

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.012

基于 Tapio 和 LMDI 模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析

纪义虎¹, 左其亭^{1,2,3}, 马军霞¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:在界定沁河流域研究范围和对沁河流域碳排放趋势特征分析的基础上,采用 Tapio 脱钩模型分析了碳排放与水资源利用的脱钩关系,并采用 LMDI 模型分析影响碳排放的主要驱动因素。结果表明:沁河流域整体碳排放呈现波动增长态势,但碳排放增长率波动下降;沁河流域碳排放与水资源利用多数时间处于强负脱钩和扩张负脱钩状态,但逐渐出现强脱钩与弱脱钩状态,水碳关系逐渐向好;水资源利用效应和碳排放强度效应是驱动沁河流域碳排放增长的主要因素,用水效益效应是驱动碳排放减少的主要因素,碳排放强度效应与供水结构效应驱动效果逐渐变得更为显著。

关键词:水资源利用;碳排放;Tapio 脱钩模型;LMDI 模型;沁河流域

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0094-08

Analysis of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization in the Qinhe River Basin based on Tapio and LMDI models// JI Yihu¹, ZUO Qiting^{1,2,3}, MA Junxia¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: On the basis of defining the research scope of the Qinhe River Basin and analyzing the trend characteristics of carbon emissions in the Qinhe River Basin, the Tapio decoupling model was used to analyze the decoupling relationship between carbon emissions and water resource utilization. The LMDI model was used to analyze the main driving factors of carbon emissions. The results show that the overall carbon emissions in the Qinhe River Basin show a fluctuating upward trend, but the fluctuation of carbon emission growth rate decreases. The carbon emissions and water resource utilization in the Qinhe River Basin have been in a state of strong negative decoupling and expanded negative decoupling in the most of the time. The gradual emergence of strong and weak decoupling states indicates that the relationship between water and carbon was gradually improved. Water resource utilization effect and carbon emission intensity effect are the main factors driving the increase of carbon emissions in the Qinhe River Basin, while the water efficiency effect is the main factor driving the reduction of carbon emissions. The driving effects of carbon emission intensity effect and water supply structure effect gradually become more significant.

Key words: water resources utilization; carbon emissions; Tapio decoupling model; LMDI model; Qinhe River Basin

在当今全球气候变化加剧的严峻形势下,对碳排放的研究逐渐成为学界的研究重点。随着我国“双碳”目标的提出^[1],国内学者对碳达峰和碳中和的研究快速增多^[2-5],而作为清洁能源的水资源在实现“双碳”目标这项艰巨的任务中起着至关重要

的作用^[6]。近年来的气候变化影响了水循环的过程,水资源时空分布不均导致生态环境发生变化,使得生态系统碳汇能力发生改变;同时,高速发展的经济使得供水结构、用水效率等皆有一定的改变,这也影响着水资源在开采、输送和加工等过程中的碳排

基金项目:国家自然科学基金项目(52279027);国家重点研发计划项目(2021YFC3200201);河南省重大公益性项目(201300311500)

作者简介:纪义虎(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:jyihu6@163.com

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

放。因此,正确分析碳排放与水资源利用之间的关系对促进区域水碳关系协调发展起着至关重要的作用。近年来,已有较多学者进行了如城市水系统与碳排放关系^[7]、污水再生与增值利用的减碳效益^[8]、不同灌溉模式下水能消耗及碳排放的关联关系^[9]等水碳关系的研究。

脱钩概念由经济合作与发展组织(OECD)提出,以探讨环境破坏与经济发展之间的关系^[10],Tapio 脱钩模型被广泛应用于研究水资源利用^[11]、碳排放^[12]、经济发展^[13]之间的相关关系。为进一步找出影响脱钩状态的主要因素,以寻求有效的手段进行调整,驱动效应分解是较为常用的方法。向彩红等^[14]结合脱钩指数和对数平均迪氏指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)模型分析了湖南省生产-消费系统的碳排放与经济增长关系,并将影响碳排放的因素划分为经济活动效应、产业结构效应、能源强度效应、能源结构效应和人口效应五大类。李丽丽等^[15]测算了西北五省区 2004—2018 年经济增长与水资源消耗的脱钩程度,并运用分解模型探究了不同因素对实现脱钩的驱动贡献。孙诗阶等^[16]基于脱钩理论分析了长江经济带各省市农业水污染与经济脱钩关系,并构建了 LMDI 模型探究引起二者脱钩关系变化的驱动因素。从现有研究成果看,研究经济发展与水资源利用、碳排放之间脱钩关系及驱动因素是当前的研究热点之一,但进行区域水碳关系及从用水角度分析影响碳排放的驱动因素的研究并不多见。

黄河流域是我国重要的能源基地,流域内煤炭储量占全国 50% 以上,影响着全国的经济格局^[17],而沁河作为黄河重要的支流,在黄河国家战略中占有重要的地位。沁河流域是我国重要的能源化工基地,流域内矿产资源丰富,其中煤炭业是沁河流域的支柱产业,这也决定了沁河流域碳排放强度较高的现实。同时,随着能源工业及相关产业的快速发展,流域内水资源利用情况的变化成为影响流域经济发展乃至碳排放的重要因素,实现沁河流域水碳协调发展对实现我国“双碳”目标意义重大。由于沁河流域内水资源情况复杂^[18],各地用水结构及效率相差较大,为了实现“双碳”目标,各地应根据自身发展阶段因地制宜调整对水资源的利用,制定低碳发展政策,协调水碳关系。此外,沁河流域作为黄河国家战略重要研究区,针对不同研究需求应选择什么样的空间范围一直没有统一的标准,需要尽快明确。

本文在界定沁河流域研究范围和对沁河流域碳排放趋势特征分析的基础上,采用 Tapio 脱钩模型

研究碳排放与水资源利用的脱钩关系,并采用 LMDI 模型构建碳排放分解模型分析其主要驱动因素,以期沁河流域实现“双碳”目标以及水碳协调发展提供参考。

1 沁河流域概况及区划

1.1 流域概况

沁河发源于山西省沁源县西北太岳山东麓的二郎神沟,属黄河支流。沁河自北而南流经山西沁源、安泽、沁水、阳城和河南的济源、沁阳、博爱、温县等县(市),于武陟南流入黄河,干流全长 485 km^[19]。选取位于武陟的沁河入黄河处为流域出口断面位置(113°26′52″E, 34°59′54″N),以 30 m 分辨率数字高程模型(DEM)数据为基础,综合运用地理信息技术及统计学方法,利用 ArcGIS 软件结合 SWAT 模型提取流域边界(111°58′33″~113°28′44″E, 34°54′30″~36°57′24″N,见图 1 流域区)。经统计计算得到沁河流域面积为 13 535 km²,其中,山西境内流域面积为 12 256 km²,占总流域面积的 90.54%;河南境内流域面积为 1 289 km²,占总流域面积的 9.46%。

1.2 流域区划

基于不同研究目的及需求,综合考虑沁河流域自然范围及周边行政区范围,参考相关文献^[20],将沁河流域研究范围划分为 5 种类型的分区,分别为干流区、流域区、水资源利用分区、流域涉及行政区及全行政区,如图 1 所示。

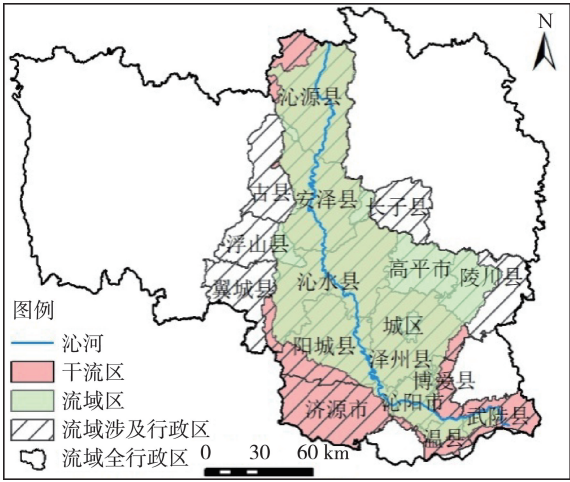


图 1 沁河流域区划

Fig. 1 Zoning map of the Qinhe River Basin

1.2.1 干流区

沁河干流区是指沁河干流流经的山西省和河南省内所有的县(市)级行政区所组成的区域。沁河干流自山西沁源依次流经安泽、沁水、阳城和河南济源、沁阳、博爱、温县、武陟等 9 个县(市)。沁河干流区是沁河流域重要的经济带和主要的人口聚集

地,有多处水库、涵闸等水利工程,是沁河流域重要的蓄供水地区,同时也是洪涝灾害易发地。如研究沁河生态廊道建设、洪涝灾害防控、河流健康评估、水质检测等可选用沁河干流区。

1.2.2 流域区

沁河流域区是指本文所划沁河流域范围,包括整个河流水系所影响的区域。沁河流域涉及山西长治市的沁源、长子,临汾市的安泽、翼城、古县、浮山,晋城市的沁水、阳城、高平、泽州、城区和陵川 12 个县(市);河南济源市和焦作市的沁阳、博爱、温县、武陟 5 个县(市),共 17 个县(市),但是由于在部分县(市)中流域面积只占了行政区划面积的一小部分,所以不包括全部的行政区划范围。如研究流域地形地貌特点、重大水利工程水资源调度、水资源承载力评估等可选择沁河流域区。

1.2.3 水资源利用分区

为因地制宜开发利用水资源,维持良好的生态环境,实现水资源可持续利用,应根据流域实际情况和特点合理划分水资源利用分区,2002 年修订的《沁河水资源利用规划报告》^[21],将沁河流域划分为 6 个水资源利用分区,分别为河源至马连圪塔、马连圪塔至张峰、张峰至沁河干流山西省界、丹河河源至任庄水库、任庄水库至丹河干流山西省界、山西与河南省界至沁河入黄口。如研究水资源开发利用情况、水资源格局变化趋势、水资源节约保护方案等可选择沁河水资源利用分区。

1.2.4 流域涉及行政区

沁河流域涉及行政区是指流域所涉及的山西和河南所有的 17 个县(市)的全部行政区划范围。区域内大部分地区位于中原经济区范围内,中原经济区的批复为沁河流域涉及行政区的经济社会发展带来了重大机遇。如研究产业结构调整、水资源供需平衡、水资源配置等可选择流域涉及行政区。

1.2.5 流域全行政区

流域全行政区包括沁河流经的长治、临汾、晋城、济源和焦作 5 市全境。沁河流域全行政区总面积约为 49 637.77 km²,是沁河流域面积的 3.67 倍,大多数地市的行政区面积远大于流域面积,但为了实现黄河流域生态保护和高质量发展目标,从统筹全局的角度看,把沁河流域 5 市作为一个整体考虑,是解决跨区域、多层次复杂问题的有效手段。如研究水文化传承、水资源协同管理、虚拟网络建设等可选择流域全行政区。

本文研究范围为沁河流域区,为方便表述,下文的沁河流域均指沁河流域区。

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 Tapio 脱钩模型

脱钩理论起源于物理学领域,后逐渐被应用于研究资源消耗与经济发展之间的关系,Tapio 脱钩模型^[22]采用弹性分析方法反映变量之间的脱钩状态,是常用的脱钩分析模型之一。本文采用 Tapio 脱钩模型分析沁河流域各市碳排放与水资源利用的脱钩状态。设置脱钩指数如下:

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta W/W} \tag{1}$$

式中: e 为脱钩指数; C 为总碳排放量; ΔC 为计算时段内的碳排放量变化值; W 为总用水量; ΔW 为计算时段内的用水量变化值。根据脱钩指数的大小以及碳排放和用水量变动的正负将脱钩状态进行分类,分类情况如表 1 所示。

表 1 碳排放与水资源利用脱钩关系分类

Table 1 Classification of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization

脱钩类型	脱钩状态	ΔC 变化方向	ΔW 变化方向	e
连 接	扩张连接	正向	正向	$>0.8 \sim 1.2$
	衰退连接	负向	负向	$>0.8 \sim 1.2$
脱 钩	强脱钩	负向	正向	≤ 0
	弱脱钩	正向	正向	$>0 \sim 0.8$
	衰退脱钩	负向	负向	>1.2
	强负脱钩	正向	负向	≤ 0
负脱钩	弱负脱钩	负向	负向	$>0 \sim 0.8$
	扩张负脱钩	正向	正向	>1.2

以 ΔW 正向变化时的情况对处于不同脱钩状态下的地区水碳协调状况进行解释。如表 1 所示,扩张连接状态表示用水量增速与碳排放增速接近,代表碳排放与水资源利用存在一定的连接关系,处于这种状态的地区水资源利用效率及低碳技术水平不高,属于水碳关系一般的地区;强脱钩状态表示随着用水量的不断加大,碳排放水平下降,代表碳排放与水资源利用的绝对脱钩,处于这种状态下的地区属于水碳协调发展地区;弱脱钩状态下,用水量增速大于碳排放增速,表示碳排放与水资源利用相对脱钩,处于弱脱钩状态的地区水资源利用效率较高,碳排放强度较低,属于水碳相对协调发展的地区;扩张负脱钩状态表示碳排放增速显著高于用水量增速,处于这种状态的地区采用的粗放型水资源利用模式以及其高碳特征,使得地区水碳关系较差。

2.1.2 LMDI 模型

脱钩模型能够有效衡量碳排放与水资源利用之间的相关关系,但不能说明碳排放的影响机理。为进一步探讨沁河流域碳排放变化的驱动因素,需要

对各时段的碳排放变化进行因素分解。LMDI 模型具有全分解、无残差等特点^[23],在碳排放的影响因素分析方面得到了广泛应用。本文采用 LMDI 模型构建碳排放分解模型如下:

$$C = \sum_i C_i = \sum_i WS_i E_i L_i \quad (2)$$

其中 $S_i = W_i/W$ $E_i = G_i/W_i$ $L_i = C_i/G_i$
式中: C_i 为第 i 种用途水对应的碳排放量; S_i 为第 i 种用途水的供水结构; E_i 为第 i 种用途水的用水效益; L_i 为第 i 种用途水的碳排放强度; W_i 为第 i 种用途水的用水量; G_i 为第 i 种用途水对应的产业增加值。本文采用 Costanza 等^[24] 提出的生态系统服务的静态价值估算方法计算各单元的生态效益。根据 LMDI 模型,将一定时段内地区的碳排放变化量表示为

$$\Delta C = \Delta C_W + \Delta C_S + \Delta C_E + \Delta C_L \quad (3)$$

式中: ΔC_W 为用水量变化引起的碳排放量变化,定义为水资源利用效应; ΔC_S 为供水结构变化引起的碳排放量变化,定义为供水结构效应; ΔC_E 为用水效益变化引起的碳排放量变化,定义为用水效益效应; ΔC_L 为碳排放强度变化引起的碳排放量变化,定义为碳排放强度效应。

由式(1)和式(3)得到脱钩指数的分解公式:

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 \quad (4)$$

其中

$$e_1 = \frac{\Delta C_W/C}{\Delta W/W} \quad e_2 = \frac{\Delta C_S/C}{\Delta W/W}$$

$$e_3 = \frac{\Delta C_E/C}{\Delta W/W} \quad e_4 = \frac{\Delta C_L/C}{\Delta W/W}$$

式中: e_1 为水资源利用指数; e_2 为供水结构指数; e_3 为用水效益指数; e_4 为碳排放强度指数。

2.2 数据来源

本文以 2000—2019 年为研究期,研究数据中 30 m 分辨率数字高程模型数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn);各市的生产总值、分行业增加值等基础国民经济指标数据来源于历年各市《统计年鉴》,地区生产总值按照 2000 年不变价格进行折算,各市的总用水量及分不同用途的用水量来源于各市《水资源公报》;各市的碳排放量及分行业的碳排放量来源于中国碳核算数据库(CEADs)(www.ceads.net.cn),部分年份缺失的碳排放数据根据邻近年份碳排放平均增长幅度估算;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。

3 结果与分析

3.1 碳排放趋势分析

沁河流域碳排放分布较不平衡,大部分地区在研究期内的碳排放趋势为增长状态,部分地区碳排放已趋于平稳。如图 2 所示,沁河流域各市碳排放存在显著差异,但 2000—2019 年除焦作外各市碳排放都呈现增长态势,但碳排放的增长过程存在差异性。沁河流域整体在研究期内碳排放呈现较为平稳的增长态势,但已逐步进入缓慢增长阶段;晋城与沁河流域碳排放过程基本一致,而长治、济源碳排放除同流域整体一样保持缓慢增长趋势外,近年来已逐渐出现碳排放减少的情况;与以上地区不同,临汾和焦作碳排放表现出较强的阶段性变化特征,均为先增长后减少,最后趋于平稳的态势,其中,临汾碳排放 2011 年之前保持缓慢的增长态势,2011 年之

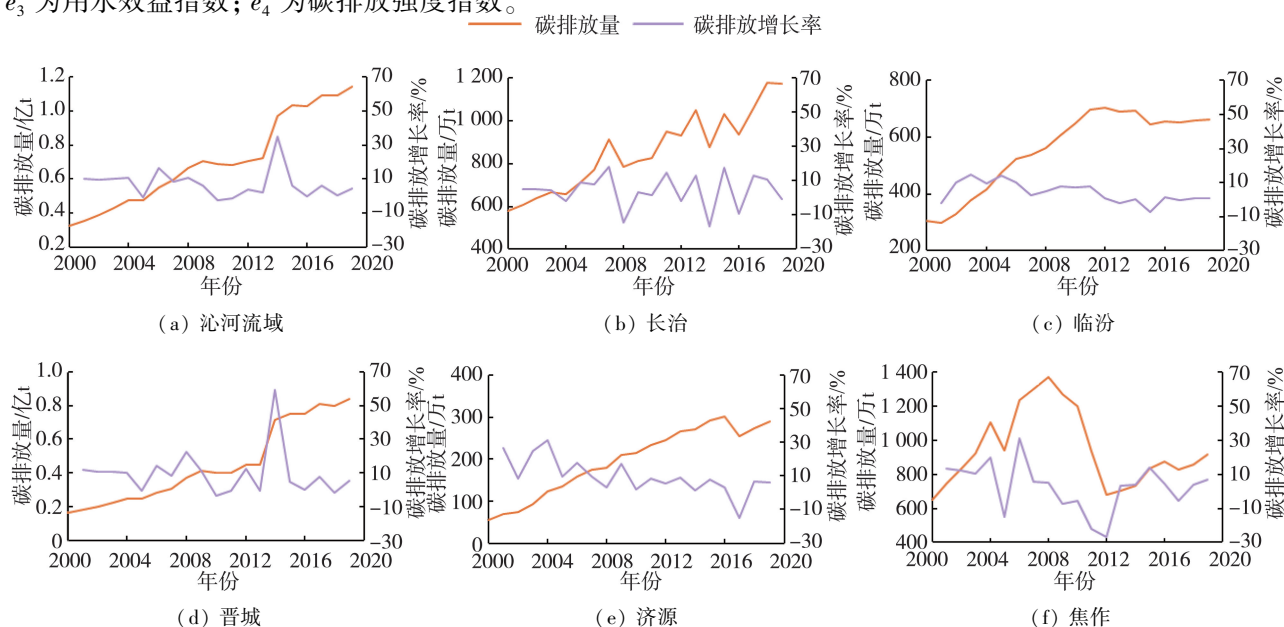


图 2 沁河流域 2001—2019 年碳排放量及碳排放增长率趋势

Fig. 2 Trends of carbon emission and its growth rate in the Qinhe River Basin from 2001 to 2019

后出现小幅减少并于 2015 年之后进入碳排放稳定阶段,焦作则在 2008—2012 年出现碳排放大幅减少的情况,且在 2012 年之后进入缓慢增长阶段。

沁河流域各市的碳排放增长率变化较为相似,整体上皆为波动下降的趋势,且在 2016 年之后都有趋近于 0 的趋势,说明沁河流域碳排放趋势整体往好的方向发展,但各市在不同阶段碳排放增长率存在差异性。其中,从碳排放增长率趋势看,沁河流域整体、临汾以及济源除个别年份有较大波动外,均呈现出较为平稳的下降趋势,而长治、晋城自 2007 年之后一直处于不稳定的上下波动状态,焦作则是在 2006—2012 年出现碳排放增长率大幅下降的情况,2012—2015 年有一个较大的提升之后趋于平稳;从碳排放增长率大小看,沁河流域、晋城和济源尽管碳排放增长率呈现减缓趋势,但大部分时间都是正值,而长治、临汾和焦作时常会出现碳排放负增长的情况。

通过对沁河流域各市碳排放及碳排放增长率情况的分析,可以发现沁河流域整体及多数地区碳排放最大值出现在 2016 年之后,且仍有增大的趋势,说明这些地区仍未有碳达峰的迹象,而尽管临汾和焦作碳排放的最大值分别出现在 2011 年和 2008 年,但临汾碳排放仍未有明显的减少趋势,焦作即使曾出现较大的减少趋势,但近年来其碳排放及增长率出现回升态势,因此临汾与焦作也无法说明出现碳达峰情况,沁河流域低碳发展仍需做进一步研究。

3.2 碳排放与水资源利用脱钩关系分析

研究期内沁河流域碳排放与水资源利用在较多年份都处于强负脱钩和扩张负脱钩的状态,也存在部分年份出现强脱钩和弱脱钩等较好的情况,按时间顺序大致上呈现由差到好再变差的趋势。2003 年之前沁河流域以强负脱钩为主,水碳关系属于不可可持续发展类型;2004—2009 年流域以扩张负脱钩为主,水碳关系属于粗放发展类型;2010—2013 年流域水碳关系较好,二者协调发展,而之后的年份流域再次出现强负脱钩、扩张负脱钩等状态。为分析碳排放与水资源利用脱钩状态的驱动因素,计算了各驱动因素的脱钩指数,结果见表 2。由表 2 可见,碳排放强度指数对脱钩指数负增长的贡献率最大,明显可以看出最近几年其贡献率皆接近一半,特别是 2014 年达到最高值 72.78%。水资源利用指数对脱钩指数增长的贡献率最大,一直保持在一个相对稳定的数值,其贡献率最高在 2009 年达到了 53.88%。供水结构指数和用水效益指数则呈现波动变化特征,且近年来其贡献率逐渐呈现减弱趋势。

沁河流域各市 2001—2019 年碳排放与水资源

利用脱钩指数如表 3 所示,结合表 2 可知,5 市不同年份脱钩状态差异较大,但总体呈现阶段性特征。具体来说,长治在 2009 年之前多处于强负脱钩和扩张负脱钩状态,水碳关系较差,2010—2012 年则出现短暂的弱脱钩及强脱钩情况,之后又处于扩张负脱钩、衰退脱钩等状态;临汾则明显的由 2009 年之

表 2 沁河流域 2001—2019 年脱钩指数分解结果

Table 2 Decoupling index decomposition results of the Qinhe River Basin from 2001 to 2019

年份	水资源 利用指数	供水结构 指数	用水效益 指数	碳排放 强度指数	脱钩指数
2001	1.00	-0.14	-0.64	0.57	0.79
2002	1.08	-0.15	-1.44	-1.56	-2.07
2003	1.11	-2.32	0.54	-0.63	-1.30
2004	1.02	-0.33	2.00	-1.28	1.41
2005	0.99	0.64	0.39	-2.31	-0.29
2006	1.02	-0.24	-0.54	0.96	1.20
2007	1.03	1.09	-1.58	2.50	3.04
2008	1.08	-1.64	-2.10	0.26	-2.40
2009	1.01	-0.08	-0.14	0.64	1.43
2010	0.95	0.88	-1.38	-0.70	-0.25
2011	0.96	-1.03	1.06	-1.17	-0.18
2012	0.99	0.22	-1.62	1.00	0.59
2013	1.01	-1.53	-2.09	3.61	1.00
2014	1.23	-0.29	0.51	-5.41	-3.96
2015	1.02	-2.75	0.31	4.07	2.65
2016	1.00	3.08	2.46	-5.06	1.48
2017	1.03	0.79	2.12	0.65	4.59
2018	1.00	2.17	2.56	-5.17	0.56
2019	1.03	1.21	0.35	-6.50	-3.91

表 3 沁河流域 5 市碳排放与水资源利用脱钩指数

Table 3 Decoupling index of carbon emissions and water resources utilization in five cities of the Qinhe River Basin

年份	长治	临汾	晋城	济源	焦作
2001	1.14	-0.11	0.67	3.53	1.24
2002	-0.66	-1.58	-1.97	0.85	-2.81
2003	-0.40	-1.26	-2.45	-0.87	-1.64
2004	0.68	-1.58	1.39	0.96	1.56
2005	1.30	-2.64	-0.16	1.09	-3.20
2006	0.60	-1.08	1.58	-1.75	1.38
2007	1.85	0.22	0.30	-3.20	-0.40
2008	2.00	-0.48	-1.93	2.09	1.14
2009	-0.51	-1.49	0.91	1.92	-2.14
2010	0.07	0.47	-0.13	0.74	0.90
2011	0.66	0.50	-0.02	-0.50	3.41
2012	-0.30	-0.20	1.55	0.18	-4.25
2013	2.00	-1.30	0.36	0.95	1.02
2014	1.42	-0.09	-8.86	-0.06	-0.40
2015	-2.07	-1.32	-0.98	0.60	1.12
2016	1.33	0.50	-0.04	-0.25	-3.12
2017	1.48	1.02	-3.67	-0.87	-2.60
2018	1.54	0.22	-1.31	0.91	-1.26
2019	0.39	-0.20	3.68	1.16	-2.85

前的强负脱钩为主转变为之后的弱脱钩和强脱钩状态为主,水碳关系较为良好;晋城和焦作阶段性特征较弱,但仍能看出两地早期多处于强负脱钩状态,在中期开始出现弱脱钩和强脱钩状态,近年来又恢复到强负脱钩状态较多的情况;济源2001—2005年以扩张连接状态为主,2006—2009年转变为强负脱钩和扩张负脱钩状态,再转变为2010年以后以弱脱钩和扩张连接状态为主,整体水碳关系有所提升。总的来看,各市从早期大都处于强负脱钩状态到最近几年强脱钩和弱脱钩状态频出,水碳关系逐渐向好,但仍有部分年份存在强负脱钩情况。

3.3 碳排放驱动因素分析

图3为沁河流域2001—2019年碳排放驱动因素分解结果,从碳排放变化量看,结合图2可知,2019年沁河流域整体碳排放相比于2001年多出了8210万t,流域整体的碳排放变化量各年基本都为正。分地区看,晋城碳排放变化量趋势与沁河流域整体保持一致,长治碳排放变化量时正时负,没有明显规律,济源各年的碳排放变化基本保持在一个较为稳定的增量值,而临汾与焦作则呈现阶段性变化的特征。可以看出,尽管各市的碳排放变化量规律不一致,但是最近几年的碳排放变化量皆有趋近于0的趋势。

从各驱动效应在不同年份的占比来看,2012年之前沁河流域大部分时间是水资源利用效应驱动效果显著,2012年后碳排放强度效应占主导地位,而水资源利用效应近年来影响较为微弱;用水效益效应是驱动碳排放减少的主要因素,但随着用水效率越来越难提升,用水效益的提升难度也逐渐加大,其驱动效应也逐渐减弱。而之前由于水资源的短缺与分布不均衡,供水结构效应多呈现驱动碳排放增长的效果,近年来随着更多的蓄调水工程如南水北调工程、河口村水库等投入应用,优化了地区的供水结构,供水结构效应逐渐开始驱动碳排放减少。晋城情况与沁河流域整体相似,2012年之前水资源利用效应占比较高,最高达到74.8%,之后碳排放强度效应占比较高,最高达84.4%。长治各效应变化较大,可以看出水资源利用效应与用水效益效应在各年的占比较高。临汾和济源各效应所起效果较为均衡,在不同年份均占据一定比例。焦作则是碳排放强度效应占主导地位,同样在2012年之后,由负贡献转变为正贡献。其原因可能是2012年之前,各市积极响应“十二五”规划节能减排目标,如焦作等地碳排放呈现减少或增长率变缓的趋势,其碳排放强度效应多为负贡献,但这难免会影响经济发展,随着2012年国务院正式批复《中原经济区规划》,位于中

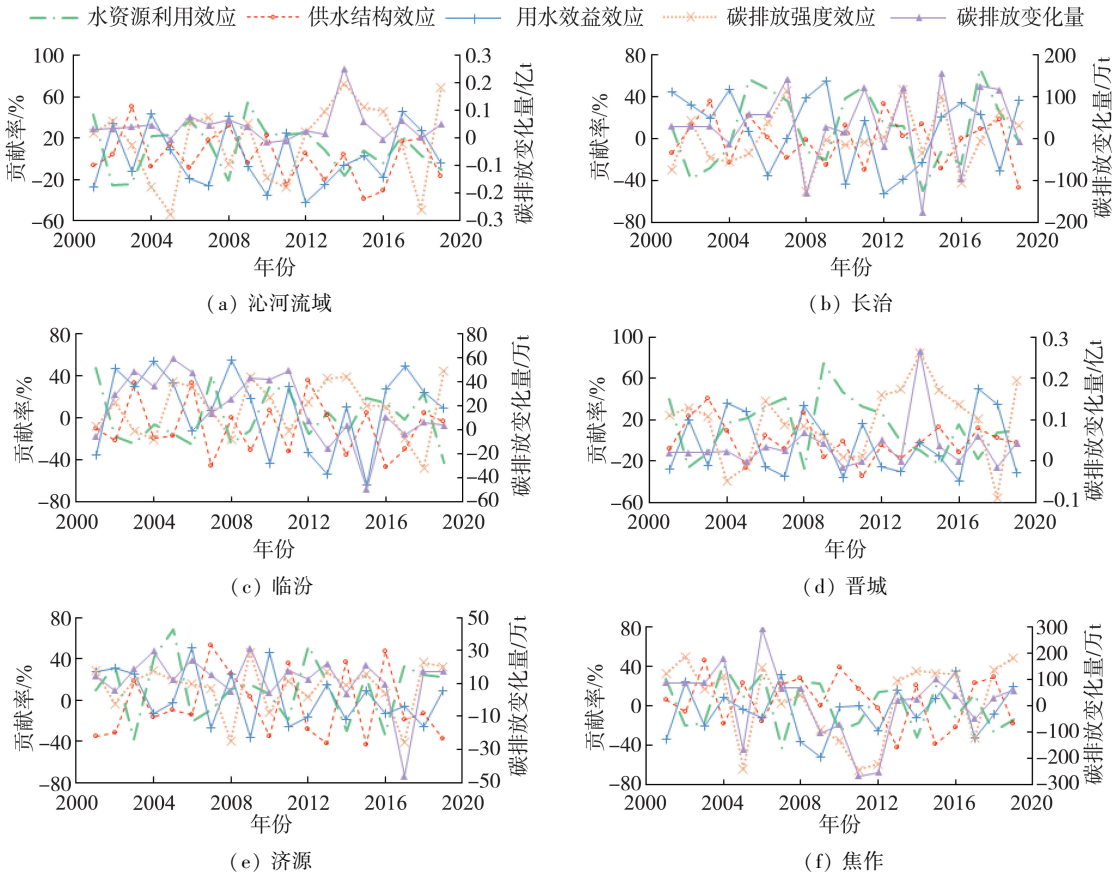


图3 沁河流域2001—2019年碳排放驱动因素分解

Fig.3 Decomposition of carbon emission driving factors in the Qinhe River Basin from 2001 to 2019

原经济区范围内的晋城、济源、焦作等地迎来了经济社会发展的重大机遇,发展经济的同时难免放松对节能减排的控制,导致碳排放有所增长,碳排放强度效应由负转正。

图4为沁河流域2001—2019年各驱动效应累积贡献率,可以看出,沁河流域水资源利用效应和碳排放强度效应的累积贡献率分别为207.1%和327.8%,两者是驱动沁河流域碳排放增长的主要因素,4个驱动因素的驱动效应按由大到小排序为:碳排放强度效应、水资源利用效应、供水结构效应、用水效益效应。长治影响碳排放增长的主要驱动因素为水资源利用效应和用水效益效应,累积贡献率分别为163.9%和152.0%;临汾碳排放强度效应与供水结构效应累积贡献率分别为165.5%和-163.3%,为驱动碳排放增长和减少的主要因素;晋城碳排放强度效应和水资源利用效应为驱动碳排放增长的主要因素;济源和焦作驱动碳排放增长的主要因素皆是碳排放强度效应,累积贡献率分别为233.8%和116.1%。各市应根据计算结果,尽量降低贡献率较高的驱动效应,将贡献率较小的效应尽可能转化为驱动碳排放减少的效应,促进水碳协调发展。

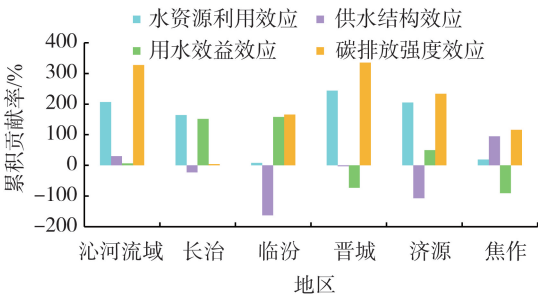


图4 沁河流域2001—2019年各驱动效应累积贡献率
Fig.4 Cumulative contribution rate of each driving effect in the Qinhe River Basin from 2001 to 2019

4 结论

a. 沁河流域整体及大部分地区碳排放呈现波动增长态势,其中焦作存在碳排放减少较大的情况,但近年来其碳排放及增长率出现回升态势,沁河流域要实现低碳发展仍需做进一步努力;沁河流域整体碳排放增长率皆为波动下降的趋势,其中长治、临汾和焦作已经开始出现负增长的情况。

b. 沁河流域碳排放与水资源利用多数时间处于强负脱钩和扩张负脱钩状态,其水碳关系大致上呈现由差到好再变差的趋势,其中碳排放强度指数对脱钩指数负增长的贡献率最大,而水资源利用指数对脱钩指数增长的贡献率最大;流域内各市则从早期大都处于强负脱钩状态到最近几年强脱钩和弱脱钩状态频

出,水碳关系逐渐向好。

c. 沁河流域水资源利用效应和碳排放强度效应是驱动沁河流域碳排放增长的主要因素,2012年之前水资源利用效应驱动效果显著,2012年之后碳排放强度效应占主导地位;用水效益效应是驱动碳排放减少的主要因素,但近年来供水结构效应所起作用逐渐变大。

参考文献:

[1] 左其亨,邱曦,钟涛.“双碳”目标下我国水利发展新征程[J].中国水利,2021(22):29-33. (ZUO Qiting, QIU Xi, ZHONG Tao. China's new journey of water conservancy development under the “carbon peak and neutrality” goals [J]. China Water Resources, 2021(22):29-33. (in Chinese))

[2] ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, MA Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis of water resource behaviors: determination and application of CEEA function table[J]. Water, 2023, 15(3): w15030431.

[3] 赵荣钦,黄贤金,郎文聚,等.碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J].自然资源学报,2022,37(5):1123-1136. (ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, YUN Wenju, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5):1123-1136. (in Chinese))

[4] 魏媛,简小玉.基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J].生态经济,2022,38(4):108-114. (WEI Yuan, JIAN Xiaoyu. Research evolution of carbon emissions from land use in Guizhou Province based on carbon peak and carbon neutrality and the according predictions [J]. Ecological Economy, 2022, 38(4):108-114. (in Chinese))

[5] 谢遵党,唐梅英,王建利,等.双碳目标下黄河流域风光资源一体化开发模式研究[J].人民黄河,2022,44(5):5-9. (XIE Zundang, TANG Meiyong, WANG Jianli, et al. Research on the integrated development model of hydropower-land-wind-solar in the Yellow River Basin under the “double-carbon” target [J]. Yellow River, 2022, 44(5):5-9. (in Chinese))

[6] 王菲,曹永强,范帅邦.“双碳”目标下东北三省水-能源纽带关系及网络特征分析[J].生态学报,2022,42(14):5692-5707. (WANG Fei, CAO Yongqiang, FAN Shuaibang. Analysis of water-energy ties and network characteristics in the three provinces of Northeast China under the “double carbon” target [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14):5692-5707. (in Chinese))

[7] 赵荣钦,余娇,肖连刚,等.基于“水-能-碳”关联的城市水系统碳排放研究[J].地理学报,2021,76(12):3119-

3134. (ZHAO Rongqin, YU Jiao, XIAO Liangang, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3119-3134. (in Chinese))
- [8] 罗雨莉, 潘艺蓉, 马嘉欣, 等. 污水再生与增值利用的碳排放研究进展[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 83-91. (LUO Yuli, PAN Yirong, MA Jiaxin, et al. Research advances on carbon emission of wastewater resource recovery and valorization[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 83-91. (in Chinese))
- [9] 张慧芳, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 不同灌溉模式下农业水能消耗及碳排放研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 119-126. (ZHANG Huifang, ZHAO Rongqin, XIAO Liangang, et al. The effects of irrigation methods on carbon emission and water-energy consumption of crop production[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 119-126. (in Chinese))
- [10] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002: 13-14.
- [11] 郭佳航, 左其亭, 李东林, 等. 新疆水资源利用与产业发展关联研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 34-42. (GUO Jiahang, ZUO Qiting, LI Donglin, et al. Research on relationship between water resources utilization and industrial development in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 34-42. (in Chinese))
- [12] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710-721. (HAN Mengyao, LIU Weidong, XIE Yitian, et al. Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 710-721. (in Chinese))
- [13] 郑炎辉, 何艳虎, 王金杰, 等. 基于脱钩理论的区域产业节水目标研究: 以广东省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 38-44. (ZHENG Yanhui, HE Yanhu, WANG Jinjie, et al. Study on the regional industrial water-saving target based on decoupling theory: a case study of Guangdong Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(4): 38-44. (in Chinese))
- [14] 向彩红, 覃秋蓓. 基于脱钩指数与LMDI的湖南省绿色低碳发展路径研究[J]. 环境科学导刊, 2022, 41(3): 19-26. (XIANG Caihong, QIN Qiubei. Study on green and low-carbon development path of hunan province based on decoupling index and LMDI model[J]. Environmental Science Survey, 2022, 41(3): 19-26. (in Chinese))
- [15] 李丽丽, 陈雯雯, 李东风. 经济增长与水资源消耗的脱钩实现路径研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 74-79. (LI Lili, CHEN Wenwen, LI Dongfeng. Study on the realization path of decoupling between economic growth and water resources consumption[J]. Yellow River, 2022, 44(4): 74-79. (in Chinese))
- [16] 孙诗阶, 许朗, 陈杰. 农业灰水足迹与农业经济增长的脱钩关系研究: 基于长江经济带 11 省市的实证分析[J]. 节水灌溉, 2022(6): 17-23. (SUN Shijie, XU Lang, CHEN Jie. A study on the decoupling relationship between agricultural grey water footprint and agricultural economic growth: based on the empirical analysis of 11 provinces and cities in the Yangtze River economic belt[J]. Water Saving Irrigation, 2022(6): 17-23. (in Chinese))
- [17] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 69-78. (ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 69-78. (in Chinese))
- [18] 刘强军, 牛晨煜, 赵珺. 黄河中游沁河流域汛期降水特征及突变分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 19-22. (LIU Qiangjun, NIU Chenyu, ZHAO Jun. Characteristics and mutation analysis of precipitation in flood season in Qinhe River Basin of middle Yellow River[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 19-22. (in Chinese))
- [19] 马钰其, 陈元芳, 张学成. 沁河年径流量非一致性水文频率分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(7): 24-27. (MA Yuqi, CHEN Yuanfang, ZHANG Xuecheng. Frequency analysis of annual runoff for Qinhe River under non-stationary environment[J]. Yellow River, 2021, 43(7): 24-27. (in Chinese))
- [20] 左其亭, 张志卓, 李东林, 等. 黄河河南段区域划分及高质量发展路径优选研究框架[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 209-216. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, LI Donglin, et al. Regional division and research framework for high-quality development path optimization in the Henan section of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 209-216. (in Chinese))
- [21] 水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 沁河水资源利用规划报告[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 2002.
- [22] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [23] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.
- [24] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

(收稿日期: 2022-09-09 编辑: 熊水斌)