

黄河流域地级市水-能源-粮食系统 耦合及空间关联研究

赵良仕, 刘思佳

(辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029)

摘要: 黄河流域水资源匮乏,但肩负国家能源和粮食生产的重任。在资源有限、需求不断扩张的背景下,探究水-能源-粮食资源的空间错配给黄河流域可持续发展带来的压力和挑战,可为流域高质量发展及国家区域协调发展战略提供科学依据和参考。基于中观尺度,构建黄河流域地级市水-能源-粮食系统综合评价框架,分析了流域内各地级市的水-能源-粮食系统耦合协调发展水平及空间关联特征。结果表明:2000-2018年,流域内各地级市的水-能源-粮食系统耦合协调度整体由初级协调阶段过度到中级协调阶段,但协调发展稳定性不足,至2018年,系统耦合协调度呈现下降态势;多数年份系统耦合协调度表现出显著的空间关联特征。从地级市视角出发对水-能源-粮食系统进行研究更具地区针对性,更易凸显中观尺度下系统发展的个性特征。应进一步探究黄河流域水-能源-粮食系统的空间关联影响机制,并解构黄河流域水-能源-粮食系统动态耦合协调发展模式。

关键词: 水-能源-粮食系统; 耦合协调度; 空间关联; 黄河流域地级市

中图分类号: TV213; F127

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0014-10

Coupling and spatial correlation of water-energy-food system of prefecture-level cities in the Yellow River Basin

ZHAO Liangshi, LIU Sijia

(Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The Yellow River Basin bears the heavy responsibility of national energy and food production with scarce water resources. Under the background of limited resources yet ever-expanding demand, we explored the pressure and challenges faced by the sustainable development of the Yellow River Basin, which are brought upon by the spatial mismatch of water-energy-food resources, in the hope of providing a scientific basis and reference for the high-quality development of the basin, as well as the national and regional coordinated development strategy. Based on the mesoscale perspective, the comprehensive evaluation framework of water-energy-food system in the prefecture-level cities in the Yellow River Basin is constructed to analyze the coupling and coordinated development level and spatial correlation characteristics of water-energy-food system in prefecture level cities in the Yellow River Basin. The results show that from 2000 to 2018, the coupling coordination degree of water-energy-food system of the prefecture-level cities in the basin evolved from primary coordination to intermediate coordination, but the coordinated development was insufficiently unstable. By 2018, the degree of system coupling and coordination showed a downward trend. In most years, the system coupling coordination degree showed significant spatial correlation characteristics. From the perspective of the prefecture-level cities, the research on water-energy-food system is more regionally targeted, and it is easier to highlight the individual characteristics of system development at the mesoscale. Further study should be conducted on the influencing mechanism of the spatial correlation of water-energy-food system, and the deconstruction of the dy-

收稿日期:2021-11-14; 修回日期:2022-03-20

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41701616);大连市高层次人才创新支持计划(青年科技之星)基金项目(2019RQ145)

作者简介:赵良仕(1985-),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,主要从事水资源经济研究。

namic coupling and coordinated development mode of this system in the Yellow River Basin.

Key words: water-energy-food system; coupling coordination degree; spatial correlation; prefecture-level cities in the Yellow River Basin

1 研究背景

黄河横跨中国东、中、西部地区,具有重要的自然、经济和文化价值,对维护国家和区域的经济社会安全发展具有重要战略意义。国家一直重视黄河流域健康平稳可持续发展,在“十四五”规划和2035年远景目标中指出:推动黄河流域生态保护和高质量发展是推动区域协调发展的重要内容之一。资源系统是推进黄河流域高质量发展的重要基础^[1]。当前黄河流域高质量协调发展进程中依然面临着资源供求不匹配的问题,其中匮乏的水资源与地区日益增长的水需求之间的矛盾尤为突出。

水-能源-粮食之间存在着高度关联、相互依赖的关系^[2],即某一资源会影响和限制其他资源的可用性。水-能源-粮食间的关联性已经引起国内外学术界的广泛关注和研究。Hoff^[3]提出了水-能源-粮食关联研究框架,倡导部门间整体协同理念。关于“水-能源-粮食关联”的概念,Zhang等^[4]总结了目前最广泛的两种定义,并认为两种定义可以通过对系统整体的综合管理而统一。当前,对于水-能源-粮食关联的研究包括:探究水-能源-粮食之间的相互关系、反馈机制和研究框架^[5-6];开发综合模型等以帮助协调资源分配和制定最优决策^[7-9];对典型地区水-能源-粮食系统的安全、压力等进行测度和评价等。在研究尺度和视角方面呈现多样化:Niva等^[10]和Ozturk^[11]从国家视角出发,探讨了宏观层面水-能源-粮食系统的可持续发展之路;施海洋等^[12]和Liang等^[13]则分别从跨界流域和城市内部出发,探究了水-能源-粮食的关联及其与其他系统之间的相互联系。水-能源-粮食之间的关联研究具有极强的现实意义和社会价值,对促进全球基础资源合理配置、推动实现可持续发展具有重要作用。

黄河流域水资源匮乏,但由于流域内农业、能源生产和城镇生活用水需求旺盛,水资源需求量长期居高不下。基于黄河流域的资源现状,一直以来关于黄河流域资源系统方面的研究主要集中于水资源评估与管理方面^[14-15],而将流域水-能源-粮食作为一个整体系统进行研究的成果较少。赵良仕等^[16]以省级行政区为研究尺度,分析了黄河流域

水-能源-粮食安全系统协调发展的状况;彭少明等^[17]从宏观视角出发,对黄河流域水-能源-粮食系统进行了协同优化分析,但未深入到流域内各中观地级市尺度。通过文献梳理可以看出,目前缺少从中观视角出发探究黄河流域水-能源-粮食系统耦合与空间关联的相关研究成果。黄河流域是根据水系划分的自然边界,不是一个完整的省级行政区空间范围的边界^[18],若以省级行政区为研究对象,则对流域范围的刻画不够细致。另一方面,黄河流域内部各地区水、能源、粮食部门发展水平不尽相同,各种资源禀赋、开发利用程度呈现出较明显的空间分区特征,这些特征在很大程度上影响甚至决定了中、小尺度地区内水-能源-粮食系统的发展状态。因此,从地级市层面把握黄河流域水-能源-粮食资源利用现状和空间关联特征,能够为流域提出更具针对性和适应性的对策与建议,对优化流域整体资源配置,实现流域协调可持续发展具有重要的意义。

综上所述,目前亟需更多在地级市尺度下的黄河流域水-能源-粮食系统耦合及空间关联的相关研究成果。本文采用耦合协调度模型与探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis,ESDA)方法,探究黄河流域各地级市水-能源-粮食系统发展水平及呈现的个体特征,评估地级市水-能源-粮食系统耦合协调发展状况,并分析其空间关联特征,为促进黄河流域地级市水-能源-粮食系统协调发展及流域高质量可持续发展提供参考和依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域生态环境先天脆弱,整体自然降水量偏少,2019年流域平均降水量仅469.9 mm^[19]。黄河径流量约占全国河川径流总量的2%,并承担着向支流和京津冀发达地区补给供水的任务,同时流域又承载着全国12%的人口和15%的灌溉农业区^[20]。从20世纪后期以来,黄河径流量呈逐年递减态势,水资源缺口逐渐扩大^[21]。黄河流域拥有我国半数的煤炭基地和七成的煤电基地^[16],地区能源主要以煤炭、电力等形式向东部发达及高需求地区输送。黄河流域内分布着华北平原、汾渭平原等多

个国家粮食主产区,粮食产量占全国的 29.5%^[22],为保障国家粮食安全作出了重要贡献。我国煤炭和谷物产地集中布局在北方地区,而水资源则主要分布在南方地区^[23],这种空间错配是导致黄河流域水资源短缺的主要原因。另一方面,在人口增长和城镇化进程下,资源需求逐年攀升,而长期粗放式的发展模式和资源过度消耗对生态环境也产生了严重的不良影响^[24],使得黄河流域内以水-能源-粮食系统为代表的资源供求矛盾问题日益凸显,极大地制约了地区的可持续发展。

研究区域选定黄河流域 63 个地级城市(包括州、盟,下同),涉及 9 省(自治区),包括 8 个省会城市。依据《全国资源型城市可持续发展规划(2013-2020 年)》中城市类型的划定,本研究所选定的 63 个地级市中,有 36 个为资源型城市,占全国资源型城市总数近 30%^[25]。流域内各地级市资源禀赋差异显著且经济发展进程不同、水平差距较大,呈现东高西低的空间分异格局^[26],产业竞争力也呈现不同的发展趋势。例如,东、西部两个省会城市济南市、西宁市 2017 年的 GDP 相差超过 5 倍。黄河流域范围见图 1。

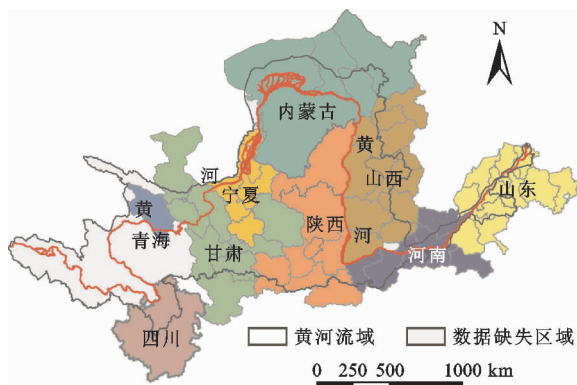


图 1 黄河流域范围及流经省份(自治区)示意图

2.2 评价指标选取及数据来源

根据黄河流域所覆盖的地级市区域,参考《中国城市统计年鉴(2018 年)》^[27]中地级以上城市行政区划,去除个别数据缺失严重的地级市后,选定研究对象为流域内的 9 省(自治区)共 63 个地级市。考虑水-能源-粮食系统的复杂性,并结合研究区域的数据可获得性,选取 2000-2018 年作为研究时期。依据水-能源-粮食间相互作用、生产、消费、效率等要素构成,参考相关研究成果^[16,28-29],选取水-能源-粮食 3 个子系统层共 17 个评价指标,构建的黄河流域水-能源-粮食系统综合评价指标体

系见表 1。

表 1 黄河流域水-能源-粮食系统综合评价指标体系

子系统	指标层	数据来源及计算	权重
水	水资源总量	各地水资源公报	0.188
	供水总量	各地水资源公报	0.132
	单位 GDP 用水量	用水总量/GDP	0.159
	产水系数	水资源总量/降水总量	0.140
	水压力	工、农业用水总量/ 水资源总量	0.120
	地下水供水占比	地下水供水量/供水总量	0.128
	废污水排放量	各地统计年鉴	0.133
能源	发电总量	各地统计年鉴	0.260
	主要一次能源产量	各地统计年鉴	0.233
	能源消费量	各地统计年鉴	0.123
	全社会用电量	各地统计年鉴	0.185
粮食	万元 GDP 能耗	各地统计年鉴	0.199
	粮食产量	各地统计年鉴	0.178
	有效灌溉面积	各地统计年鉴	0.236
	耕地面积比例	耕地面积/土地面积	0.185
	农业机械动力	各地统计年鉴	0.261
	人口自然增长率	各地统计年鉴	0.140

研究数据来源于《中国城市统计年鉴(2001-2019 年)》^[27]、各省(自治区)及地级市统计年鉴(数据获取自各级行政区统计局官方网站)、2000-2018 年水资源公报等公开统计资料,个别年份缺失数据采用线性插值法进行补全。指标权重采用熵值法^[30]计算求得(表 1)。

2.3 研究方法

2.3.1 水-能源-粮食子系统综合评价指数 采用熵值法计算水-能源-粮食子系统综合评价指标权重。赋权前为统一指标量纲或数量级,对原始数据进行标准化处理,根据指标的不同功效分为正、负指标。熵值法是一种客观赋值法,其原理为:某项指标的离散程度越大,信息熵越小,提供的信息量越大,则该指标对综合评价的影响越大,故权重越大;相反,权重越小^[31-32]。参考王洋等^[30]的计算步骤,求得指标权重。

根据熵值法获得的权重,运用线性加权法计算黄河流域各地级市水-能源-粮食各子系统综合评价指数,以水子系统综合评价指数计算为例,其公式如下:

$$W(x) = \sum_{j=1}^m w_j X'_{ij} \quad (1)$$

式中: $W(x)$ 为水子系统的综合评价指数,取值范围为 $[0,1]$,指数值越大说明子系统发展水平越高; w_j 为水子系统第 j 项指标的权重; X'_{ij} 为各子系统第 i 年第 j 项指标的标准化数值; m 为水子系统评价指标个数。能源、粮食子系统综合评价指数 $E(y)$ 、 $F(z)$ 的计算方法与此相同。

2.3.2 水-能源-粮食系统耦合协调度 利用黄河流域各地级市水-能源-粮食子系统综合评价指数,参考已有的研究成果^[33-34],构建黄河流域地级市水-能源-粮食系统耦合协调度模型,其公式如下:

$$C = \frac{3 \sqrt[3]{W(x)E(y)F(z)}}{W(x) + E(y) + F(z)} \quad (2)$$

式中: C 为耦合度,反映子系统间相互作用和影响的强弱, $C \in [0,1]$,其值越大表明子系统之间越协调。引入综合评价指数构建耦合协调度模型,能更好地反映地级市耦合协调程度,其算法为:

$$D = \sqrt{CT} \quad (3)$$

$$T = \alpha W(x) + \beta E(y) + \gamma F(z) \quad (4)$$

式中: D 为耦合协调度; T 为水-能源-粮食系统的综合评价指数; $W(x)$ 、 $E(y)$ 、 $F(z)$ 分别为水、能源、粮食子系统的综合评价指数; α 、 β 、 γ 为表示各子系统重要程度的权重,本文取水、能源、粮食3个子系统的权重相等,即设定为 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。

为了更好地分析黄河流域各地级市的水-能源-粮食系统耦合协调水平和所处阶段,参考已有研究成果^[16,34-36],本文采用李茜等^[36]的耦合协调度结果分类标准,对测算结果进行分类及评价。

2.3.3 探索性空间数据分析 探索性空间数据分析(ESDA)常用于揭示研究对象之间的空间作用相互机制。为探究黄河流域各地级市水-能源-粮食系统耦合水平的空间关联特征,用 Geoda(1.12)进行空间自相关检验。Moran's I 指数为正表示空间正相关,为负即为空间负相关,等于0为不相关^[37]。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: I 为全局自相关莫兰指数; W_{ij} 为空间权重矩阵; n 为空间单元个数; x 为观测值; $\bar{x}$ 为 x 的平均值。

由于现实中存在空间要素异质性,因此需要进一步进行局部空间自相关检验,以便把握空间要素

的异质性特征。将全局自相关莫兰指数分解到不同单元中:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (6)$$

式中: I_i 为局部莫兰指数; Z_i 、 Z_j 为观测值的标准化值。

3 结果与分析

3.1 水-能源-粮食子系统综合评价指数分析

2000-2018年,黄河流域各地级市的水-能源-粮食子系统综合评价指数总体呈现上升趋势,反映出流域的3个子系统发展水平整体向好。但因部分城市的子系统综合评价指数波动幅度较大,进而导致水-能源-粮食系统协调发展的稳定性不足。例如,银川市、吴忠市、乌海市等水资源供需矛盾较为突出,水子系统整体发展滞后;天水市、商洛市、中卫市等低能源自给率城市的能源子系统表现滞后;中下游地区诸多地级市是黄河流域重要的粮食产区,同时也是流域人口最稠密、粮食需求最大的地区,但流域中下游农业生产易受自然灾害的影响,粮食子系统发展也呈现较大的波动。各地级市的特点和发展的实际情况不同,其水-能源-粮食子系统综合评价指数发展也呈现出不同的特征。2012年后,以省会城市为代表的部分地级市子系统综合评价指数呈现减小趋势,反映出目前黄河流域存在着制约水-能源-粮食系统协调稳定发展的不利因素。

黄河流域各地级市水-能源-粮食子系统综合评价指数呈现出较强的区域性特征。综合考虑3个子系统的相互关系,按照研究期内各地级市综合评价指数的演变过程,将综合评价指数分为两种类型,即滞后型和平衡型,其中滞后型包括水滞后型、能源滞后型、粮食滞后型3个亚类^[38-39],如图2所示。

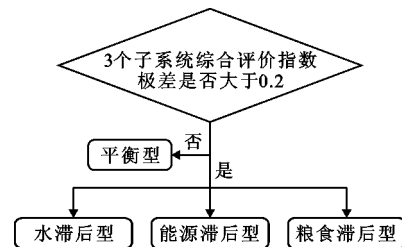


图2 黄河流域各地级市(州、盟)水-能源-粮食子系统综合评价指数分类示意图

为探究各地级市水-能源-粮食系统发展个性特征,依据综合评价指数计算结果将63个地级市进行分类,以2000、2008、2018年为例,将分类结果列于表2。由表2可知,滞后型地级市数量呈U型发展趋

势:研究期内,2008 年滞后型地级市数量最少,为 14 个;而 2000 和 2018 年滞后型地级市数量分别达到 42 和 51 个。研究期初期,多数年份滞后型地级市数量占比不足一半,滞后型亚类中,能源滞后型地级市占比极低;2008 年滞后型地级市数量最少时,水滞后型地级市占比最大;2008 年后滞后型地级市数量开始增多,同时能源滞后型地级市数量呈上升趋势。另一方面,平衡型地级市子系统综合评价指数总体呈现上升趋势,反映出在平衡型地级市总数下降的同时,其水-能源-粮食系统的平衡水平有所提高。结果表明:

研究期初期,流域地级市水、粮食资源开发利用滞后问题较为显著,粮食子系统随时间进程发展较好;研究期中期,焦点则集中于水资源管理方面;研究期后期,伴随水资源利用与管控效率的提高,能源、粮食资源需求的不断膨胀给流域水-能源-粮食系统的协调发展带来了新的挑战。

3.2 水-能源-粮食系统耦合协调度分析

2000-2018 年部分年份(以 2000、2006、2012 和 2018 年为例)黄河流域各地级市水-能源-粮食系统耦合协调度如图 3 所示。

表 2 2000、2008、2018 年黄河流域各地级市(州、盟)水-能源-粮食子系统综合评价指数分类

类型	亚类	2000 年	2008 年	2018 年
滞后型	水	太原、大同、长治、晋中、忻州、乌海、青岛、洛阳、西安、铜川、咸阳、延安、天水、平凉、定西、西宁(共 16 个)	东营、德州、聊城、滨州、商丘、西安、商洛、兰州、固原(共 9 个)	呼和浩特、鄂尔多斯、安阳、鹤壁、新乡、濮阳、铜川(共 7 个)
	能源	巴彦淖尔、商丘、石嘴山、吴忠(共 4 个)	乌海、乌兰察布、济南、定西(共 4 个)	大同、阳泉、晋城、朔州、忻州、吕梁、包头、青岛、济宁、莱芜、菏泽、开封、洛阳、延安、榆林、白银等(共 32 个)
	粮食	晋城、运城、临汾、吕梁、包头、东营、济宁、泰安、德州、滨州、菏泽、开封、鹤壁、新乡、三门峡、榆林等(共 22 个)	吴忠(共 1 个)	太原、长治、晋中、乌海、淄博、西安、宝鸡、咸阳、兰州、平凉、陇南、西宁(共 12 个)
平衡型		阳泉、朔州、呼和浩特、鄂尔多斯、乌兰察布、济南、淄博、潍坊、莱芜、聊城、郑州、安阳、焦作、濮阳等(共 21 个)	太原、大同、阳泉、长治、晋城、朔州、晋中、运城、忻州、临汾、吕梁、呼和浩特、鄂尔多斯、巴彦淖尔等(共 49 个)	运城、临汾、巴彦淖尔、潍坊、泰安、郑州、焦作、三门峡、渭南、商丘、商洛、吴忠(共 12 个)

从各地级市系统耦合协调度发展趋势来看,耦合协调度与地级市的发展阶段和经济水平具有较大关联,同时,各地级市耦合协调发展呈现个性特点,如波动较大等。研究期内黄河流域地级市水-能源-粮食系统整体耦合协调水平处于由初级协调向中级协调过度阶段,平均耦合协调度由 0.566 增长到 0.746;研究期中后期一直维持在中级协调水平,平均耦合协调度均超过 0.7;在 2012 年达到峰值后,整体平均耦合协调度出现波动,以省会城市为代表的部分地级市出现下降趋势。

从各地级市系统耦合协调度的空间分布来看,流域内各地级市水-能源-粮食系统资源禀赋不同,耦合协调度发展水平也存在地理空间分异。特大城市、省会城市等区域中心城市的水-能源-粮食系统耦合协调发展率先面临冲击。在 2000 年,流域整体处于由濒临失调向勉强协调过度阶段,耦合

协调度较低的地级市主要集中在流域上游及部分中游地区,耦合协调度发展较好的地级市主要集中在流域下游地区。对比 2015 年,2018 年有近 30% 的地级市耦合协调度出现不同程度的下降,集中分布在流域中下游地区。这表明,在中下游经济发达的地级市,日益紧张的资源供求矛盾对水-能源-粮食系统协调发展的压力开始显现。表现为以太原市、郑州市为代表的省会城市耦合协调度下降幅度较大,反映出省会城市作为人口聚集和资源需求的中心,水-能源-粮食系统的协调发展已经先于其他地级市遭受到了一定的压力和冲击。

子系统的发展水平关系到系统整体的耦合协调度水平。各地级市先天资源禀赋不同,在人口数量、经济结构等社会因素的影响下,子系统面临不同程度的压力。在不同程度上存在子系统滞后现象的地级市,其耦合协调度在发展进程中均出现过较低或

波动较大的情况。另一方面,水 - 能源 - 粮食系统内存在粮食子系统发展显著提升、水子系统滞后性大幅增长的现象。

综上所述,地级市各个子系统的发展与变化均

会影响到水 - 能源 - 粮食系统的耦合协调发展。若要提高地区水 - 能源 - 粮食系统的协调发展水平,必须加强各部门之间的相互协作,强调政策和措施的整体性与协同性。

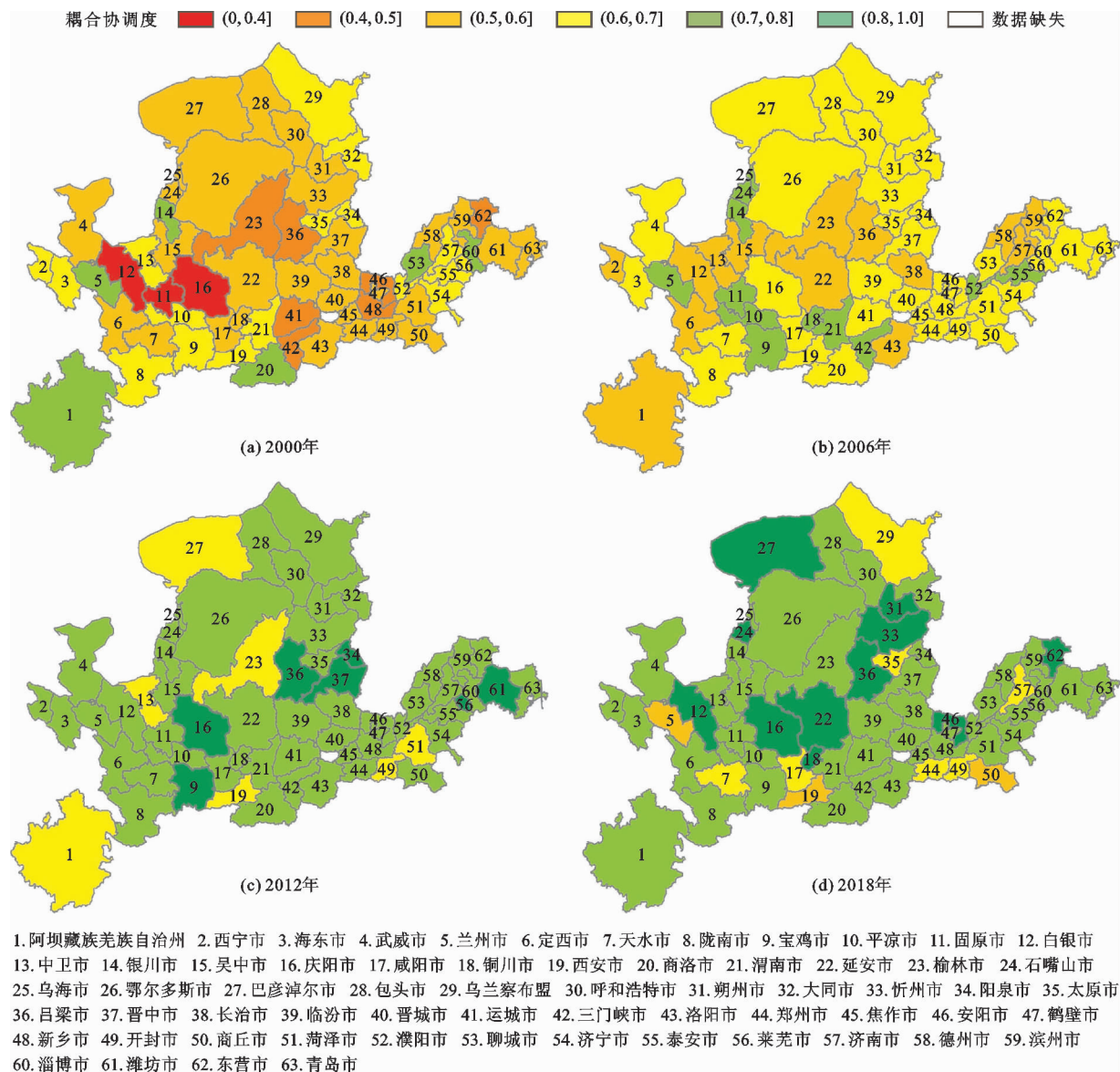


图 3 2000 - 2018 年部分年份黄河流域各地级市水 - 能源 - 粮食系统耦合协调度

3.3 水 - 能源 - 粮食系统耦合协调度的空间关联分析

3.3.1 全局特征 利用 Geoda(1.12) 构造空间权重矩阵,进行空间自相关性分析并进行检验。全局 Moran's I 指数测算结果显示:2000 - 2002、2007 - 2009、2011 - 2017 共 13 个年份的 Moran's I 指数均为正值,且 P 值均小于 0.1,通过显著性检验。表明在这些年份各地级市水 - 能源 - 粮食系统耦合协调度呈现明显的空间自相关特征,即高耦合协调度地级市、低耦合协调度地级市各自趋于相邻。其余 6

个年份测算结果没有通过显著性检验,表明在该 6 个年份中,地级市水 - 能源 - 粮食系统耦合协调度没有呈现显著的空间自相关特征。

3.3.2 局部特征 根据全局 Moran's I 指数计算结果,绘制测算得到 Moran 散点图,进一步分析黄河流域地级市耦合协调度的局部空间特征。Moran 散点图中将空间分为“高 - 高”“低 - 高”“低 - 低”和“高 - 低”4 种类型。以 2000、2009 和 2015 年为例,其耦合协调度莫兰散点图如图 4 所示。分析图 4 可知,2000、2009 和 2015 年的 Moran's I 值分别为

0.17、0.45 和 0.29;2000、2009 和 2015 年落入一、三象限的散点数量比例分别为 76.1%、84.1% 和 74.6%;对比 2009 年,2015 年流域地级市耦合协调度空间自相关性有所减弱。

绘制 LISA 集聚图,可进一步探究局部空间聚集特征。仍以 2000、2009 和 2015 年为例,其耦合协调度 LISA 集聚图如图 5 所示。由图 5 可以看出,2000 年,流域“高-高”类型地级市集聚在下游山东省的地级市以及西安市;“低-低”类型集聚区在宁夏回族自治区

区的吴忠市、固原市以及陕西省北部的榆林地区,同时在“低-低”类型集聚区的南部出现了几个分散的“高-低”类型地级市。2009 年,上游甘肃地区出现了显著的“低-低”类型地级市集聚区,而“高-高”类型集聚区则出现在流域下游地区,同时伴随着一定的溢出性,两类型集聚的范围均有所扩大。2015 年,“高-高”类型集聚区向山西省、河南省的地级市转移;“低-低”类型集聚区则向甘肃省、陕西省南部地区的地级市转移,并覆盖省会西安市。

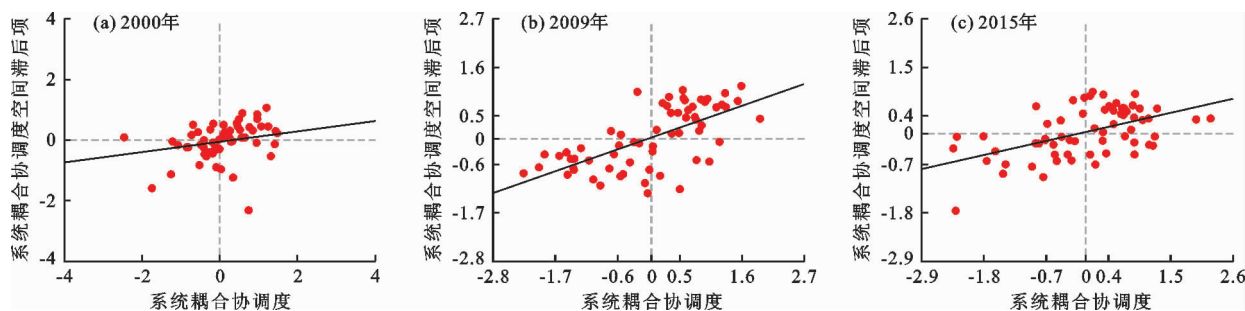


图4 研究期 2000、2009、2015 年黄河流域各地级市水-能源-粮食系统耦合协调度莫兰散点图

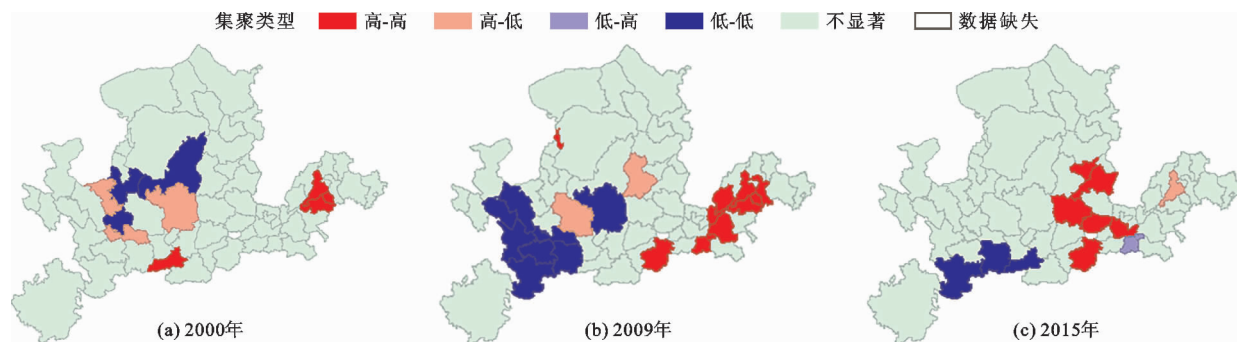


图5 2000、2009、2015 年耦合协调度 LISA 集聚图

整体来看,黄河流域地级市水-能源-粮食系统耦合协调度的空间自相关性与各地区地级市的发展历程和流域阶梯状发展格局^[40]有一定关联。研究期初期,流域中上游地级市相对落后,处于建设的起步阶段,整体对于水-能源-粮食资源的开发供给能力有限,同时需求程度也处于较低水平。“高-高”类型和“低-低”类型分别集聚在流域的发达地区和落后地区的情况随时间进程而更加显著。但到了研究期后期,两类集聚地区均出现转移,下游甚至出现了“低-高”类型集聚的地级市,表明下游经济发达地区水-能源-粮食系统耦合协调度水平有所下降,地区水-能源-粮食系统发展面临压力和挑战。

4 讨论

研究结果表明,2000-2018 年黄河流域水-能

源-粮食系统耦合协调水平整体有所提升,但发展速度与幅度有限,这一结论与已有黄河流域水-能源-粮食系统研究成果相似^[16,41]。另一方面,徐辉等^[41]研究表明流域各省(自治区)水-能源-粮食系统耦合协调度水平差异较大,本文则深入中观视角,更加细致地刻画了流域水-能源-粮食系统耦合协调发展演化进程。黄河流域各地级市资源禀赋、经济水平的差异较大,即使是同省(自治区)地级市亦然。对比省级尺度资源研究^[16,41-43],地级市相关研究能够更加细致准确地识别各地区水-能源-粮食系统发展水平,突显不同地级市水-能源-粮食系统的发展个性特征。黄河流域地级市耦合协调度的空间关联性并不稳定,大部分研究年份呈现极显著的空间关联性,而某些年份则无显著空间关联。除了自然禀赋、经济水平和资源开发利用能力外,自然灾害、地区政策等都有可能对地级市水-能

源-粮食系统协调性造成短期影响。

由于各地区相关数据与统计口径不完全统计,研究仅能采用现行指标体系进行分析,并将各地级市的水-能源-粮食系统更多地视作独立个体并探讨其自身耦合协调发展水平。但在实际情况中,区域资源以复杂的形式在区域之间流动,既包括直接形式,也包括间接、虚拟形式。未来可以通过定义资源的流动边界,描述水、能源和粮食资源的流动网络,构建黄河流域水-能源-粮食关联系统的多层流动网络,用于探究、拟合水-能源-粮食关联最优可持续发展路径。资源合理配置会提高流动范围内地区的整体资源承载力,有利于推动地区资源利用和环境发展的可持续性。考虑流域内各地级市之间的资源流动,黄河流域内部水-能源-粮食系统在优化资源配置下的耦合协调水平和系统韧性有待进一步解构。未来可引入气候、土地利用方式、碳排放和经济社会发展等外部因素,模拟系统发展路径以及探讨资源流动的隐含环境责任。另一方面,黄河流域内分布着众多资源型城市,包括煤炭、有色金属等类型,这类地级市的优越禀赋对自身水-能源-粮食系统发展是否存在共性影响也仍有待探讨。

5 结论和建议

5.1 结论

通过建立黄河流域地级市水-能源-粮食系统综合评价框架,采用耦合协调度模型测算2000-2018年黄河流域地级市水-能源-粮食系统耦合协调度,并总结黄河流域地级市水-能源-粮食系统发展的空间关联特征,得到以下结论:

(1)黄河流域地级市水-能源-粮食子系统综合评价指数整体波动上升;由于各地级市的资源禀赋和经济水平不同,地级市水-能源-粮食子系统呈现不同特点,由此导致部分地级市水-能源-粮食系统协调发展稳定性不足;研究期后期子系统综合评价指数整体有轻微回落。

(2)黄河流域地级市水-能源-粮食系统耦合协调水平整体已由初级协调过度到中级协调阶段。各地级市耦合协调发展呈现个性特征,与地级市的发展历程和经济水平具有较大关联。2012年后,部分地级市耦合协调度呈现波动且有下降趋势。表明存在影响和制约黄河流域水-能源-粮食系统协调稳定发展的不利因素。

(3)研究期内,黄河流域地级市耦合协调度多数年份表现出显著空间关联性。“低-低”类型地

级市主要集聚在流域上游经济水平较低地区,“高-高”类型集聚区则主要由下游、东部经济相对发达的地级市构成,在研究期后期,两类集聚地区均出现转移。资源需求量大、经济发展水平高的区域中心城市,即原本水-能源-粮食系统耦合协调发展较好的地级市已率先面临资源协调可持续发展的压力。

5.2 建议

加强部门间的协作和政策联动,注重系统性、整体性、协同性和特殊性。根据黄河流域地级市水-能源-粮食系统发展水平和地区发展水平,制定和采取针对性、具体性的政策和措施。流域东部和省会地级市经济水平较高,资源需求旺盛,其水-能源-粮食系统已经面临巨大压力。充分调动地区间资源流动,促进有限资源的合理开发、配置。城市建设和人口增长固然需要更多资源,在资源有限、需求无限的前提下,“开源节流”是促进资源和环境可持续发展的有效手段。拓展资源附加效益,扩展资源利用思路,丰富资源利用模式,将资源开发与利用朝着高附加值、低排放的绿色可持续方向发展,如合理开展上游水资源相对富足地级市的生态旅游。打造资源节约型农业,改进农业部门与水资源之间的关系将是流域水资源节约成果最显著的部分。另一方面,地区水-能源-粮食系统协调发展水平存在集聚特征,应积极发挥水-能源-粮食系统协调发展水平高的地区对周边地区的溢出效应和辐射带动作用,同时关注低水平协调发展地区,因地制宜地寻找平衡水-能源-粮食系统的最优模式,以推动系统协调向高水平迈进。

参考文献:

- [1] 刘建华,黄亮朝,左其亭. 黄河下游经济-人口-资源-环境和谐发展水平评估[J]. 资源科学,2021,43(2): 412-422.
- [2] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach [J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 7896-7906.
- [3] HOFF H. Understanding the nexus [R]. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water Energy and Food Security Nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [4] ZHANG Chi, CHEN Xiaoxian, LI Yu, et al. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625-639.

- [5] WICHELS D. The water – energy – food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? [J]. *Environmental Science and Policy*, 2017, 69: 113 – 123.
- [6] YAN Xingchen, FANG Lan, MU Lan. How does the water – energy – food nexus work in developing countries? An empirical study of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 134791.
- [7] RAVAR Z, ZAHRAIE B, SHARIFINEJAD A, et al. System dynamics modeling for assessment of water – food – energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105682.
- [8] LIN Yingchen, LIN Chiachun, LEE Mengshan, et al. Comprehensive assessment of regional food – energy – water nexus with GIS-based tool [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 151: 104457.
- [9] DARGIN J, DAHER B, MOHTAR R H. Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(Part 1): 1566 – 1575.
- [10] NIVA V, CAI Jialiang, TAKA M, et al. China's sustainable water – energy – food nexus by 2030: Impacts of urbanization on sectoral water demand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119755.
- [11] OZTURK I. Sustainability in the food – energy – water nexus: Evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries [J]. *Energy*, 2015, 93: 999 – 1010.
- [12] 施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 等. 基于“水 – 能源 – 食物 – 生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 1036 – 1052.
- [13] LIANG Sai, QU Shen, ZHAO Qiaoting, et al. Quantifying the urban food – energy – water nexus: The case of the Detroit metropolitan area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(2): 779 – 788.
- [14] 王宁, 李兆耀, 田晓飞, 等. 基于ESDA方法的黄河流域水足迹强度及空间关联分析[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(2): 196 – 202.
- [15] OMER A, ELAGIB N, MA Zhuguo, et al. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141446.
- [16] 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.
- [17] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源 – 能源 – 粮食的协同优化[J]. *水科学进展*, 2017, 28(5): 681 – 690.
- [18] LI Jiansu, SUN Wei, LI Mingyue, et al. Coupling coordination degree of production, living and ecological spaces and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: 126803.
- [19] 中华人民共和国水利部. 2019 年中国水资源公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2020.
- [20] CHEN Yiping, FU Bojie, ZHAO Yan, et al. Sustainable development in the Yellow River Basin: Issues and strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121223.
- [21] ZHANG Qiang, XU Chongyu, YANG Tao. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 years, China [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(6): 1157 – 1170.
- [22] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 等. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 176 – 195.
- [23] 詹贻琛, 吴岚, 王艺璇. 中美均面临水、能源、粮食三者冲突[J]. *中国经济报告*, 2014(1): 109 – 111.
- [24] 任保平, 杜宇翔. 黄河中游地区生态保护和高质量发展战略研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(2): 1 – 5.
- [25] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 223 – 239.
- [26] 周晓艳, 郝慧迪, 叶信岳, 等. 黄河流域区域经济差异的时空动态分析[J]. *人文地理*, 2016, 31(5): 119 – 125.
- [27] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴(2001 – 2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [28] 李成宇, 张士强. 中国省际水 – 能源 – 粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 120 – 128.
- [29] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源 – 能源 – 粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 1 – 8.
- [30] 王洋, 方创琳, 王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分[J]. *地理研究*, 2012, 31(7): 1305 – 1316.
- [31] 乔家君. 改进的熵值法在河南省可持续发展能力评估中的应用[J]. *资源科学*, 2004, 26(1): 113 – 119.
- [32] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(11): 1323 – 1329.
- [33] DONG Fugui, LI Wanying. Research on the coupling coordination degree of “upstream – midstream – downstream” of China's wind power industry chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 124633.
- [34] XU Shasha, HE Weijun, SHEN Juqin, et al. Coupling and coordination degrees of the core water – energy – food nexus in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1648.

- [35] ARIKEN M, ZHANG Fei, CHAN N W, et al. Coupling coordination analysis and spatio-temporal heterogeneity between urbanization and eco-environment along the Silk Road Economic Belt in China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107014.
- [36] 李茜,胡昊,李名升,等. 中国生态文明综合评价及环境、经济与社会协调发展研究[J]. *资源科学*, 2015, 37(7): 1444-1454.
- [37] 孟斌,王劲峰,张文忠,等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 393-400.
- [38] 王少剑,崔子恬,林靖杰,等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [39] LI Yangfan, LI Yi, ZHOU Yan, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 127-133.
- [40] 郭付友,佟连军,仇方道,等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 726-739.
- [41] 徐辉,王亿文,张宗艳,等. 黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(12): 2526-2537.
- [42] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(6): 12-17.
- [43] 孟钰,杜琼英,管新建,等. 黄河流域水资源利用效率评估及空间分异研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(10): 12-16.

(上接第13页)

- [18] 赫晓慧,孟军令,郭恒亮,等. 土地利用与气候变化对洛河流域径流的影响[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(10): 31-34.
- [19] 王文川,高畅,徐雷. 基于TVF-EMD与LSTM神经网络耦合的月径流预测研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(2): 76-81+89.
- [20] 梁浩,黄生志,孟二浩,等. 基于多种混合模型的径流预测研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 112-125.
- [21] DUMAN S, KAHRAMAN H T, GUVENC U, et al. Development of a Lévy flight and FDB-based coyote optimization algorithm for global optimization and real-world ACOF problems [J]. *Soft Computing*, 2021, 25(12): 6577-6617.
- [22] 张新明,付子豪,陈海燕,等. 全局引导和相互作用的郊狼优化算法及其应用[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(9): 2711-2717.
- [23] 邱宁佳,王宪勇,王鹏,等. 融合MHS与AIM-RT的谱聚类优化推荐算法[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(11): 3292-3296.
- [24] HOCHREITER S, SCHMISHUBER J. Long short-term memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [25] 徐冬梅,庄文涛,王文川. 基于CEEMDAN-WD-PSO-LSSVM模型的月径流预测研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(8): 54-58+66.
- [26] WANG Wenchuan, CHAU K W, XU Dongmei, et al. Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29: 2655-2675.