

沁蟒河流域水资源生态足迹时空 变化特征及均衡性分析

张羽¹, 左其亭¹, 曹宏斌², 白西杰³, 杨振龙¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省豫北水利工程管理局, 河南 新乡 453002; 3. 河南水投小浪底北岸灌区工程有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要: 沁蟒河流域作为黄河流域重要的能源、化工产业基地, 水资源供需矛盾尤为突出。因此, 利用生态足迹理论对沁蟒河流域水资源可持续利用状况进行评估, 并对其进行均衡性分析, 能够为黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的实施提供范例。采用水资源生态足迹模型计算沁蟒河流域各地级行政区水资源生态足迹, 并利用泰尔指数对沁蟒河流域2010–2019年水资源生态足迹的均衡性进行分析。结果表明: 沁蟒河流域5个地级行政区在水资源生态足迹方面存在一定差异, 其中河南省的2个地级行政区相对较大, 山西省的3个地级行政区相对较小; 各地级行政区均处于“生态赤字”状态, 农业生态足迹的不均衡性较大, 组内差异逐渐超过组间差异成为影响沁蟒河流域水资源生态足迹均衡性的主要因素。总体而言, 沁蟒河流域水资源生态状况较差。

关键词: 水资源生态足迹; 时空变化特征; 泰尔指数; 空间均衡性; 沁蟒河流域

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0050-08

Spatio-temporal variation characteristics and equilibrium analysis of water resources ecological footprint in the Qinqiang River Basin

ZHANG Yu¹, ZUO Qiting¹, CAO Hongbin², BAI Xijie³, YANG Zhenlong¹

(1. School of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Northern Henan Water Conservancy Project Management Bureau, Xinxing 453002, China; 3. Henan Water Conservancy Investment Group Xiaolangdi North Bank Irrigation District Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China)

Abstract: As an important energy and chemical industry base of the Yellow River Basin, the Qinqiang River Basin is facing a prominent contradiction between the supply and demand of water resources. In the hope of providing an exemplary case study for the implementation of the major national strategy of ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin, we evaluated the sustainable utilization of water resources in the Qinqiang River Basin using the ecological footprint theory and conducted an equilibrium analysis of water resources ecological footprint (WEF) of the basin. The water resources ecological footprint model was used to calculate the WEF of various administrative regions in the Qinqiang River Basin, and Theil index was used to analyze their equilibrium status from 2010 to 2019. The results show that there were some differences in the WEF in the five prefecture-level administrative regions of the Qinqiang River Basin, among which the WEF in two of the regions were relatively large, and the rest three were small. All the administrative regions were in ecological deficit, and the disequilibrium of agricultural ecological footprint was more prominent. The differences within each individual group gradually exceeded the differences between groups and became the main factor affecting the equilibrium of WEF in the basin. On the whole, the ecological condition of water resources in the Qinqiang River Basin

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2022-05-04

基金项目: 河南省水利科技攻关计划项目 (GG201947); 河南省重大公益性项目 (2020-36); 国家重点研发计划课题 (2021YFC3200201); 郑州大学青年教师培育基金项目 (JC202042037)

作者简介: 张羽 (1998-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 左其亭 (1967-), 男, 河南固始人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。

was poor during the study period.

Key words: water resources ecological footprint(WEF); spatio-temporal variation characteristics; Theil index; spatial equilibrium; the Qinmang River Basin

1 研究背景

国家发展改革委2019年发布的《国家节水行动方案》中指出,我国大多数城市和地区面临着不同程度的缺水,并且造成了大量经济损失。在黄河流域等一些水资源供需矛盾突出的地区,水资源短缺问题已经成为阻碍地区实现高质量发展的主要问题之一。沁蟒河流域自然资源丰富、能源产业发达、高耗水行业集中,是黄河流域水资源供需矛盾突出的典型地区。因此,对沁蟒河流域水资源可持续利用状况进行评估,能够为黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的实施提供范例。

生态足迹理论最早由加拿大生态学家 Rees 于1992年提出,而后 Wackernagel 等^[1]对该理论进行了完善,因其具有较强的可操作性且仅需较少资料就能对区域生态环境状况进行评估而被广泛应用。水资源生态足迹模型常被应用于评估区域水资源可持续利用状况或水资源承载力。如门宝辉等^[2]基于生态足迹理论对北京市水资源承载力进行了评估,并利用 GRNN 模型对 ARIMA 模型进行改进,提高了预测生态足迹的准确性;张义敏等^[3]基于生态足迹理论,将水资源生态足迹分为生产、生活、生态3个方面,对广东省及珠三角9市水资源可持续利用状态进行了评估;Chen 等^[4]基于水-碳-生态足迹构建了区域资源环境压力评价方法,相较于构建指标体系的资源环境压力评价方法,其受主观因素的影响较小;黄佳等^[5]在水资源生态足迹模型的基础上引入了水资源负载指数,能够更加直观地反映区域水资源的利用状况;焦士兴等^[6]在分析水资源生态足迹的基础上,结合 Kaya 恒等式与 LMDI 分解模型,对中原城市群水资源生态足迹驱动因素进行了深入分析。

推进实施黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略,必须贯彻落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路。所谓“空间均衡”是指在空间上的一种相对稳定的平衡状态^[7]。长期以来,由于不同地区自然气候条件、地理区域位置、经济发展规模存在差异,我国水资源空间不均衡问题一直存在。因此,为了使水资源利用与经济社会发展规模相适应,亟须对水资源空间不均衡问题

进行深入研究。如左其亭等^[8]对黄河沿线9省区水资源生态足迹进行了公平性分析;陈义忠等^[9]基于基尼系数对长江中游城市群水-碳-生态足迹变化进行了均衡性分析;杨一旻等^[10]利用基尼系数对长江中游城市群三维生态足迹进行了平衡性分析;杨屹等^[11]采用基尼系数、经济贡献系数与生态承载系数相结合的方法分析了丝绸之路沿线省份水资源生态足迹的公平性。由上述内容可知,目前关于水资源生态足迹及均衡性的研究已经十分深入,但对于全面分析水资源生态足迹的均衡性以及影响均衡性的组内差异与组间差异的相关研究较少。

基于上述背景,本文利用水资源生态足迹模型计算2010-2019年沁蟒河流域涉及的5个地级行政区的水资源生态足迹,采用泰尔指数分析研究区域水资源生态足迹与粮食作物播种面积、第二产业增加值、常住人口之间的均衡性,并计算了影响水资源生态足迹均衡性的组内差异与组间差异,为沁蟒河流域实现水资源可持续利用及制定高质量发展战略提供了依据与建议。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

沁蟒河流域位于山西省南部与河南省西北部,流域面积为14 735 km²,其中山西省境内12 304 km²,占全流域面积的83.5%,河南省境内2 431 km²,占全流域面积的16.5%。该流域涉及的地级行政区主要有长治市、临汾市、晋城市、焦作市和济源市(图1)。沁蟒河流域地处副热带季风区,大陆性季风气候显著,四季分明。受季风环流影响,流域降雨年内分布极不均匀,主要集中在7-8月。2019年沁蟒河流域涉及的地级行政区总人口为1 484万人,人均GDP为6.15万元,低于全国平均水平(7.09万元)。流域自然资源十分丰富,煤炭业较为发达,素有“煤铁之乡”之称,是全国重要的能源基地和化工原料基地之一,但由于高耗水型行业集中,又面临着严重的水资源短缺问题,属于典型的资源型缺水。

2.2 数据来源

本文水资源总量、用水总量等数据来自2010-2019年山西省及河南省的《水资源公报》;粮食作物播种面积、第二产业增加值、常住人口等数据来源于2010-2019年《山西省统计年鉴》及《河南省统计年鉴》。

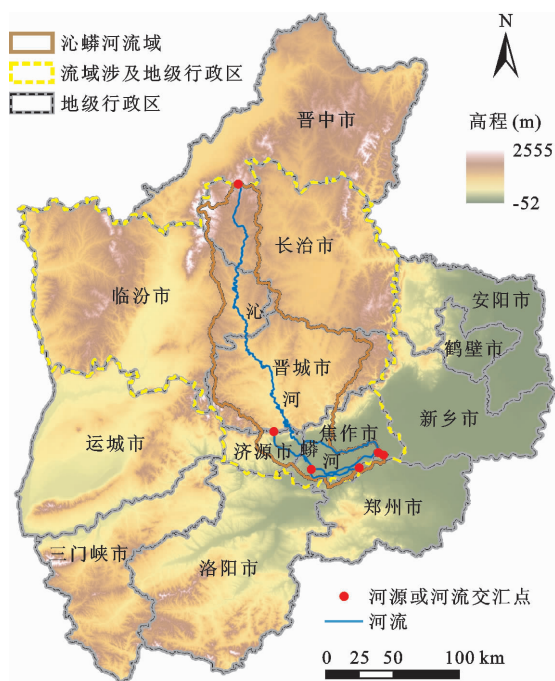


图1 沁蟒河流域概况图

3 研究方法

3.1 水资源生态足迹模型

水资源生态足迹是指人类生产生活及自然环境维持自身进化所消耗的水资源^[8]。在计算时,根据用水特性和用水消费群体的不同,将水资源划分为农业、工业、城乡生活环境3个子账户,水资源生态足迹(water resources ecological footprint, WEF)计算式^[12]如下:

$$\begin{aligned} WEF &= \sum_{k=1}^3 WEF_k = \sum_{k=1}^3 N \cdot wef_k \\ &= \sum_{k=1}^3 \gamma \cdot (Q_k/P) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: WEF 为区域水资源生态足迹总量, hm^2 ; WEF_k 为区域各子账户水资源生态足迹, hm^2 ; N 为区域常住人口数; wef_k 为区域各子账户人均水资源生态足迹, hm^2 ; γ 为水资源全球均衡因子; Q_k 为区域各子账户用水总量, m^3 ; P 为水资源全球平均生产能力, m^3/hm^2 。

万元 GDP 水资源生态足迹用以评估区域水资源的利用效率,其计算式^[13]如下:

$$EG_t = EF_t/G_t \quad (2)$$

式中: EG_t 为第 t 年万元 GDP 水资源生态足迹, hm^2 ; EF_t 为第 t 年水资源生态足迹, hm^2 ; G_t 为第 t 年地区生产总值, 10^4 元。

水资源生态承载力(water resources ecological carrying capacity, WEC)用来反映区域水资源对于区域经济社会及生态环境的支撑能力,其计算式^[14]如下:

$$WEC = N \cdot wec = (1 - \beta) \cdot \varphi \cdot \gamma \cdot (W/P) \quad (3)$$

式中: WEC 为区域水资源生态承载力, hm^2 ; N 为区域常住人口数; wec 为区域人均水资源生态承载力, hm^2 ; W 为区域水资源总量, m^3 ; φ 为水资源产量因子;区域水资源利用需要预留60%的水量用于维持生态环境,故取 β 为0.4^[15]。

水资源生态盈亏指数(water resources ecological profit and loss index, WEB)用来衡量区域水资源供需平衡状况,为水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值,具体计算式^[16]如下:

$$WEB = WEC - WEF \quad (4)$$

根据水资源生态盈亏指数值,将区域水资源供需平衡划分为3种状态:当 $WEB > 0$ 时为“生态盈余”状态;当 $WEB = 0$ 时为“生态平衡”状态;当 $WEB < 0$ 时为“生态赤字”状态。

3.2 水资源生态足迹相关参数的确定

水资源生态足迹模型中所需参数主要有水资源全球均衡因子 γ 、水资源全球平均生产能力 P 以及水资源产量因子 φ 。根据黄林楠等^[17]的研究,选取 $\gamma = 5.19$ 、 $P = 3140 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, φ 根据沁蟒河流域所涉及的5个地级行政区2010–2019年的相关数据,按公式(5)计算:

$$\varphi = \frac{\bar{W} \cdot 10^{-2}}{3140 \cdot A} \quad (5)$$

式中: $\bar{W}$ 为区域多年平均水资源总量, m^3 ; A 为区域面积, km^2 。计算得出长治市、临汾市、晋城市、焦作市、济源市的水资源产量因子 φ 分别为0.27、0.17、0.40、0.60、0.50。

3.3 计算指标选取

为分析沁蟒河流域不同子账户水资源生态足迹的均衡性,应根据不同水资源子账户类型,分别选取能表征农业方面、工业方面、城乡生活环境方面的指标进行均衡性分析,根据水资源利用与经济社会发展的相互作用关系,反映出水资源生态足迹均衡性计算结果的真实性及合理性。农业生态足迹子账户方面,粮食作物播种面积可以表征农业生产经济效益,亦能够表现出生态系统所提供的自然资源;工业生态足迹子账户方面,第二产业增加值能够直接反映出工业生产经济效益;城乡生活环境生态足迹子账户方面,常住人口直接影响着生活用水量,且与生

态环境用水量存在间接关系。基于此,选取粮食作物播种面积、第二产业增加值、常住人口分别作为农业、工业、城乡生活环境生态足迹子账户均衡性计算的对应指标。

3.4 泰尔指数

泰尔指数(Theil index)最初是由泰尔计算收入平等性而得名^[18]。泰尔指数不仅可计算不同组的组间差异,亦可计算组内不同群体的差异,能够更全面地反映区域之间的不均衡性,因此被广泛应用于各个领域^[19-21]。基于此,利用泰尔指数对沁蟒河流域水资源生态足迹进行均衡性分析。泰尔指数值越小,说明区域内资源配置越均衡。将沁蟒河流域分为山西省沁蟒河流域和河南省沁蟒河流域,以方便计算其组间差异。山西省沁蟒河流域包括长治市、临汾市、晋城市3个地级行政区;河南省沁蟒河流域包括焦作市、济源市2个地级行政区,分别计算其组内差异。具体计算式^[22]如下:

$$T_{\alpha} = G_S \cdot \ln(G_S/R_S) + G_H \cdot \ln(G_H/R_H) \quad (6)$$

$$T_{\beta} = G_S \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_S} \frac{G_i}{G_S} \cdot \ln\left(\frac{G_i/G_S}{R_i/R_S}\right) \right] +$$

$$G_H \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_H} \frac{G_i}{G_H} \cdot \ln\left(\frac{G_i/G_H}{R_i/R_H}\right) \right] \quad (7)$$

$$T = T_{\alpha} + T_{\beta} \quad (8)$$

式中: T_{α} 和 T_{β} 分别为组间差异和组内差异; T 为泰尔指数; G_S 和 G_H 分别为山西省和河南省沁蟒河流域占沁蟒河流域水资源生态足迹总量的比重; N_S 和 N_H 分别为山西省和河南省沁蟒河流域的地级行政区数量; G_i 为地级行政区*i*占沁蟒河流域水资源生态足迹总量的比重; R_S 和 R_H 分别为山西省和河南省沁蟒河流域某项指标占沁蟒河流域该指标的比重; R_i 为地级行政区*i*某项指标占沁蟒河流域该指标的比重。

4 结果与分析

4.1 沁蟒河流域水资源生态足迹

4.1.1 人均水资源生态足迹 根据公式(1)计算2010-2019年沁蟒河流域5个地级行政区人均水资源生态足迹及其多年平均变化率和2010-2019年沁蟒河流域各子账户人均水资源生态足迹,结果如图2、3所示。

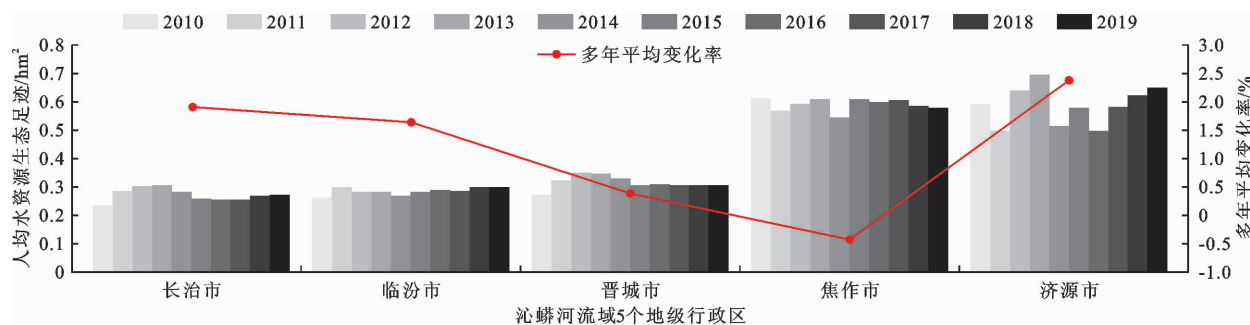


图2 2010-2019年沁蟒河流域5个地级行政区人均水资源生态足迹及其多年平均变化率

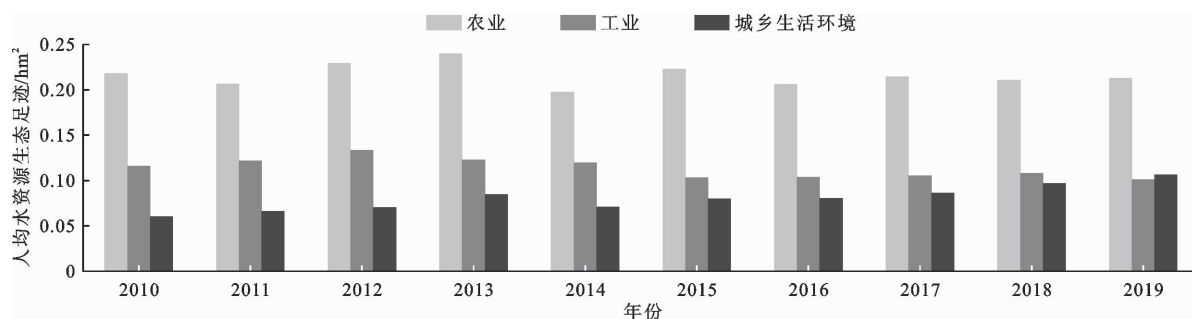


图3 2010-2019年沁蟒河流域各子账户人均水资源生态足迹

由图2可以看出,沁蟒河流域各地级行政区人均水资源生态足迹之间存在较大差异。其中山西省的长治市、临汾市、晋城市人均水资源生态足迹相对较低,2010-2019年各年份人均水资源生态足迹在0.2~0.4 hm²之间;河南省的焦作市和济源市人均水

资源生态足迹相对较高,总体在0.5~0.7 hm²之间。2010-2019年,长治市、临汾市、晋城市人均水资源生态足迹变化过程大体相同,均呈先增大、后减小、再趋于平稳的趋势,多年平均变化率分别为1.9%、1.63%、0.38%;焦作市人均水资源生态足迹呈减小

趋势,2010–2019 年减小了 0.033 hm^2 ,多年平均变化率为 -0.43% ,说明近年来国家节水行动取得了一定成效,节水意识不断增强,水资源利用水平得到提高;济源市人均水资源生态足迹变化相对较大,多年平均变化率达到 2.4% ,总体呈波动变化,人均水资源生态足迹在 2011 年达到最低,仅为 0.497 hm^2 ,在 2013 年达到最高,为 0.694 hm^2 ,虽在 2016 年再减小至 0.498 hm^2 ,但随后呈现逐年增长的趋势,主要原因是相对于沁蟒河流域涉及的其他地级行政区而言,济源市的城市规模较小,受行业波动和政策影响较大,因此人均水资源生态足迹年际变化较大。

由图 3 可以看出,沁蟒河流域人均农业生态足迹在人均水资源生态足迹中所占比重较大,各年份占比均高达 50% 以上。2010–2019 年人均农业生态足迹基本保持稳定,总体在 $0.20 \sim 0.25 \text{ hm}^2$ 之间。人均工业生态足迹呈减小趋势,从 2012 年的最高值 0.13 hm^2 减小至 2019 年的 0.10 hm^2 ,所占比重从 2010 年的 29% 降低至 2019 年的 23% 。近年来,沁蟒河流域扎实推进产业转型,各地级行政区能源、化工等支柱产业逐渐减少,因此人均工业生态足迹所占比重降低,随着光能、核能等新型清洁能源所占比例的上升,预计沁蟒河流域人均工业生态足迹所占比重将会进一步降低。人均城乡生活环境生态足迹在 2010–2019 年间呈增大趋势,从 2010 年的 0.06 hm^2 增大至 2019 年的 0.11 hm^2 ,所占比重从 2010 年的 16% 上升至 2015 年的 18% ,再到 2019 年的 22% ,主要是因为国家大力提倡环境保护,加快了绿色城市的建设,如焦作等市由资源型城市积极向绿色城市转型^[23],因此人均城乡生活环境所占比重逐渐增大。随着黄河流域生态保护与高质量发展国家重大战略的实施,预计未来沁蟒河流域人均水资源生态足迹的构成会更加合理。

4.1.2 万元 GDP 水资源生态足迹 根据公式(2)计算的沁蟒河流域 5 个地级行政区 2010–2019 年万元 GDP 水资源生态足迹如图 4 所示。

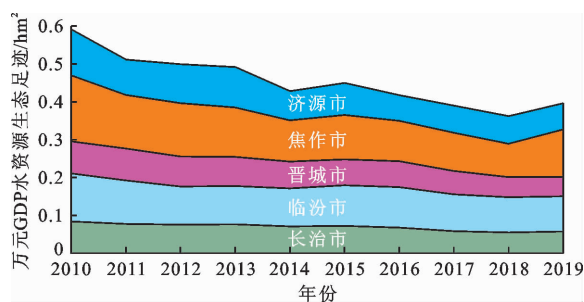


图 4 2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区万元 GDP 水资源生态足迹

由图 4 可见,2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区万元 GDP 水资源生态足迹均呈减小趋势。近年来,由于流域内产业结构转型升级以及新型节水技术与企业节水管理体制的实施,促进了用水效益与水资源利用率不断提高,但与国内发达地区相比仍有一定差距^[24]。沁蟒河流域 5 个地级行政区万元 GDP 水资源生态足迹均值按降序依次为焦作市 (0.123 hm^2)、临汾市 (0.104 hm^2)、济源市 (0.084 hm^2)、长治市 (0.071 hm^2)、晋城市 (0.070 hm^2),其中焦作市万元 GDP 水资源生态足迹相对较大,2010 年达到 0.174 hm^2 ,随后呈现逐步减小趋势,2018 年减小至 0.088 hm^2 ;长治市、晋城市万元 GDP 水资源生态足迹相对较小,说明该两市水资源利用效率与用水效益相对较好。总体来看,2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区万元 GDP 水资源生态足迹逐步减小,其中焦作市、济源市万元 GDP 水资源生态足迹减小幅度最大,分别减小了 0.051 、 0.050 hm^2 ,主要是因为沁蟒河流域大力推动产业转型,用水方式由粗放式增长向高效节约转变,用水效率逐步提高^[25]。

4.1.3 水资源生态承载力 根据公式(3)计算的 2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区人均水资源生态承载力见图 5。

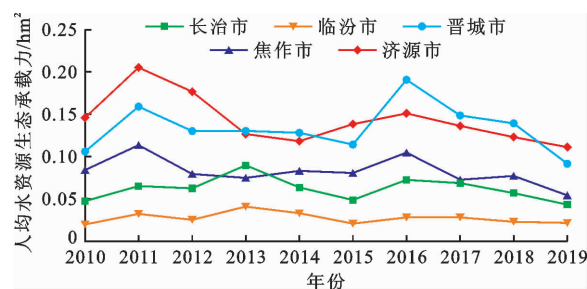


图 5 2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区人均水资源生态承载力

如图 5 所示,2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区人均水资源生态承载力存在一定差异。临汾市人均水资源生态承载力较小,且年际变化不大,总体呈现稳定趋势。济源市、晋城市人均水资源生态承载力相对较高,但波动较大,济源市 2011 年达到最大值,为 0.205 hm^2 ;晋城市 2016 年增大至 0.191 hm^2 ,但在 2019 年又减小至 0.091 hm^2 。水资源生态承载力主要由当地水资源量确定,受降雨、蒸发等气象要素影响较大,因此,在面积较大的地级行政区,人均水资源生态承载力年际变化相对较小,反

之,年际变化相对较大。

4.1.4 水资源生态盈亏状况 由公式(4)可计算出 2010–2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区的水资源生态盈亏状态,其中 2010、2015 及 2019 年各地级行政区的人均水资源生态盈亏指数见图 6。2010–2019 年,沁蟒河流域 5 个地级行政区的生态

盈亏指数均小于 0,即均处于“生态赤字”状态,并且“生态赤字”状态呈逐步加重的趋势。说明随着经济社会的发展,沁蟒河流域虽然在产业转型和节水意识方面有所好转,但亟需调整经济发展规模、加强节水技术的普及,坚持“四水四定”原则,以期达到流域水资源生态平衡及生态盈余状态。



图 6 2010、2015 及 2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区人均水资源生态盈亏指数

由图 6 可以看出,沁蟒河流域 5 个地级行政区的水资源生态盈亏状况差异较大,河南省焦作市和济源市的生态赤字状况相对严重,2010、2015 年焦作市生态赤字状况最严重,人均生态赤字分别达到 0.527、0.529 hm^2 ;2019 年济源市生态赤字状况最严重,人均生态赤字达到 0.536 hm^2 ,水资源状态处于较不可承载状态。主要是因为 2017 年济源市被确定为国家产城融合示范区,工业经济发展迅速,工业用水量上升,造成生态赤字状况比较严重。山西省沁蟒河流域 3 市的人均水资源生态盈亏指数均在 $-0.1 \sim -0.3 \text{ hm}^2$ 之间,其中长治市与晋城市的生态盈亏状态较为相似,生态盈亏状况相对较好。

4.2 沁蟒河流域水资源生态足迹均衡性分析

4.2.1 不同子账户泰尔指数 表 2 为根据公式(6)~(8)计算的 2010–2019 年沁蟒河流域不同子账户泰尔指数。

表 2 2010–2019 年沁蟒河流域各子账户泰尔指数

年份	粮食作物 播种面积	第二产业 增加值	常住人口	总和
2010	0.167	0.041	0.064	0.273
2011	0.106	0.030	0.045	0.181
2012	0.127	0.029	0.038	0.194
2013	0.136	0.020	0.040	0.196
2014	0.114	0.018	0.046	0.178
2015	0.136	0.025	0.028	0.188
2016	0.118	0.030	0.038	0.185
2017	0.125	0.033	0.041	0.198
2018	0.108	0.037	0.040	0.185
2019	0.113	0.037	0.052	0.202

由表 2 可知,2010–2019 年沁蟒河流域泰尔指数呈现先减小后平稳的变化趋势,各子账户泰尔指数之和从 2010 年的 0.273 减小至 2014 年的 0.178,2015 年小幅度提升至 0.188,随后基本保持稳定。在各子账户中,代表农业生态足迹的粮食作物播种面积的泰尔指数较大,说明沁蟒河流域农业生态足迹不均衡性相对较大,但其不均衡性呈现缓和趋势,泰尔指数从 2010 年的 0.167 减小至 2019 年的 0.113;代表工业生态足迹的第二产业增加值的泰尔指数较小,年际间呈现先减小后增大的趋势,从 2010 年的 0.041 减小至 2014 年的 0.018,随后又增大至 2019 年的 0.037;代表城乡生活环境生态足迹的常住人口的泰尔指数亦呈先减小后增大的趋势,从 2010 年的 0.064 减小至 2015 年的 0.028,随后稳步增大,2019 年时增大至 0.052。首先,在临汾市和晋城市等粮食作物播种面积较大的城市,新型节水灌溉技术未能全面普及,造成沁蟒河流域农业生态足迹均衡性较差,随着节水灌溉技术普及率的提高,预计沁蟒河流域农业生态足迹均衡性将会进一步提升;其次,沁蟒河流域各地级行政区工业产业虽然均以能源、化工产业为主,但发展水平存在一定差异,且 2011 年国家实施水价改革^[26],如焦作市等高耗水型产业密集城市工业用水量减少,促进了工业生态足迹的均衡性。

4.2.2 组间差异与组内差异 表 3 为根据公式(6)~(8)计算的 2010–2019 年沁蟒河流域水资源生态足迹泰尔指数的组间差异和组内差异及两者的贡献率。

由表 3 可知,2010–2019 年间,沁蟒河流域组

间差异和组内差异贡献率发生了显著变化。2010 – 2014 年组间差异占据主要地位,其贡献率在 53.62% ~ 79.06% 之间波动变化;2015 – 2019 年组内差异贡献率超过组间差异贡献率。总体来看,组间差异贡献率从 2010 年的 69.69% 降低至 2019 年的 43.49%,组内差异贡献率从 2010 年的 30.31% 上升至 2019 年的 56.51%。主要有两方面原因,一是近年来山西省积极进行产业转型取得了一定成效,使组间差异逐渐减小;二是济源市加快产业转型,大力发展高新产业,加大了河南省沁蟒河流域的组内差异,从而使沁蟒河流域泰尔指数组内差异贡献率增加。

表 3 2010 – 2019 年沁蟒河流域水资源生态足迹泰尔指数的组间差异和组内差异及两者的贡献率

年份	组间差异 T_{α}	组内差异 T_{β}	泰尔指数 T	T_{α} 贡献率 / %	T_{β} 贡献率 / %
2010	0.269	0.117	0.386	69.69	30.31
2011	0.151	0.040	0.191	79.06	20.94
2012	0.177	0.095	0.272	65.07	34.93
2013	0.185	0.160	0.345	53.62	46.38
2014	0.140	0.078	0.218	64.22	35.78
2015	0.195	0.232	0.427	45.67	54.33
2016	0.168	0.188	0.356	47.19	52.81
2017	0.182	0.215	0.397	45.84	54.16
2018	0.155	0.226	0.381	40.68	59.32
2019	0.157	0.204	0.361	43.49	56.51

5 讨 论

虽然沁蟒河流域正在积极推动产业结构调整、加快能源节约型城市建设,但其水资源生态足迹仍呈缓慢上升趋势,水资源生态赤字状况日趋严重,这与左其亭等^[8]、贾陈忠等^[27]对于山西省与河南省的水资源生态足迹的研究结果总体上相符合。说明沁蟒河流域仍存在整体节水意识不强、水资源利用与经济社会发展规模不相协调等问题。因此,沁蟒河流域各地级行政区应做好节水管理,尝试利用水价的杠杆作用,合理确定用水定额,采用水资源税改革等方式,倒逼节水意识的提升,充分协调水资源利用与经济发展规模之间的关系。2010 – 2015 年,沁蟒河流域泰尔指数呈波动变化的趋势,2016 – 2019 年,泰尔指数稳定在 0.356 ~ 0.397 之间,其变化趋势与组内差异的变化趋势存在一定程度的一致性,

说明组内差异变化是导致泰尔指数发生变化的主要因素。因此,为了使沁蟒河流域的水资源达到空间均衡状态,山西与河南两省的沁蟒河流域应落实“四水四定”原则,根据所涉及的省内不同城市发展情况与产业基础,在推进产业转型的同时,加快科技创新、发展高新特色产业。

以往研究大多采用基尼系数评估区域水资源生态足迹的均衡性,侧重于从整体上探究水资源生态足迹与经济社会发展特征指标之间的关系。相较于基尼系数方法,本文采用泰尔指数计算水资源生态足迹的空间均衡性,通过计算组间差异与组内差异,明晰了二者贡献率变化的原因,较为全面地分析了造成区域水资源生态足迹不均衡的原因。但泰尔指数方法目前缺少准确的状态判别标准,不能直接反映出区域所处的均衡状态。故对泰尔指数划定准确的阈值范围以判定研究区域的均衡状态,能够有效提升泰尔指数的适用性,便于为实现水资源空间均衡提出更加科学的决策依据与建议。

6 结 论

本文利用水资源生态足迹模型计算 2010 – 2019 年沁蟒河流域 5 个地级行政区水资源生态足迹,并利用泰尔指数对沁蟒河流域各地级行政区水资源生态足迹的均衡性进行分析,得出以下结论:

(1) 沁蟒河流域各地级行政区人均水资源生态足迹存在一定差异,其中焦作市、济源市人均水资源生态足迹较高;长治市、临汾市、晋城市人均水资源生态足迹相对较低。济源市、晋城市的水资源生态承载力相对较高,临汾市水资源承载力相对较低且 2010 – 2019 年均处于较低水平。2010 – 2019 年沁蟒河流域各地级行政区均处于生态赤字状态,其中济源市的生态赤字状况最为严重。

(2) 农业生态足迹的不均衡性较大,但呈现逐渐下降的趋势。组间差异贡献率逐步降低,且组内差异贡献率逐渐超过组间差异贡献率,组内差异的变化是影响沁蟒河流域水资源均衡性的主要因素。

(3) 沁蟒河流域各地级行政区的水资源可持续利用状况近年来虽然有所改善,但水资源仍处于较不可承载状态。为了能够更好地推进黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略实施,推动中原城市群建设,必须尽快调整产业结构,加强用水管理,提高节水意识,使沁蟒河流域各地级行政区能够尽快实现水资源可持续利用,并及时制定地区高质量发展战略。

参考文献:

- [1] WACKERNAGEL M, REES W. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[M]. Brian Czech: New Society Publishers, 1996.
- [2] 门宝辉,蒋美彤. 基于生态足迹法的水资源承载力研究——以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 29–36.
- [3] 张义敏,张晓琳,陈畅. 基于水资源生态足迹模型的广东省及珠三角九市水资源可持续利用研究[J]. 人民珠江, 2022, 43(4): 31–40.
- [4] CHEN Yizhong, LU Hongwei, YAN Pengdong, et al. Analysis of water-carbon-ecological footprints and resource-environment pressure in the Triangle of Central China[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107448.
- [5] 黄佳,徐晨光,满洲. 基于生态足迹的山东省水资源承载力研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 115–121.
- [6] 焦士兴,陈林芳,王安周,等. 中原城市群水资源生态足迹变化及驱动研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 62–66.
- [7] 左其亨,韩春辉,马军霞,等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 113–118.
- [8] 左其亨,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.
- [9] 陈义忠,乔友凤,卢宏伟,等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368–1380.
- [10] 杨一暘,卢宏伟,梁东哲,等. 基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9011–9022.
- [11] 杨屹,樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5040–5050.
- [12] 井沛然,郭利丹. 基于生态足迹的浙江省水资源利用与经济协调发展研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(6): 42–51.
- [13] 刘玉邦,严雨男. 成都市水生态足迹的时间分布特征及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 93–98.
- [14] NICCOLUCCI V, GALLI A, REED A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939–2944.
- [15] 张岳. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国农村水利水电, 1998(5): 3–6.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] TAO Yi, HENRY K, ZOU Qinpei, et al. Methods for measuring horizontal equity in health resource allocation: A comparative study[J]. Health Economics Review, 2014, 4(1): 10.
- [19] 张永凯,杨春月,张晚军,等. 黄河流域人口预期寿命的时空演化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(5): 902–913.
- [20] 韦冬莉. 商贸流通经济空间差异收敛检验与影响机制研究[J]. 商业经济研究, 2022(8): 17–20.
- [21] 周天墨,陈鹏飞,陈佳林,等. 中国煤矿安全生产水平空间差异与影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(4): 1194–1211.
- [22] 张海洋,韩晓. 数字金融能缓和社会主要矛盾吗?——消费不平等的视角[J]. 经济科学, 2022(2): 96–109.
- [23] 赵亚博. 资源型城市的转型问题探讨——以河南省焦作市为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 59–64.
- [24] 刘汉生,王晖,张婷,等. 武汉市水资源生态足迹动态分析[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(4): 514–518.
- [25] 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.
- [26] 2011年将稳步推进水价改革[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2011(1): 2.
- [27] 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.
- [39] 代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [40] 卡尔夫. 湖沼学——内陆水生生态系统[M]. 古滨河,刘正文,李宽意,译. 北京:高等教育出版社, 2011.
- [41] 官卓宇,王慎,张思思,等. 澜沧江不同中游水库分层对溶解氧垂向分布的影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 12–18.
- [42] MCCLURE R P, HAMRE K D, NIEDERLEHNER B R, et al. Metalimnetic oxygen minima alter the vertical profiles of carbon dioxide and methane in a managed freshwater reservoir[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 610–620.
- [43] MÜLLER B, BRYANT L D, MATZINGER A, et al. Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(18): 9964–9971.
- [44] 步青云. 浅水湖泊溶解氧变化对沉积物磷、氮的影响[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2006.

(上接第49页)