

# 黄河流域水-能源-粮食关联系统 时空格局及耦合协调研究

研究单位:中国科学院地理科学与资源研究所

水资源、能源和粮食是人类社会生存与发展最为根本的要素,也是区域可持续发展的重要限制性因素。水资源的提取、分配和处理过程均需消耗大量的能源,粮食种植、运输和加工需要大量的水资源和能源支撑,而能源的开发和利用也依赖于水资源的有效供给和食品工业的发展。水资源、能源、粮食系统形成了相互关联、相互依存和相互制约的纽带关系,成为生态文明建设背景下自然资源多元治理体系和人类命运共同体的重要内容之一。水资源、能源和粮食系统的协同安全与调控,成为人类社会生存和可持续发展面临的重要议题。

黄河流域的人类活动历史久远,以多样化、高强度的方式作用于流域生态系统,诱发了上游生态功能区退化、中游水土流失、下游泥沙淤积等突出问题,成为流域上中下游协同保护和治理、合理开发和可持续利用的重大挑战。2021年10月8日,中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家重大发展战略,凸显了黄河流域在国家发展大局和社会主义现代化建设全局中的重要战略地位。黄河流域生态保护和高质量发展战略是国家治理能力现代化的北方战略,有助于南北方均衡

发展,是“两山论”和“两化路”的区域实践,是黄河文化保护、传承、弘扬的重要载体。

黄河流域是中国重要的粮食生产基地和“能源流域”,黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区是农产品主产区,黄河流域蕴含着丰富的水能、煤炭、石油和天然气资源。但是,黄河流域水、能源、粮食等资源要素的空间分布错位,随着快速城镇化、工业化和生态保护需求的持续推进,水资源短缺、能源安全和粮食安全的矛盾日益突出。因此,需要从系统角度,科学认知黄河流域“水—能源—粮食”关联系统的协同安全程度与耦合协调关系,准确把握三者之间的时空演进规律,明确水资源利用、能源生产与消费、粮食生产的问题区域和区域问题,对于促进全流域人地系统协调与可持续发展具有重要意义。

本项目基于气象观测、土地利用和统计年鉴等多源数据,阐明黄河流域水-能源-粮食关联系统的时空格局演化特征,基于压力-状态-响应和耦合协调度模型,从流域和典型区域尺度,揭示水-能源-粮食关联系统的安全度及耦合协调特征,提出黄河流域水-能源-粮食关联系统优化与协调发展路径。主要结论如下:

(1) 从社会经济发展、气候变化、植被净初级生产力(NPP)和碳排放来看,2000-2020年,黄河流域地区生产总值和城乡人均可支配收入的年均增长率分别为11.94%和10.10%;2000-2018年,流域整体呈现暖湿化趋势,降雨量、气温、风速、NPP的年均增长率分别为1.86mm/yr、0.0287°C/yr、0.048m/(s·10yr)和2.85gC/(m<sup>2</sup>·yr),而年均太阳辐射以4.41MJ/(m<sup>2</sup>·yr)速度减少;2000-2019年,流域行业碳排放和城乡居民碳排放量均呈现增加趋势,且省际差异逐渐拉大,城市碳排放占比逐渐升高。从空间分布来看,降雨量和气温均呈现“东南高、西北低”的分布格局,而太阳辐射和风速与之相反;NPP呈现“南高北低”的分布态势,而碳排放量呈现“东高西低”和“城市高于乡村”的分布格局。

(2) 从水资源量、利用结构和依赖性来看,2000-2020年,黄河流域水资源总量和产水系数均呈波动增加趋势,多年平均值分别为591.60亿m<sup>3</sup>和0.16;流域用水总量和用水均衡度分别由2000年的473.53亿m<sup>3</sup>和0.46,波动增加至2020年的518.01亿m<sup>3</sup>和0.73;农业始终是主要的用水部门,占水资源利用量的65.82%-79.85%,生活和生态用水占比不断上升;上中游的水资源利用率低于下游,尤其是宁夏地区的农业水资源利用效率亟待提升;水资源压力指数波动降低,而废污水排放总量波动增加;万元GDP用水量由2000年的499.92m<sup>3</sup>降至2020年的49.58 m<sup>3</sup>,且上游高于中下游。

(3) 从能源生产、消费结构以及经济增长对能源的依赖程度来看,2000-2019年,黄河流域能源生产整体呈现上升态势,增长了4.20倍,但增速呈现下降趋势;从省域差异来看,陕西省增速明显,为223.75%,年均生产量最高的省份从2010年之前的山西省转为2010年之后的内蒙古;生产结构持续优化,2011年是能源结构转型节点,原煤占比持续下降,清洁能源占比持续增加。能源消费呈现上升态势,增长了3.76倍,但增速不断下降;煤炭和焦炭消费占比逐年降低,而天然气和电力消费占比

逐年上升;从省域差异来看,山东、河南的能源消费总量最高,山西和内蒙古的煤炭消费量最高,青海天然气消费占比最高;能源和电力的生产和消费弹性系数均呈现下降态势,单位GDP耗能逐年下降,并呈现“东南低、西北高”的格局,工业煤炭消费始终占据主导地位(85%以上),并呈现上升趋势。

(4) 从粮食生产规模、效率和结构来看,2000-2020年,黄河流域粮食播种面积和产量总体呈现上升趋势,但播种面积增幅仅为5.62%,显著低于产量增幅的39.51%,播种面积和粮食产量基本呈现“上游低、下游高”的格局;各省的粮食生产效率均有所提高,内蒙古的人均粮食产量最高,山东省的单位面积产量最高,而青海省均最低;粮食生产结构上,薯类、小麦种植面积占比显著增加,稻谷种植面积占比有所减少,豆类、玉米种植面积占比无明显变化。

(5) 从土地利用、水土流失和矿山恢复面积来看,2000-2020年,黄河流域主要土地利用类型为草地,约占研究区总面积的40%;耕地和未利用地面积均逐年减少,而林地、水域和建设用地面积均逐年增加,耕地和草地的转出面积最大,草地和建设用地的转入最大;2000-2019年,黄河流域累计治理水土流失面积49.98万km<sup>2</sup>,陕西省和内蒙古最多,分别为11.56万km<sup>2</sup>和10.53万km<sup>2</sup>;2003-2019年,黄河流域累计恢复矿山面积4173.77 km<sup>2</sup>,内蒙古最多,为1233.03 km<sup>2</sup>。

(6) 基于压力-状态-响应(PSR)模型,构建水-能源-粮食关联系统安全度评价指标体系,评价黄河流域压力、状态和响应各子系统和综合系统的协同安全度。结果表明,2000-2019年,子系统协同安全度均呈上升趋势,压力子系统呈“南高北低”的空间格局,状态和响应子系统呈“东高西低”的空间格局;水-能源-粮食关联系统综合协同安全度不断上升,整体呈现为上游>中游>下游,其中,2000-2010年为“南高北低”格局,2011-2019



年为“东高西低”格局。从分省情况来看,宁夏、内蒙古受水资源制约,导致压力子系统协调安全度较低;甘肃、青海受粮食制约,状态子系统协同安全度较低;青海、宁夏受水、能源、粮食的共同制约,各子系统协调安全度均较低。

(7) 从生产、消费、效益角度,构建了黄河流域水-能源-粮食关联系统协调发展的综合评价指标体系,运用耦合协调度模型测算水、能源和粮食系统的耦合协调关系。结果表明,2000-2019年,水、能源和粮食子系统发展水平逐年上升,但水-能源-粮食关联系统的综合发展水平较低,省际差异逐渐增大,整体呈现“上下游高、中游低”的空间格局;从分省来看,青海和四川的水资源子系统发展水平最高,内蒙古和山东的能源子系统发展水平最高,内蒙古、河南和山东的粮食子系统发展水平最高;水-能源-粮食关联系统协调水平整体较低,由濒临失调转向勉强协调和初级协调,水-粮食子系统、水-能源子系统、能源-粮食子系统协调水平均呈现增加趋势。

(8) 选取黄淮海平原和汾渭平原作为典型区域,分别进行水-粮食耦合和水-能-粮耦合的实证研究。结果表明,2000-2020年,黄淮海平原地区主要粮食播种面积、耗水量和产量分别增长了28%、21%和57%;粮食种植结构调整相对于未调整情景下节约了15.71亿 $m^3$ 的水资源,其中,新乡市的节水量最高;水-粮食系统耦合协调度波动上升,空间上呈现“西高东低”的格局,地市间差异有所缩小。汾渭平原主要粮食播种面积、粮食耗水量、粮食产量分别增长了-9.44%、-12.52%和19%;粮食种植结构调整相对于未调整情景下节约了1.47亿 $m^3$ 的水资源,其中,晋中市节水量最高;水-能源-粮食关联系统耦合协调度波动增长,临汾市和三门峡市相对较高,吕梁市和晋中市较低。

(9) 基于黄河流域社会经济、气候变化、植被生产力分析,结合水-能源-粮食系统时空格局演化特征、关联

与耦合协调研究结果,针对黄河生态环境保护 and 高质量发展战略需求及典型区域问题梳理,从流域、区域和省域层面提出了相关政策建议及优化协调路径。

在流域层面,①**加强系统认知**,科学审视水-能源-粮食纽带关系,推动建立以纽带耦合协调为目标的流域协同治理机制,明确纽带关系的优势区域和短板区域,加强关键要素流动和配置,优化资源结构和布局,全面提升耦合协调关系;科学布局三生空间,优化人地关系和国土空间格局,调整社会生产和经济发展结构,加强水-能源-粮食关联系统的内循环和外循环,规避水资源利用、能源转型及粮食生产等相关目标的权衡,合力提升关联系统的协同安全。②**创新体制机制**,打破地理界限、行政区划、行业分工壁垒,联合政府、企业、科研、社会团体等组织,建立联盟体,开展跨省域、跨部门协调发展机制,多行业合作共赢、多学科交叉研究,形成共同保护、治理、决策和发展的命运共同体;建立水资源、能源、粮食的供给方与消费方的生态补偿机制,用于水-能源-粮食关联系统的功能优化;探索水资源分配与利用机制,以水定产、定业、定城,全面提升水资源利用效率,降低水资源短缺对社会经济发展的限制作用,提升区域水、能源和粮食资源的可达性和可获得性。③**集成关键技术**与**典型模式**,加强水资源高效利用、能源清洁生产、粮食增产等技术研发及集成应用,打造若干先行区,开展试点创建,确保水资源安全、能源安全和粮食安全;上游地区以生态安全为主线,加强水源涵养保护和清洁能源产业发展,中游地区以节水增效为主线,加强能源低碳转型和产业结构调整,下游地区以高质量发展为主线,加强粮食安全保障和城乡融合发展。

在区域层面上,①**加强区域合作与发展**,促进区域内要素流通与汇聚,大力促进省区开放发展、区域协同合作,促使水、能源和粮食各要素的有效流动和汇聚,发挥区域内各省区的优势,促进区域水-能源-粮食优质协调发展。②**推动区域协调发展**,重点发挥各地比较优势,

走分工合理、优化发展的道路,形成优势互补、高效协作、高质量发展的区域经济格局,分区分类分级推动水-能源-粮食关联系统的耦合协调,上游地区重点关注水-能源协调、中游重点关注水-粮食及水-能源-粮食协调,下游重点关注水-能源-粮食关联系统协调。③**分区诊断与精准施策**,选择水资源保护区、能源金三角、粮食主产区作为重点区域,探索水-能源-粮食系统协同安全与优化路径,选择耦合协调度高的区域,建设一批水-能源-粮食协调发展示范区,支持在水资源集约节约利用、清洁能源高效开发利用、优质粮食生产和高标准农田建设等方面的先行先试,发挥示范引领和带动作用。

在省域层面,识别制约水-能源-粮食协同发展的关键因素和风险因子,立足资源禀赋,因地制宜制定水-能源-粮食关联系统发展政策和管理方案,探索差异化的

**耦合协调路径**。例如,宁夏的水-能源-粮食关联系统的综合协同安全度和耦合协调度均较低,需向耦合协调发展好的省区借鉴优秀经验,完善针对水-能源-粮食关联系统协同安全的保障措施;甘肃和青海以粮食为核心的各指标对协同安全程度限制最强,应提高农业机械化水平,促进农业科技转型,实现粮食生产的提质增效;内蒙古和山西作为产能大省,应优化能源生产结构,通过技术进步提升各类清洁能源的产量。其次,**加快传统产业转型升级**,推动高技术产业和现代服务业的发展,降低重化工业的能耗比重。例如,陕西应转变能源利用方式,在提高能源利用率的同时,注重对生态环境的保护;山东和河南在保持农业稳定发展的同时,结合高标准农田建设,推进大中型灌区续建配套及节水改造,普及推广喷灌、微灌、滴灌、低压管道输水灌溉等高效节水灌溉技术,实施区域化、规模化高效节水灌溉。

