态足迹

4.2.3 水资源生态足迹 水量生态足迹与水质生态足迹之和即为水资源生态足迹总量,2010—2019年宁夏沿黄城市带各市水资源生态足迹见图5。从

计算数据及图5可知,研究时段内各市的水资源生态足迹总体大致呈现波动减小趋势,2015—2016年水资源生态足迹减小幅度较大,平均从 2.332×10^6

hm^2 降低至 $1.834 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 2016 年之后又有小幅回弹; 银川市水资源生态足迹一直远远超过其他 3 市, 其次为吴忠市; 中卫市水资源生态足迹在 2015 年之前有逐渐增大的趋势, 随后又经历了一段下降的过程; 石嘴山市水资源生态足迹一直处于较低水平且呈现出明显的减小趋势。

4.3 宁夏沿黄城市带碳-水足迹时空关联性分析

为进一步了解碳-水足迹之间的时空关系, 对各市两者的关系进行分析。首先通过对足迹计算结果共线性诊断明确各足迹间是否存在明显的共线性, 即对碳足迹与水足迹进行一元线性回归分析与预测, 通过散点图直观反映出二者的变化趋势和内在的相关性, 再根据回归标准差以及二者的协方差系

数, 分析足迹之间的联系及两组数据之间的显著性差异情况。以银川市为例, 碳-水足迹相关性分析如图 6 所示, 碳-水足迹相关性指标值如表 2 所示。其他城市分析方法同上。

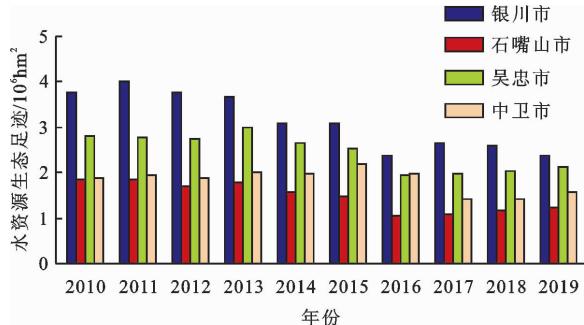


图 5 2010—2019 年宁夏沿黄城市带各市水资源生态足迹

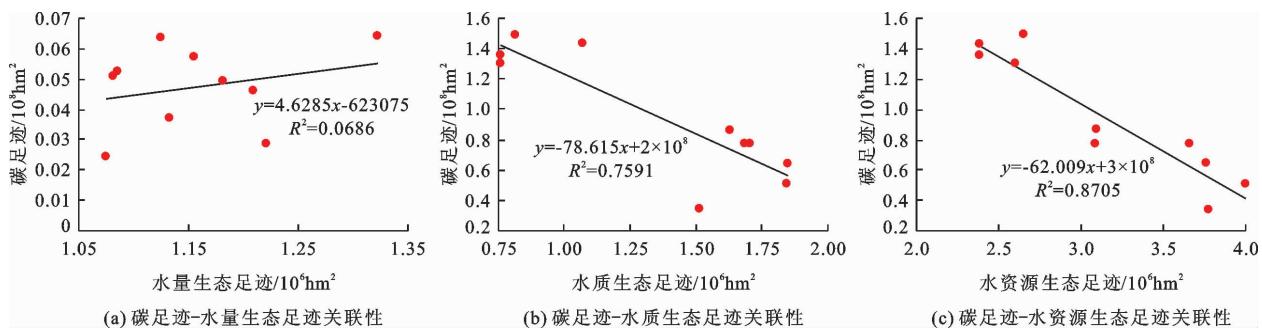


图 6 银川市碳-水足迹相关性分析

表 2 银川市碳-水足迹相关性指标值

足迹	指标	碳足迹	水质生态足迹	水量生态足迹	水资源生态足迹
碳足迹	皮尔逊相关性	1	-0.871 **	-0.568	-0.933 **
	Sig. (双尾)		0.001	0.086	0
	个案数	10	10	10	10

注: “**”表示在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

从图 6 与表 2 可知, 银川市碳足迹与水质生态足迹、水资源生态足迹呈现的线性关系较好, 而与水量生态足迹的线性关系并不明显, 碳足迹与水质生态足迹相关系数为 -0.871, 且 P 值小于 0.01, 表明碳足迹与水质生态足迹呈显著负相关; 碳足迹与水资源生态足迹的相关性达到 -0.933, 且 P 值为 0, 表明银川市碳足迹与水资源生态足迹呈现显著的负相关, 因此在研究时段内, 水质生态足迹和水资源生态足迹的减小会带来碳足迹的增加。同理对研究时段内其他 3 市的分析结果表明, 石嘴山市碳足迹与水质生态足迹、水资源生态足迹呈现较好的线性关系, 而与水量生态足迹线性拟合较差; 吴忠市碳足迹与水质生态足迹和水量生态足迹之间的内在关系不明显, 与水资源生态足迹之间存在一定的关系但关联度相对较低; 中卫市的碳足迹与各类水足迹之间

几乎不呈现关联关系^[25]。

4.4 宁夏沿黄城市带碳足迹与水资源生态足迹分布特征

根据前文分析可知, 沿黄城市带内不同城市间的碳-水足迹关联性空间差异明显, 因此本文仍选取研究时段内 2010、2016 及 2019 年 3 个重点年份, 进行碳-水足迹空间分布特征分析, 如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 在 2010—2019 年研究区内的水资源生态足迹排放强度重心变化不明显, 而碳足迹却发生了明显的空间迁移。碳足迹与水资源生态足迹在研究时段初始年份的空间匹配性较弱且分布规律不明显, 空间关联度较小, 水资源生态足迹呈现中部大、南北小的状态而碳足迹则呈现北高南低的状态。2016—2019 年碳足迹与水资源生态足迹分布发生了一些细微的变化, 水资源生态足迹仍呈现

出中部大南北小的形式,而碳足迹排放重心逐渐向东南转移,此时碳足迹与水资源生态足迹的空间匹配性相对变强。

目前石嘴山市碳足迹减小趋势十分明显,碳排

放重心有向银川市和吴忠市转移的趋势,这和沿黄经济区工业发展从石嘴山市向银川市、吴忠市扩展关联明显,同时说明工业发展对碳及水资源生态足迹的空间关联性有一定的促进作用。

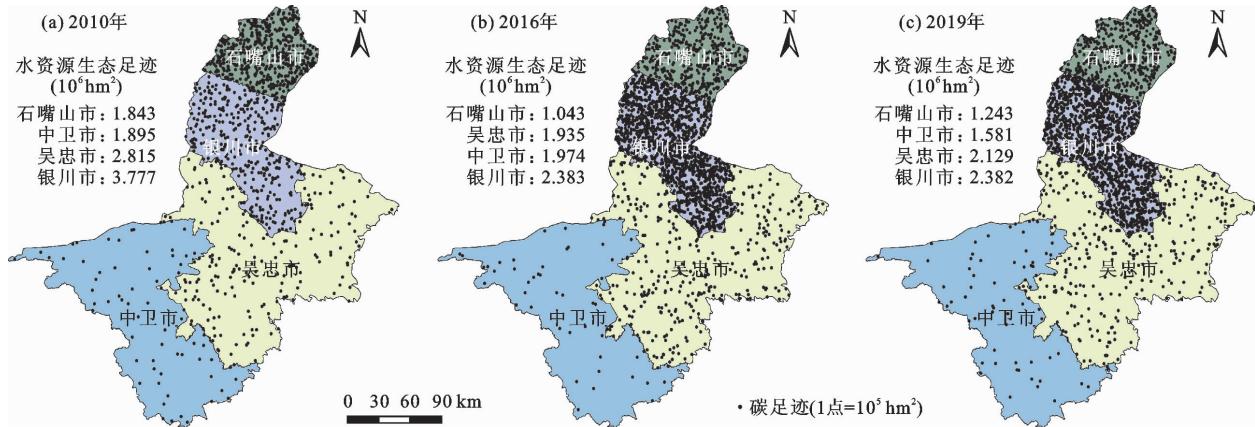


图7 2010—2019年重点年份宁夏沿黄城市带碳-水足迹空间分布特征

5 讨 论

银川市、石嘴山市碳足迹与水资源生态足迹分别呈现出明显的负相关和正相关,碳足迹与水质生态足迹的关联性也比较明显,而与水量生态足迹的关联性不明显;吴忠市碳-水足迹关联程度不强,但目前面临着较严重的碳排放和水生态压力问题且仍有加重的发展趋势;中卫市是区域内发展较晚的新兴城市,降水相对充沛,生态环境较好,人口密度较小,在发展中也借鉴了一些经验,区域内的耗水量控制较好,表现出该市碳足迹与水资源生态足迹的关联性不明显,且在2010—2019年间变化不显著,是目前宁夏沿黄城市带内碳-水-生态压力最小的区域。这与文献[7]、[11]的研究成果有相似之处,说明碳水足迹作为衡量生态压力的重要因素,在不同发展区域的水、能要素组合强度和利用效率有所不同,导致了不同产业活动中水资源利用效率和碳排放效率的差异,从而表现出不同的碳-水足迹相关关系^[7]。应综合考虑其可能的密切关系,多角度地衡量环境的压力^[11]。

“高碳”和“缺水”是目前黄河流域可持续发展中的重要问题。发达地区碳转移的方向表现为由资源丰富、重工业发达的城市流向拥有高新技术、第三产业发达的城市^[26-27],宁夏沿黄城市带内的4个城市也表现出类似规律。银川市作为省会城市,有相对较高的技术经济水平和人口聚集度,属于区域的

较发达地区,石嘴山市是老工业基地,在研究时段初期,其碳排放强度位居4个城市首位,随着产业的转型,工业生产及碳排放强度明显降低,而农业用水量和生态用水量逐渐提升,水资源生态足迹则产生了小幅度的提升,随着宁东能源基地的发展及石嘴山市工业中心的转移,银川市的工业耗水量逐渐增大,但通过万元GDP耗水量来看,该地经济发展对应的水资源消耗强度相对较低,而由于经济发展、人口增加导致的水资源消耗总量、生态压力以及碳排放强度均较大。中卫市、吴忠市作为新兴城市,目前正处于发展上升期,碳水问题还不突出。本文主要是从区域视角开展研究,讨论了碳水之间的空间分布不均衡性,相关研究还涉及了关键因素及其驱动机制^[27],但相对而言,没有细致地考虑产业结构及其变化对碳水利用的影响^[7],未来应考虑不同产业的碳水微观关系,从而为面向节水减碳双重目标的产业结构调整提供更详尽的依据。

6 结 论

(1) 2010—2019年宁夏沿黄城市带不同地区碳排放与水资源消耗呈现一定的相关性,但不同地区间差异十分明显,碳-水足迹关系呈现多样性,表现出与工业及经济发展水平相适应的空间分布状态。相对而言,碳足迹与水质生态足迹关联性比水量生态足迹的关联性更明显,这表明碳排放与水质有一定的关联性,在后续通过水量生态足迹进行控制调

节“水关系”时,应更加注重水质对碳足迹产生的明显影响。

(2) 随着工业中心的转移及发展,宁夏沿黄城市带内水资源生态足迹已经基本形成了以银川市和吴忠市为中心的排放重点区域;碳足迹动态变化趋势则显示,其重心已经从 2010 年的石嘴山市逐步转向银川市,且排放强度在逐渐向东南方向偏移,吴忠市与石嘴山市的碳足迹差值逐渐减小,后续可能形成以银川市-吴忠市为中心的碳排放重点区域,水碳排放中心可能有叠加趋势,将会造成更大的区域资源环境压力,需要重视并及时调控。

参考文献:

- [1] MILLER L, CARRIVEAU R. Balancing the carbon and water footprints of the Ontario energy mix [J]. Energy, 2017, 125: 562–568.
- [2] SHAIKH M A, KUCUKVAR M, ONAT N C, et al. A framework for water and carbon footprint analysis of national electricity production scenarios [J]. Energy, 2017, 139: 406–421.
- [3] ROTHAUSEN S G S A, CONWAY D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector [J]. Nature Climate Change, 2011, 1: 210–219.
- [4] RODRÍGUEZ N, ARMENTERAS D, RETANA J. National ecosystems services priorities for planning carbon and water resource management in Colombia [J]. Land Use Policy, 2015, 42: 609–618.
- [5] CASOLANI N, PATTARA C, LIBERATORE L. Water and carbon footprint perspective in Italian durum wheat production [J]. Land Use Policy, 2016, 58: 394–402.
- [6] BONAMENTE E, SCRUCCA F, RINALDI S, et al. Environmental impact of an Italian wine bottle: carbon and water footprint assessment [J]. Science of the Total Environment, 2016, 560–561: 274–283.
- [7] 杨文娟,赵荣钦,张战平,等.河南省不同产业碳水足迹效率研究[J].自然资源学报,2019,34(1):92–103.
- [8] 贾利.吉林省玉米生产碳足迹与水足迹时空特征及影响因素研究[D].长春:东北师范大学,2021.
- [9] 左其亭,吴青松,马军霞,等.“双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J].水资源保护,2023,39(1):8–14+56.
- [10] WANG Huan, HUANG Jiejun, ZHOU Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: a case study of Hubei Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.
- [11] 朱向梅,王子莎.黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究[J].环境科学与技术,2020,43(10):200–211.
- [12] GONZALEZ – GARCIA S, DIAS A C. Integrating life-cycle assessment and urban metabolism at city level: comparison between Spanish cities [J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(5): 1060–1076.
- [13] 郭运功,汪冬冬,林逢春.上海市能源利用碳排放足迹研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(2):103–108.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Japan: IGES, 2006.
- [15] WARRICK R A, 袁大中.二氧化碳、气候变化与农业[J].地理译报,1991,10(1):46–51+21.
- [16] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等.基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J].生态学报,2008,28(4):1729–1735.
- [17] WACKERNAGE M, REES W. Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth [M]. Philadelphia, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [18] 范晓秋.水资源生态足迹研究与应用[D].南京:河海大学,2005.
- [19] 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.
- [20] 张羽,左其亭,曹宏斌,等.沁河河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):50–57.
- [21] 杨裕恒,曹升乐,刘阳,等.基于水生态足迹的山东省水资源利用与经济发展分析[J].排灌机械工程学报,2019,37(3):256–262.
- [22] 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.
- [23] 贾诗琪,张鑫,彭辉,等.湖北省水生态足迹时空动态分析[J].长江科学院院报,2022,39(3):27–32+37.
- [24] 关格格.山西省用水生态足迹和污染水生态足迹研究[D].临汾:山西师范大学,2017.
- [25] 路畅.宁夏沿黄城市带碳-水资源生态足迹时空格局及影响因素研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [26] 王盼盼.耦合投入产出与多元统计分析用于区域经济-水-碳系统的研究[D].济南:山东大学,2022.
- [27] 唐莲,刘子西,黑正军,等.宁夏沿黄城市带不同区域碳水压力驱动机制研究[J/OL].安全与环境学报,(2022-11-11)[2023-02-16].<https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1604>.