

黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征

王菲¹, 陈敏², 曹永强², 杨亚锋³

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084;
3. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210)

摘要:基于区域环境扩展型投入产出模型,对黄河流域水-土-能-碳资源消耗及足迹流动、区域资源及碳排放流通状况、水-土-能-碳网络特征进行了模拟分析。结果表明:2017年黄河流域九省区水资源消耗总量为1073.69亿m³,占用土地面积为266.69万km²,能源消耗为6.95亿t(标准煤),碳排放量为31.57亿t。在流域内部足迹流动中,河南水、土、能、碳足迹均最大,综合循环利用率最高;宁夏是最大的虚拟水资源供应地;山西能、碳足迹调出量最大;山东土地足迹循环利用率最高;青海是主要的水、土、能资源供应地,四川承接了黄河流域19.3亿t碳足迹。黄河流域水-土-能-碳关联系统的生态关系主要以竞争关系为主,控制、掠夺关系占比较小,无互利共生关系;水-土-能-碳关联系统的生态关系处于高冗余、低效率状态,能源网络的效率最高。

关键词:“双碳”目标;水-土-能-碳;关联系统;网络特征;黄河流域

中图分类号:K903

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)04-0031-07

Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin//WANG Fei¹, CHEN Min², CAO Yongqiang², YANG Yafeng³ (1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Based on the regional environmentally-extended input-output model, the resources consumption and footprint flow of water-land-energy-carbon in the Yellow River Basin, the circulation of regional resources and carbon emissions, and the characteristics of water-land-energy-carbon network were analyzed. The results show that in 2017, the water consumption of nine provinces in the Yellow River Basin was $1073.69 \times 10^8 \text{ m}^3$, the occupied land area was $266.69 \times 10^4 \text{ km}^2$, the energy consumption was $6.95 \times 10^8 \text{ t}$ of standard coal, and the carbon emission was $31.57 \times 10^8 \text{ t}$. In the internal footprint flow of the Yellow River Basin, Henan Province has the largest water, land, energy, and carbon footprints and the highest comprehensive recycling utilization rate. Ningxia is the largest virtual water resource supply area. Shanxi Province has the largest transfer of energy and carbon footprints. Shandong Province has the highest land footprint recycling utilization rate. Qinghai Province is the main source of water, land, and energy resources. Sichuan Province has undertaken $19.3 \times 10^8 \text{ t}$ of carbon footprint in the Yellow River Basin. The water-land-energy-carbon system in the Yellow River Basin is dominated by competition, with less control and plunder, and without mutualism. The water-land-energy-carbon correlation system is in a state of high redundancy and low efficiency, and the energy network has the highest efficiency.

Key words: “double carbon” target; water-land-energy-carbon; correlation system; network characteristics; Yellow River Basin

水资源、土地资源和能源作为地球表层系统的重要资源基础^[1-2],既相对独立又紧密关联,形成一个关联互馈系统,而水-土-能之间的社会经济生产活动加快了碳排放的非期望产出。联合国《2030年

可持续发展议程》指出:要确保为所有人提供可持续的水资源、现代能源,积极应对气候变化,实现粮食安全。但随着气候变暖、资源短缺以及全球性生态问题凸显,碳达峰、碳中和目标与水资源、土地资

基金项目:国家自然科学基金项目(52379021,52079060);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技重点基金(2021nkzd02)

作者简介:王菲(1995—),女,博士研究生,主要从事水-土-能-碳关联系统研究。E-mail:17866544161@163.com

通信作者:曹永强(1972—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

源和能源消耗之间存在较为复杂的深层次矛盾,水-土-能-碳关联系统面临的不确定性显著增加^[3]。在此背景下,探究水-土-能-碳关联系统网络特征具有重要的理论和实践价值。

目前,国内外有关水-土-能-碳关联系统的研究还相对较少,且多集中在两要素或三要素的研究。在水-能-碳关系研究中,水循环系统碳排放^[4]、水系统运行的某一环节碳排放强度^[5]、水系统运行中的节能减排问题^[6]、水资源高效利用情景下的节能潜力^[7]等理论研究较为丰富,实证研究则主要关注水循环的某一环节,如引水工程^[8]、农业用水^[9]、工业用水碳排放^[10]以及居民和公共生活用水碳排放^[11]等,常用的评估方法主要包括碳排放因子评估法^[12]、全生命周期法^[13]、投入产出法^[14]和水-能源-温室气体关联模型^[15]等。而土-能-碳关系研究主要集中于土地利用变化下碳排放作用机理研究以及碳排放视角下生态风险研究。国外学者从陆地生态系统碳循环的角度开展了不同土地利用类型的碳源、碳汇能力测算,国内学者则具体研究了森林、耕地、草地、湿地等不同生态系统类型变化对陆地生态系统碳储量的影响,并基于文献数据库测算^[16]、实地野外采样结合 TM 影像数据等方式进行碳源汇估算,如赵荣钦等^[17]构建了水-土-能-碳耦合作用的理论框架,江文渊等^[18]基于水-土-能-碳关系对我国工农业碳排放效率和减排潜力进行了探究。

2019 年 9 月 18 日,习近平总书记在河南省郑州市主持召开座谈会,提出了黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略。黄河流域是我国重要的能源区和粮食主产区,土地、能源、矿产资源丰富,具有很好的风、光、土、热条件,但水资源严重短缺,水土流失、生态系统脆弱等问题突出,长期以来,以农业生产、能源开发为主的经济社会发展方式与流域资源环境特点和承载能力不相适应^[19]。本文为厘清黄河流域水-土-能-碳关联系统网络特征,基于省级尺度,以部门为单元量化资源和碳排放之间的关联关系,分析虚拟资源足迹及碳排放足迹流通格局,以期为促进黄河流域高质量发展,缓解水-土-能资源紧张以及碳排放超标局面提供参考。

1 研究区概况

黄河是我国的第二长河,自西向东分别流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东。本文研究区域为黄河流经的九个省区,总面积约为 356.86 万 km²。由于受到大气环流和季风影响,区域内气候差异较大,随着地形三级阶梯,温度由西向东、自北向南由冷变暖;降水量由东向西逐渐

减少,光照充足。耕地面积约占全国总耕地面积的 14%,是我国重要的粮食产区,而内蒙古和青海则是我国主要的畜牧业基地。黄河上游地势差异大,蕴含丰富的水电资源,中游城市鄂尔多斯、榆林、晋城是我国重要的煤炭产地,下游多丘陵、平原,天然气及石油资源丰富,奠定了我国社会经济发展的重要基础。

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 水-土-能-碳投入产出关系框架

在投入产出表中,投入按纵向排列,产出按横向排列,该表反映了经济部门间商品生产与物料交换之间的关系^[20]。本文将黄河流域九省区以外的其他地区视为一个整体,把水资源消耗、能源消耗、土地消耗三种资源消耗与碳排放系统相结合,构建黄河流域 2017 年环境扩展型投入产出模型,探究黄河流域部门及区域间虚拟资源(包括水资源、土地资源、能源)足迹及碳足迹在空间流通变化情况。

足迹指的是一个国家、地区或一个人在一定时期内消费的所有产品和服务所需要的资源总量^[21]。本文采用基于扩展型投入产出模型分析的足迹指标来计算各部门消费的资源量及碳排放量。部门足迹强度为足迹与最终需求的比值,可分为直接足迹强度、虚拟足迹强度两种^[22]。将直接足迹强度对角化处理,与完全消耗系数矩阵相乘,得到地区所有部门的虚拟足迹强度,再根据直接足迹强度和虚拟足迹强度可计算各部门的直接足迹和虚拟足迹。

2.1.2 水-土-能-碳生态网络分析模型

生态网络分析模型是指利用系统建模模拟系统内部流动与结构的模型,能够表征社会经济系统的资源循环利用情况,评估系统稳定性以及区域间的动力学关系^[23]。本文应用生态网络分析模型模拟黄河流域水-土-能-碳网络中省份间组分关系。

a. 芬恩循环指数。本文选取芬恩循环指数来量化水-土-能-碳网络系统中循环流的强度。

b. 控制分配系数和依赖分配系数。利用控制分配系数和依赖分配系数来模拟部门和省份间控制和依赖关系,从而确定其关联管理的调节路径。

c. 效用分析。借助效用分析定量解析每个节点之间利用和被利用的生态关系,从而判断每个节点之间内在的共生、竞争、掠夺、控制或中性等生态关系。

d. 系统鲁棒性。效率和冗余之间相互协调才能保障耦合系统的可持续发展,通过耦合网络的上升性和发展能力计算系统鲁棒性。

2.2 数据来源

投入产出表选自 2017 年中国 31 个省级地区区域间投入产出表(<http://www.ceads.net/>,这是目前可获得的最新的投入产出表)。根据国家统计局《三次产业划分规定》和各部门属性将 42 部门合并为 8 个部门,分别为农业,采选业,制造业,电力、热力及水的生产与供应业,建筑业,交通运输业,商业,公共管理和服务业。黄河流域九省区部门直接水资源消耗量来自九省区 2017 年的水资源公报,土地占用量主要参考 Gong 等^[24]的成果以及九省区的统计年鉴和《第三次全国国土调查》;直接能源消耗量和碳排放数据来自中国碳核算数据库。

3 结果与分析

3.1 水-土-能-碳消耗核算

3.1.1 水-土-能-碳直接消耗核算

由表 1 可知,2017 年黄河流域九省区水土资源消耗主要集中在农业,水资源消耗量高达 826.99 亿 m³,占部门水资源消耗总量的 77.02%;能源消耗量为 6.95 亿 t(标准煤,下同)、碳排放量 31.57 亿 t,主要集中在除建筑业以外的第二产业及交通运输业,第二产业是能源消耗的主体,交通运输业的发展主要受经济规模的影响,一般来说,经济越发达的地区,交通运输业越完善,该行业作为高能耗、高污染部门,是碳排放的主要来源之一。制造业是能源消耗量最大的部门,占能源消耗总量的 53.68%^[25]。碳排放最高的部门是电力、热力及水的生产和供应业,电力需求的高速增长,导致该行业碳排放量最高。制造业虽消耗了大量能源,但由于煤炭使用量的减少以及能源循环利用率的提高,使得碳排放量相对可控^[26]。第一产业、商业、公共管理和服务业的能源消耗则相对较少。

表 1 黄河流域水-土-能-碳直接消耗量				
部门	水资源消耗量/亿 m ³	土地消耗量/万 km ²	能源消耗量/亿 t	碳排放量/亿 t
农业	826.99	263.20	0.19	0.36
采选业	17.65	0.09	0.72	1.74
制造业	50.68	1.11	3.73	10.18
电力、热力及水的生产和供应业	123.87	0.09	0.86	16.68
建筑业	8.28	0.49	0.17	0.17
交通运输业	6.21	0.73	0.82	1.43
商业	23.87	0.23	0.28	0.55
公共管理和服务业	16.14	0.68	0.20	0.46

3.1.2 水-土-能-碳虚拟足迹核算

2017 年黄河流域九省区八部门水-土-能-碳足迹见图 1,其中,水足迹 6 569.25 亿 m³、土地足迹 1 883.58 万 km²、能源足迹 33.86 亿 t、碳足迹

318.24 亿 t。黄河流域高能、高碳足迹都集中在第二产业。其中,电力、热力及水的生产和供应业的能源足迹及碳足迹皆最高,碳足迹占有部门碳足迹的 87.67%。电力、热力及水的生产和供应业对能源的直接消耗较少,主要依赖于其他产业的能源输送,大量能源的流入使得该部门碳排放量居高不下。农业中大量灌溉用水导致水资源的直接投入最大,

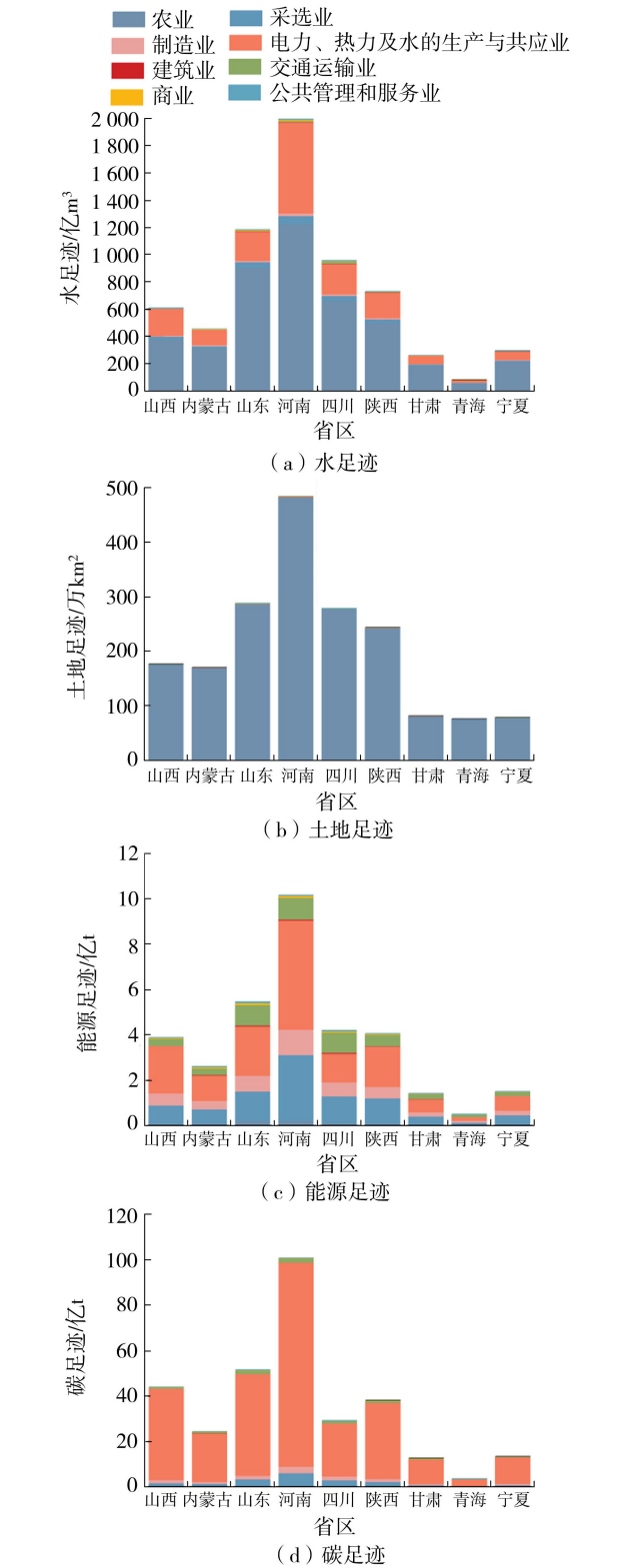


图 1 黄河流域水-土-能-碳虚拟足迹

随着农产品的进一步加工、运输、仓储,水足迹实现了部门转移,因此,农业水足迹较直接水资源投入占比降低,产生的碳足迹较少。从省区角度分析,河南水-土-能-碳足迹最高,分别为水足迹 1 998 亿 m^3 、土地足迹 485.56 万 km^2 、能源足迹 10.17 亿 t 以及碳足迹 101 亿 t。山东能源消耗及碳排放量最大,但随着资源贸易的流通,水-土-能-碳足迹在伴随着行业转移的同时也实现了空间流动,并逐渐流向经济体量大、人口密集、市场交易活跃的地区。

3.2 水-土-能-碳网络流动特征分析

3.2.1 水-土-能-碳足迹流动分析

水-土-能-碳虚拟足迹省际流动见图 2(图中以不同的颜色代表各省区之间的流动,可根据线条的粗细识别出流量的大小)。从流域内部流动来看,河南是最大的水、土、能、碳足迹消费地区,其水、土、能、碳足迹接收量分别占流域内足迹流动量的 43.8%、31.4%、47.4%、47.4%,这与孙锦等^[27]研究结果一致,究其原因,河南是中国重要的粮食主产区以及南水北调受水区,农业耗水量及耕地面积都很大,加之水资源匮乏及人口规模庞大,导致该地区资源供应不足,依赖于周围省区的资源供应。同时,该省发达的加工业贸易使得该地区水、能、碳足迹大量流向流域外省区。宁夏是最大的虚拟水资源供应地,该地区以农业为主,农业的直接用水系数较高,优势特色农产品产业带完整,产品生产消耗大量水资源,伴随着产品交易虚拟水资源被转移到省外,成为最大的虚拟水资源供应地^[27]。山西是能、碳足迹调出量最大的省份,其主要流向河南、陕西、四川和山东;能、碳足迹的流出主要体现在煤炭资源的流动和运输以及煤炭燃烧伴随的碳排放上。河南承接了

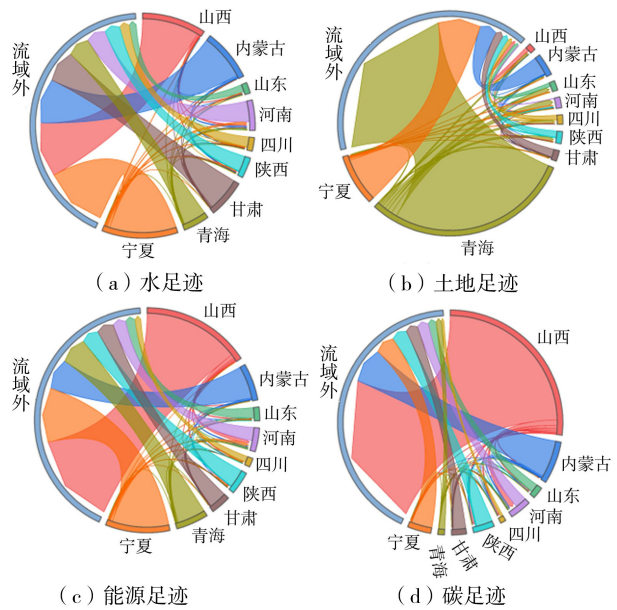


图 2 水-土-能-碳虚拟足迹省际流动

黄河流域 19.3 亿 t 碳足迹,这可能与能源跨区域调配产生碳排放有关。总体来看,水、土、能、碳伴随着商业贸易使得资源在区域间实现重新配置,虚拟足迹从西部流入东部,从欠发达地区流入发达地区。

3.2.2 水-土-能-碳网络循环率分析

芬恩循环指数能够表征流动网络中循环流的比例。对比黄河流域水-土-能-碳网络流通特征可知,在水-土-能-碳网络系统中区域间差异较大,河南水、土、能、碳综合循环利用率最高,为 60.05%,其中能源和碳循环率占比超过 76.5%;其次是山东和山西,综合循环利用率分别为 38.76%、35.25%,其中,山西碳循环利用率较高,水、土、能循环率较低;山东和陕西水、土、能、碳综合循环利用率相差无几,多重资源流入与流出基本持平;土地足迹循环利用率山东最高,为 8.63%;宁夏、青海、甘肃的水、土、能、碳综合循环利用率最低,分别为 1.22%、1.67%、3.84%。

3.3 水-土-能-碳网络动力学特征分析

3.3.1 水-土-能-碳网络控制-依赖特征

通过研究水-土-能-碳网络控制关系可知,甘肃水资源主要受到青海和宁夏的约束,山东水土资源受到黄河流域其他省区的普遍控制。总体来看,甘肃、宁夏、青海的水土资源普遍控制黄河中下游省区,山东、河南水土资源受到其他省区的控制。山西的能源资源对内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃以及黄河流域以外的其他省区都有普遍控制力,其中,对内蒙古控制度最高。山西作为主要碳排放源地,对其他地区碳具有普遍控制能力,尤其对晋陕蒙控制力最强^[28]。河南碳排放主要受到黄河流域内部的控制,且对黄河流域以外的省区进行控制。

黄河流域水-土-能-碳网络系统省区间的依赖程度存在较大空间差异。河南、四川和陕西对黄河流域以外的地区存在严重水资源依赖,使得黄河流域内部水资源流动更为不稳定。山东水、土资源受到黄河流域其他省区的普遍依赖,陕西对河南水、土资源依赖程度最大,分别为 41.09% 和 49.15%。豫鲁为我国主要粮食主产区,农业是水、土资源消耗最大的部门,且用水、用土系数最高,因此流域内省区普遍依赖于豫鲁两省水、土资源^[29]。所有地区对山西碳排放都存在依赖关系,跨区域煤炭运输以及电力输送导致山西碳排放影响到其他省区。

3.3.2 水-土-能-碳网络交互特征

黄河流域水-土-能-碳关联系统共生关系见图 3(图中序号 1~10 分别表示山西、内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海、宁夏以及黄河流域外地区)。可见,黄河流域主要以竞争关系为主,控制、掠夺关系占比较少,无互利共生关系。水-土-能-碳

竞争关系主要表现为河南对内蒙古和山东的竞争,四川对山西、河南的竞争等。控制关系主要体现在黄河流域以外地区对青海的控制。竞争关系在碳网络系统中占比最高,控制关系主要体现在能源网络系统中,掠夺关系在土地网络系统中最为明显。在水资源网络系统中流域内部水资源以竞争关系为主,在土地网络系统中主要为流域内部的竞争-掠夺关系,在能源和碳网络系统中主要以流域外部对流域内省区能源的控制关系为主。从省际生态关系看,内蒙古与山西的水、能、碳资源存在竞争关系,河南与内蒙古及山东的水、土、能、碳资源有竞争关系,陕西与河南的能、碳资源也为竞争关系。由此可以看出,竞争关系是水-土-能-碳网络效用矩阵关系中最主流的关系,这种状态的长期存在会一定程度上造成生态系统的不稳定发展,严重影响水-土-能-碳系统效率的提高以及规模的扩大。同时,黄河流域内水-土-能-碳网络间无互利关系,说明该系统的资源流动极不协调,亟须加强省际合作。

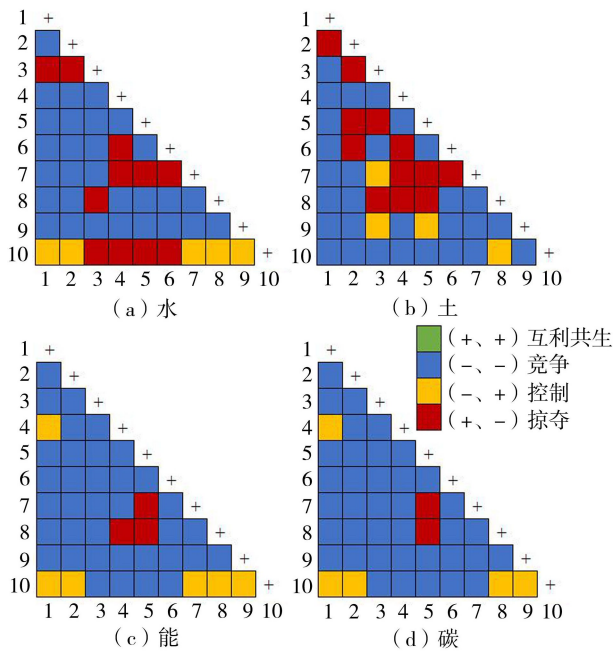


图3 水-土-能-碳关联系统共生关系

3.3.3 水-土-能-碳可持续性特征

研究发现黄河流域水-土-能-碳网络处于高冗余、低效率状态。其中,能源网络的效率和可持续水平较高,系统鲁棒性为0.367;水网络次之,系统鲁棒性为0.364;土地网络和碳排放网络效率和可持续水平相当,系统鲁棒性为0.363。说明目前黄河流域水-土-能-碳足迹网络系统整体相差不大,网络结构约束性较低,缺乏扩张的活力和生存所需的自组织能力,需采取措施提高系统的可持续性和组织能力^[30]。

3.4 讨论

黄河流域水土资源的消耗主要在农业部门,因此应提高农业灌溉技术,大力发展精准灌溉农业以及土地集约型产业,调节产业结构缓解水土资源紧缺压力^[31];能源消耗、碳排放主要集中在制造业和电力、热力及水的生产和供应业,为控制高能高碳带来的产业和区域限制,应努力提高能源利用效率,并在生产源头减少碳流量^[32]。黄河流域水-土-能-碳关联系统网络呈高冗余、低效率状态,河南是最大的水、土、能、碳足迹消费地区,青海是主要的资源供应地,四川承接了黄河流域大部分碳足迹。该研究结果对资源协调利用和空气污染治理政策的制定具有重要现实意义。一方面,面对区域水-土-能-碳网络低效率特征,在对水-土-能资源综合利用以及与碳排放关联关系方面要加强全局意识,统筹协调流域生态保护与高质量发展的关系;另一方面,针对流域内各省区资源禀赋差异,应发挥各省区资源优势,如河南、山东等发达省区应充分利用经济优势,加强清洁能源生产,主动向四川、青海等省区提供技术支持,提高流域内部凝聚力^[33-34]。此外,由于本文采用的投入产出表5年更新一次,致使数据的时效性不足,但区域一定时段内水-土-能-源关联关系具有相对稳定性,因此认为本文研究结果对清晰认识黄河流域水-土-能-碳关系,促进黄河流域高质量发展具有借鉴意义。

4 结 论

a. 2017年黄河流域九省区部门水资源消耗总量为1073.69亿m³、占用土地面积为266.69万km²、能源消耗为6.95亿t、碳排放量为31.57亿t,水、土、能源消耗主要集中在农业,能源消耗、碳排放主要集中在制造业和电力、热力及水的生产和供应业;水足迹为6569.25亿m³、土地足迹为1883.58万km²、能源足迹为33.86亿t、碳足迹为318.24亿t,电力、热力及水的生产和供应业能、碳足迹最高,建筑业水、能、碳足迹最小,河南水、土、能、碳足迹最高。

b. 河南是最大的水、土、能、碳足迹消费地区,水、土、能、碳综合循环利用率最高,达60.05%;宁夏是最大的虚拟水资源供应地;山西是能、碳足迹调出量最大的省份,集中流向河南;山东碳足迹主要向河南和四川进行转移;青海是主要的水、土、能资源供应地;四川承接了黄河流域19.3亿t碳足迹。

c. 甘肃水资源主要受到青海和宁夏的约束,山东水、土资源受到黄河流域其他省区的普遍控制;河南水、土、碳受到黄河流域的普遍控制,且对黄河流域以外的省区进行碳排放控制;四川、山东和陕西对

黄河流域以外的区域能源和碳排放依赖较强;所有省区对山西碳排放都存在依赖关系。

d. 黄河流域水-土-能-碳关联系统的生态关系主要以竞争关系为主,控制、掠夺关系占比较少,无互利共生关系。在水资源网络系统中,流域内部水资源以竞争关系为主;在土地网络系统中,主要关系为流域内部的竞争-掠夺关系;在能源和碳网络系统中,主要以流域外部对流域内省区能源的控制关系为主。总体上,水-土-能-碳网络处于高冗余、低效率状态。

参考文献:

[1] 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))

[2] QU S, GUO Y, MA Z, et al. Implications of China's foreign waste ban on the global circular economy [J]. Resources, Conservation and Recycling,2019,144:252-255.

[3] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):8-15. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):8-15. (in Chinese))

[4] SU X, SHAO W W, LIU J H, et al. How does sponge city construction affect carbon emission from integrated urban drainage system? [J]. Journal of Cleaner Production,2022,363:132595.

[5] VALEK A M, SUSNIK J, GRAFAKOS S. Quantification of the urban water-energy nexus in Mexico City, Mexico, with an assessment of water-system related carbon emissions[J]. Science of the Total Environment,2017,590:258-268.

[6] KUZNETSOV M, TSIBULSKY S, BOLDYRYEV S. Optimisation of heat distribution system by using the inter-cluster connections model accounting for water consumption and emissions [J]. Journal of Cleaner Production,2022,369:133373.

[7] CAI B M, WANG F, ZHANG W, et al. Potential water and energy savings for reducing urban water supply loss in China[J]. Acs ES&T Water,2022,2(4):539-546.

[8] LIU J, CHEN S, WANG H, et al. Calculation of carbon footprints for water diversion and desalination projects [J]. Energy Procedia,2015,75:2483-2494.

[9] WANG L G, ZHU R, YIN Z L, et al. Quantifying the spatial-temporal patterns and influencing factors of

agricultural carbon emissions based on the coupling effect of water-land resources in arid inland regions [J]. Frontiers in Environmental Science,2022,10:908987.

[10] ZHOU N, ZHANG J J, KHANNA N, et al. Intertwined impacts of water, energy development, and carbon emissions in China[J]. Applied Energy,2019,238:78-91.

[11] 郑思伟,唐伟,闫兰玲,等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体的核算及排放特征研究[J]. 环境污染与防治,2019,41(5):556-559. (ZHENG Siwei, TANG Wei, YAN Lanling, et al. Accounting and emission characteristics study on co-control of pollutants and greenhouse gases in municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Pollution & Control,2019,41(5):556-559. (in Chinese))

[12] 闫旭,邱德志,郭东丽,等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J]. 环境科学,2018,39(3):1256-1263. (YAN Xu, QIU Dezhi, GUO Dongli, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China[J]. Environmental Science,2018,39(3):1256-1263. (in Chinese))

[13] 刘金良,王长波,杨子彦,等. 基于混合生命周期评价模型的我国食物系统水资源消耗及二氧化碳排放核算[J]. 中国环境管理,2022,14(6):88-99. (LIU Jinliang, WANG Changbo, YANG Ziyang, et al. Accounting for water consumption and CO₂ emissions in China's food system based on an hybrid LCA model[J]. Chinese Journal of Environmental Management,2022,14(6):88-99. (in Chinese))

[14] 王永琴,周叶,张荣. 碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J]. 环境工程,2017,35(1):155-159. (WANG Yongqin, ZHOU Ye, ZHANG Rong. A review of the research methods on influencing factors of carbon emission and carbon footprint [J]. Environmental Engineering,2017,35(1):155-159. (in Chinese))

[15] NEGI R, CHANDEL M K. Assessment on embodied energy and greenhouse gas emissions in urban water system from life cycle perspective: a typical case of India [J]. Sustainable Cities and Society,2022,86:104-152.

[16] 杨元合,石岳,孙文娟,等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574. (YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J] Scientia Sinica (Vitae), 2022,52(4):534-574. (in Chinese))

[17] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报,2016,71(9):1613-1628. (ZHAO Rongqin, LI Zhiping, HAN Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system[J]. Acta Geographica Sinica,2016,

- 71(9):1613-1628. (in Chinese))
- [18] 江文渊,曾珍香,张征云.考虑“水-土-能-碳”关联的我国工农业碳排放效率及减排潜力研究[J].中国环境管理,2020,12(6):120-129. (JIANG Wen yuan, ZENG Zhenxiang, ZHANG Zhengyun. China's industrial and agricultural carbon emission efficiency and reduction potential considering the water-land-energy-carbon nexus [J]. Chinese Journal Environmental Management, 2020, 12(6):120-129. (in Chinese))
- [19] 赵子萌,曹永强,常志冬,等.黄河沿线九省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J].水资源保护,2023.39(6):121-129. (ZHAO Zimeng, CAO Yongqiang, CHANG Zhidong, et al. Coupling and coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2023. 39(6):121-129. (in Chinese))
- [20] 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 Shuai bang. 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))
- [21] 赵勇,黄可静,高学睿,等.黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J].水资源保护,2022,38(4):39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4):39-47. (in Chinese))
- [22] 刘秀丽,郭丕斌,王昕.煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素[J].生态学报,2020,40(24):8999-9010. (LIU Xiuli, GUO Pibin, WANG Xin. Industrial energy-water footprint efficiency and its influencing factors in coal resource-based areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24):8999-9010. (in Chinese))
- [23] 彭焜,朱鹤,王赛鸽,等.基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究:以湖北省为例[J].自然资源学报,2018,33(9):1514-1528. (PENG Kun, ZHU He, WANG Saige, et al. Energy-Water nexus in Hubei Province based on system input-output analysis and ecological network analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9):1514-1528. (in Chinese))
- [24] GONG P, CHEN B, LI X C, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): preliminary results for 2018[J]. Science Bulletin, 2020, 65(3):182-187.
- [25] 雷玉桃,张萱,孙菁靖.中国制造业部门碳减排潜力估算及预测[J].统计与决策,2023,39(4):168-173. (LEI Yutao, ZHANG Xuan, SUN Jingjing. Estimation and prediction of carbon emission reduction potential in China's manufacturing sector [J]. Statistics & Decision, 2023, 39(4):168-173. (in Chinese))
- [26] 张静.中国制造业对外直接投资的碳排放效应[D].大连:大连理工大学,2019.
- [27] 孙锦,刘源,赵荣钦,等.基于投入产出的中国省际农业水-土-碳足迹流动分析[J].生态学报,2022,42(23):9615-9626. (SUN Jin, LIU Yuan, ZHAO Rongqin, et al. The flow analysis of inter-provincial agricultural water, land and carbon footprints in China based on input-out model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9615-9626. (in Chinese))
- [28] 熊睿.“双碳”目标下黄河流域“能-水-碳”耦合关系和协同利用研究[D].太原:山西财经大学,2023.
- [29] WANG S, LIU Y, CHEN B. Multiregional input-output and ecological network analyses for regional energy: water nexus within China [J]. Applied Energy, 2018, 227:353-364.
- [30] 赵丹丹.基于投入产出和“生态网络”的京津冀水足迹演变趋势与水资源调控研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [31] 王学婷,张俊飏.双碳战略目标下农业绿色低碳发展的基本路径与制度构建[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):516-526. (WANG Xueting, ZHANG Junbiao. Basic path and system construction of agricultural green and low-carbon development with respect to the strategic target of carbon peak and carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4):516-526. (in Chinese))
- [32] CHEN Q, SU M, MENG F, et al. Analysis of urban carbon metabolism characteristics based on provincial input-output tables [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 265:110561.
- [33] 王红瑞,李晓军,张力,等.水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):13-21. (WANG Hongrui, LI Xiaojun, ZHANG Li, et al. Research progress and the prospects of a complex relationship between water-energy-carbon emission[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1):13-21. (in Chinese))
- [34] 王恒,方兰.中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J].水资源保护,2023,39(1):150-157. (WANG Heng, FANG Lan. Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):150-157. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-09 编辑:骆超)