

DOI: 10.20103/j.stxb.202207041902

李雨琴, 张鹏鹏, 张力小, 郝岩, 李心晴. 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(21): 8985-8997.

Li Y Q, Zhang P P, Zhang L X, Hao Y, Li X Q. Regional inequality of water-energy-food resources in China: Evolution trend and driving forces. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8985-8997.

# 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素

李雨琴<sup>1</sup>, 张鹏鹏<sup>2</sup>, 张力小<sup>1,\*</sup>, 郝岩<sup>1</sup>, 李心晴<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

<sup>2</sup> 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024

**摘要:** 在水资源供需矛盾日益趋紧的背景下, 定量分析“水-能”、“水-粮”资源空间适配格局及其动态演化趋势, 可为不同地区间资源优化配置以及协同管理提供参考依据。系统核算了 2000—2019 年中国大陆 30 省(自治区、直辖市)粮食与能源生产的蓝水足迹, 运用基尼系数及不平衡指数等方法综合测度我国水-能-粮资源空间适配格局的演变过程, 并从资源禀赋和生产结构两方面解析了资源错配的驱动因素。结果表明: (1) 研究期内, 反映粮-水空间适配的基尼系数保持在 0.35 左右, 而能-水基尼系数呈现 U 型变化( $G=0.43-0.62$ ), 总体上能源生产与水资源的空间错配程度更严重。(2) 粮食、能源与水资源错配区域均呈现“北 I 型、南 II 型”的分布格局。研究期内, I 型错配省份均由北部、东部沿海向西部地区扩展, 如黑龙江能-水关系由强-I 型错配转至轻-II 型错配。(3) 水资源禀赋变化和稻谷种植规模北移共同驱动粮-水空间错配格局的演化; 除黑龙江受原油减产影响较大外, 火电空间布局及蓝水足迹的西移对能-水错配格局起到决定性作用。(4) 粮食与水资源适配关系主要由自然属性、经济效益和农业扶持政策决定, 而能-水适配主要受资源禀赋、区域经济差异和环境政策影响。推进我国水-能-粮资源可持续高效利用, 亟需强化总体规划, 优化空间布局与调整产业结构, 提升用水效率及加强区域合作。

**关键词:** 水-能源-粮食; 资源适配; 基尼系数; 不平衡指数; 驱动因素

## Regional inequality of water-energy-food resources in China: Evolution trend and driving forces

LI Yuqin<sup>1</sup>, ZHANG Pengpeng<sup>2</sup>, ZHANG Lixiao<sup>1,\*</sup>, HAO Yan<sup>1</sup>, LI Xinqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

<sup>2</sup> School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

**Abstract:** Critical geographical mismatch between limited water availability and increasing demand brings tremendous challenges to ensuring sustainable food and energy security in China. Most previous studies measuring the spatial mismatching characteristics are based on one paired nexus as food-water or energy-water, yet few have characterized the spatial-temporal variations of FEW nexus inequality and further investigated the hidden drivers under a unified system boundary when involving all the three subsystems. From a nexus perspective, the quantitative analysis of the inequality pattern and evolving trend would provide the sound basis for appropriate allocation and coordinated management of water-energy-food resources. Therefore, this study systematically calculated the blue water footprint of food (rice, wheat, maize, beans and tubers) and main water-consumptive energy (raw coal, crude oil, natural gas, thermal power generation) production in 30 provinces of mainland China during 2000—2019, aiming to characterize the inequality against water availability at both the national and regional scales, by combing the Gini coefficient and unbalanced index. Additionally,

**基金项目:** 国家自然科学基金(52225902, 42001245, 52070022)

**收稿日期:** 2022-07-04; **网络出版日期:** 2023-06-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

# 本研究尚缺中国港澳台统计数据。

the driving forces in view of resources endowment and production structure were also identified. The results showed that: (1) the Gini coefficient of food-water nexus was always kept around 0.35 over the last two decades, while that for energy-water nexus was higher with a U-shaped symmetrical change ( $G = 0.43-0.62$ ), manifesting a greater spatial inequality between energy production and water availability at the national scale. In terms of different resource types, rice, as the water-intensive crop, performed best, compared with wheat, corn, raw coal and thermal power. (2) the food-water nexus and energy-water nexus both presented type- I inequality in northern regions, which has extended westward from the northern and eastern coastal regions during the concern period, compared with type- II in southern regions. Typically, Heilongjiang converted from significant type- I inequality to low type- II. (3) changes in water availability and rice production transfer to the north were the main causes of changes in food-water nexus inequality. While it was mainly due to the westward development of thermal power industries with regard to changes in energy-water nexus inequality, except for the greater impact by crude oil reduction in Heilongjiang province. (4) the spatial relationship of food-water resources was mainly affected by crop properties, economic benefits and agricultural policies, while it turned to fossil fuel reserves, economic disparities and environmental policies in terms of energy-water resources. Results obtained in this study could shed light on water-energy-food resources management, by strengthening general plan, optimizing spatial distribution, accelerating industrial restructuring, improving water use efficiency, and enhancing regional cooperation.

**Key Words:** water-energy-food; resources inequality; Gini coefficient; unbalanced index; driving forces

水是人类生存与发展不可替代的资源,也是粮食和能源两种基础性资源的核心生产要素<sup>[1]</sup>。据统计,农田灌溉和能源生产用水分别占全球用水总量的 70% 和 15% 左右<sup>[2-3]</sup>。然而,全球面临日益严重水资源短缺危机,中国作为世界上最大、人口最多的发展中国家,人均水资源量不足世界平均水平的 30%,水资源供需矛盾尤为尖锐<sup>[4]</sup>。在全球气候变化、快速城镇化和膳食结构转型等背景下,粮食和能源对水资源的需求持续增长,无论是粮食-能源对水资源的竞争,还是水资源的供需矛盾都将进一步加剧<sup>[5]</sup>。与此同时,中国水、能源和粮食资源空间分布极度不均且错位严重,如我国 83% 的水资源集中在长江流域及其以南省份,而耕地和传统化石能源资源主要分布在长江流域以北地区。水资源供给与需求间的地理空间错配加剧了我国水资源“南丰北缺”的局面,严重威胁着水、能源与粮食安全<sup>[6]</sup>。因此,以水资源为中心,探究“能-水”、“粮-水”的空间分布特征与适配关系,对理清我国水-能-粮资源空间冲突、优化区域资源配置、疏解资源供需压力意义重大。

从国内外水-能源-粮食资源空间关系的研究进展来看,已有研究主要集中在资源耦合关系与资源匹配关系量化分析等方面。资源耦合关系的空间差异化研究多借助耦合协同指数<sup>[7-9]</sup>、数据包络分析<sup>[10-12]</sup>、主成分分析<sup>[13]</sup>等方法,用来比较不同地理区域的水-能-粮资源耦合效率<sup>[10-12]</sup>、供需压力水平<sup>[13-14]</sup>和安全程度<sup>[9,15-17]</sup>等。此类研究一般通过构建分层指标体系,评价结果往往受到指标选取与权重确定的主观性影响。资源匹配关系的研究重点关注分析水资源供需<sup>[18]</sup>、农业-水-土地资源<sup>[19-22]</sup>、能-水资源<sup>[23-24]</sup>等均衡状态的空间分布。例如,有研究探究了 2004—2016 年我国能源水足迹与水资源的空间匹配关系,指出全国 1/3 的地区存在“能-水”不匹配问题<sup>[25]</sup>。但在统一系统边界下,量化分析粮食、能源两大水资源竞争用户与区域水资源的适配程度、空间特征及其动态演变驱动因素的研究目前仍然较为缺乏。在方法上,常用于衡量适配程度的方法主要包括洛伦茨曲线<sup>[18,23-24]</sup>、基尼系数<sup>[19,22,24]</sup>、重心模型<sup>[24-25]</sup>和匹配系数<sup>[21-22]</sup>等。其中,前三者多用于表征区域间资源分布的均衡情况,而水压力指数<sup>[25]</sup>、单位耕地面积水资源量<sup>[21]</sup>等匹配度指标,仅从压力层面反映了水资源的短缺程度,缺乏对水资源盈余地区水资源供需不平衡的考察。因此,本研究将系统核算 2000—2019 年中国大陆 30 省(自治区、直辖市)粮食和能源生产的蓝水足迹,借助基尼系数及不平衡指数等方法综合测度我国水-能源-粮食资源空间适配格局演变过程,并从资源禀赋和生产结构两方面解析资源错配的驱动因素。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

受数据资料限制,本文以中国大陆 30 省(自治区、直辖市)为研究对象,系统分析 2000—2019 年我国粮食-能源生产与水资源适配格局的演变趋势及驱动因素。各省粮食作物播种面积来源于《中国农村统计年鉴》,一次能源产量与火力发电量来源于《中国能源统计年鉴》,水资源总量和农田灌溉用水量来源于《水资源公报》,作物灌溉定额和不同能源类型生产用水定额依据各省多年来废止以及现行的《用水定额》标准。需要说明的是,工业产品用水定额指生产单位产品取水量的限额,而本研究以耗水量量化能源生产过程的蓝水足迹,故此处参考相关文献<sup>[25-27]</sup>对能源产品生产用水定额进行修正。各省作物灌溉定额和能源生产单位蓝水足迹数据详见表 1 和表 2。

表 1 各省作物灌溉定额/(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Water quota for agriculture production in 30 provinces of mainland China

省份 Provinces	稻谷 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	豆类 Beans	薯类 Tubers	油料 Oil	棉花 Cotton	糖料 Sugar	蔬菜 Vegetables	瓜果 Melons	其他 Others
北京	1650	2850	450	1650	1650	1650	1650	1650	5850	1650	1650
天津	8550	2025	2025	2025	2025	5925	5925	5925	5925	5925	5925
河北	4987.5	2850	1125	600	1650	975	1650	1650	3750	3750	1650
山西	5000	1650	1500	900	1425	1200	1800	1800	2100	1000	900
内蒙古	7500	2100	1600	1100	1200	2150	1500	3200	2300	2000	2000
辽宁	7440	2775	1605	1500	1800	1650	1695	2880	1830	1830	2100
吉林	8000	2050	1600	1300	1550	1400	1500	1500	4000	1800	300
黑龙江	4800	920	990	936	1000	1000	—	1000	1000	800	1000
上海	9150	1800	2250	1700	2200	750	2000	2000	900	2000	2800
江苏	8400	1125	1050	975	1170	1050	1050	1050	1260	1260	1500
浙江	5370	675	600	450	600	562.5	1155	4500	1200	1260	5100
安徽	3165	1005	1005	1005	1206	750	1005	2848	900	1395	900
福建	4350	2700	750	1350	2025	2025	2025	3150	3225	525	1800
江西	3930	330	1725	810	1215	915	1725	4890	1650	930	6000
山东	6690	3480	1350	1545	1860	675	2325	4500	2100	1800	1200
河南	6345	1875	1470	1275	750	1350	1575	4290	2490	1725	1500
湖北	5970	750	1545	1095	915	1020	1560	4290	1650	1650	1725
湖南	3600	675	825	660	690	1050	615	2250	2880	2880	1230
广东	5475	—	2025	2220	2145	1935	—	5475	2820	2820	1800
广西	4470	2310	1470	1350	1440	1200	1110	3150	3000	1725	1650
海南	7890	—	1500	1500	1500	1500	—	2910	2040	2040	2000
重庆	6150	975	825	825	570	825	1875	3825	3000	3000	1200
四川	3450	600	450	450	300	495	600	750	900	600	450
贵州	3800	700	950	800	650	1050	800	650	1100	1100	650
云南	3675	2700	1875	2000	975	2625	3500	4800	3975	3225	1500
陕西	6750	1350	1125	1125	1125	1125	1350	1350	3450	3000	750
甘肃	11400	5325	6600	5100	4200	4800	4200	4800	6450	5100	5250
青海	—	3300	3300	2700	1650	2700	—	—	6000	6000	2700
宁夏	12450	4650	4500	2400	2400	3750	—	3750	6450	2850	2400

—: 指该地区不种植此类作物

表 2 各省能源生产单位蓝水足迹(以 2000 年和 2019 年为例)

Table 2 The unit blue water footprint for energy production in 30 provinces of mainland China (2000 &amp; 2019)

省份 Provinces	2000					2019				
	原煤开采 Raw coal mining/ (m <sup>3</sup> /t)	原煤洗选 Raw coal washing/ (m <sup>3</sup> /t)	原油开采 Crude oil extraction/ (m <sup>3</sup> /t)	天然气开采 Natural gas extraction/ (m <sup>3</sup> /t)	火力发电 Thermal power generation/ (m <sup>3</sup> /MWh)	原煤开采 Raw coal mining/ (m <sup>3</sup> /t)	原煤洗选 Raw coal washing/ (m <sup>3</sup> /t)	原油开采 Crude oil extraction/ (m <sup>3</sup> /t)	天然气开采 Natural gas extraction/ (m <sup>3</sup> /t)	火力发电 Thermal power generation/ (m <sup>3</sup> /MWh)
北京	1.32	0.15	—	—	6.85	0.5	0.15	—	—	0.9
天津	—	—	2.5	4.4	2.53	—	—	2.5	4.4	2.53
河北	1	3	0.9	4.18	5.25	0.6	0.1	0.675	4.18	2.75
山西	0.3	0.12	—	4.4	3.8	0.225	0.08	—	4.4	2.88
内蒙古	0.9	2.5	1.1	0.2	3.8	0.225	0.11	1.1	0.2	2.21
辽宁	0.065	0.15	3	2	5.5	0.375	0.08	1.65	1.15	2.75
吉林	1.2	1.2	3.1	5	3.84	0.475	0.1	5	4.5	1.32
黑龙江	2	0.75	9	2.6	9	0.5	0.75	5.5	2.6	2.75
上海	—	—	4	2	3.84	—	—	4	2	2.325
江苏	1	0.3	6	2	6.6	0.75	0.15	4	2	2.21
浙江	0.5	0.15	—	—	8.5	0.5	0.15	—	—	2.75
安徽	0.75	0.65	—	—	4	0.4	0.15	—	—	2.75
福建	0.8	2.5	—	—	10	0.25	2.5	—	—	2.75
江西	2.5	2.5	—	—	3.84	0.425	0.255	—	—	2.75
山东	0.36	0.13	0.8	2	3	0.36	0.1	0.8	2	2.45
河南	0.45	0.2	3.1	0.2	3	0.35	0.065	3.1	0.2	1.5
湖北	0.43	0.4	4	0.2	3.84	0.43	0.4	4	0.2	2.75
湖南	3	1	—	—	4	0.3	0.4	—	—	2.75
广东	2.25	0.7	4	2	3.84	1.8	0.7	4	2	2.75
广西	0.35	0.14	8	—	3.84	0.35	0.14	8	—	2.75
海南	—	0.3	6	2	3.84	—	0.3	6	2	2.75
重庆	1.2	0.116	—	2	3.8	0.85	0.0825	—	2	2.2
四川	1.6	1	13	4.46	3.84	0.6	0.11	3.5	2.5	2.75
贵州	0.8	0.4	—	5	3.84	0.45	0.125	—	4.5	2.45
云南	1	0.8	—	—	3.84	0.7	0.4	—	—	2.75
陕西	0.9	0.9	4	0.25	3.8	0.2	0.12	3.5	0.25	2.75
甘肃	0.4	0.2	5	0.2	5.8	0.3	0.125	2.2	0.15	2.75
青海	1.5	0.15	4.5	0.1	4.5	0.3	0.125	1.75	0.15	2.75
宁夏	0.7	1	1.5	—	3.84	0.275	0.1	1.5	—	2.69
新疆	0.31	0.18	1.05	0.25	3.89	0.142	0.0825	1.05	0.25	2.2

—: 指该地区当年不生产此类能源

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 蓝水足迹核算方法

水足迹概念由 Hoekstra 于 2002 年提出,随后由 Chapagain 与 Hoekstra 对其进行改进。与生态足迹的概念相似,水足迹是指特定的人口(地区或者国家)在一定时间内消费某种社会产品或服务所需要的全部水资源量<sup>[28]</sup>。蓝水足迹(来自于江河、湖泊及含水层中的地表径流与地下水)、绿水足迹(雨水)和灰水足迹(稀释污染物需要的水量)分别表征某一产品或服务对不同类型水资源的占用情况及对水生态的影响<sup>[29]</sup>。本研究主要度量水资源量的稀缺程度,绿水为下渗到非饱和土壤层中的水,无法在能源领域利用,灰水涉及水质型缺水问题,这两种足迹在本研究中均不予以考虑。故本研究以粮食作物、能源生产过程中的蓝水足迹为研究对象,具体核算方法如下。

#### (1) 粮食生产蓝水足迹核算方法

粮食生产蓝水足迹以作物生产全过程的实际灌溉用水量表示<sup>[30]</sup>。按照农业统计数据库的口径,粮食包

括稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类等五类作物,蓝水足迹核算公式如下。

$$WF_{ijk} = WI_{ik} \times \frac{I_{ij} \times A_{ijk}}{\sum_{j=1}^{n+m} (I_{ij} \times A_{ijk})} \quad (1)$$

$$WF_{ik} = \sum_{j=1}^n WF_{ijk} \quad (2)$$

式中,  $WF_{ik}$  为第  $k$  年  $i$  省粮食生产的蓝水足迹,  $m^3$ ;  $WF_{ijk}$  为第  $k$  年  $i$  省  $j$  作物生产的蓝水足迹,  $m^3$ ;  $WI_{ik}$  为第  $k$  年  $i$  省农田灌溉用水量,  $m^3$ ;  $I_{ij}$  为  $i$  省  $j$  作物的灌溉定额,  $m^3/hm^2$ ;  $A_{ijk}$  为第  $k$  年  $i$  省  $j$  作物的播种面积,  $hm^2$ 。需要说明的是,农田灌溉用水量是指水田、水浇地和菜田等农田中所有种植作物的灌溉用水量,因此,其涵盖范围除上述五种粮食作物外,还包括油料、棉花、糖料、蔬菜瓜果等经济作物。公式(1)中的  $m$  即表示核算范围外的其他经济作物。

### (2) 能源生产蓝水足迹核算方法

本文以一次能源原煤、原油、天然气和二次能源火电为研究对象<sup>[31]</sup>,分别核算原煤开采和洗选过程蓝水足迹、原油开采蓝水足迹、天然气开采蓝水足迹以及火力发电过程热力、冷却和辅助系统的蓝水足迹。计算公式参见(3)—(7)。需要说明的是,本文中能源生产蓝水足迹的核算对象不包括水电。水库提供了包括但不限于发电的重要功能,如蓄水灌溉、防洪防涝、养殖、航运和生态改善等。部分研究将水库蒸发量计入水电耗水量,但这种联系并不明确,因此,本文不予研究。

$$W_{coal,ik} = W_{coal,ik}^m + W_{coal,ik}^w = f_{coal,ik}^m \times P_{coal,ik}^m + f_{coal,ik}^w \times P_{coal,ik}^w \quad (3)$$

$$W_{oil,ik} = f_{oil,ik} \times P_{oil,ik} \quad (4)$$

$$W_{gas,ik} = f_{gas,ik} \times P_{gas,ik} \quad (5)$$

$$W_{thermal,ik} = f_{thermal,ik} \times P_{thermal,ik} \quad (6)$$

$$WE_{ik} = W_{coal,ik} + W_{oil,ik} + W_{gas,ik} + W_{thermal,ik} \quad (7)$$

式中,  $W_{coal,ik}$ 、 $W_{oil,ik}$ 、 $W_{gas,ik}$ 、 $W_{thermal,ik}$ 、 $WE_{ik}$  分别为第  $k$  年  $i$  省原煤、原油、天然气、火电及能源生产的蓝水足迹,  $m^3$ ;  $f_{coal,ik}^m$ 、 $f_{coal,ik}^w$ 、 $f_{oil,ik}$ 、 $f_{gas,ik}$  分别为第  $k$  年  $i$  省原煤开采、原煤洗选、原油开采及天然气开采过程单位蓝水足迹,  $m^3/t$ ;  $f_{thermal,ik}$  为第  $k$  年  $i$  省火力发电过程单位蓝水足迹,  $m^3/kwh$ ;  $P_{coal,ik}^m$ 、 $P_{coal,ik}^w$ 、 $P_{oil,ik}$ 、 $P_{gas,ik}$  分别为第  $k$  年  $i$  省原煤产量、原煤洗选量、原油产量及天然气产量,  $t$ ;  $P_{thermal,ik}$  为第  $k$  年  $i$  省火力发电量,  $kwh$ 。

### 1.2.2 基尼系数

基尼系数是定量反映社会财富分配公平性的指标,也被扩展用于衡量资源分布的均衡程度<sup>[32]</sup>。本研究采用基尼系数量化全国范围内粮食-能源生产与水资源禀赋间的适配关系。首先将各省按水资源量由低到高排序,然后计算各省水资源量、不同类型粮食作物和能源生产蓝水足迹的累计百分比,采用梯形面积法计算基尼系数<sup>[33]</sup>,具体公式如下。

$$G_{jk} = \sum_i [(Y_{i+1,jk} + Y_{i,jk}) (X_{i+1,k} - X_{i,k}) - (X_{i+1,k} + X_{i,k}) (X_{i+1,k} - X_{i,k})] \quad (8)$$

式中,  $G_{jk}$  表示第  $k$  年  $j$  资源与水资源的基尼系数,  $X_{i,k}$  表示第  $k$  年  $i$  省水资源量累计百分比,  $Y_{i,jk}$  表示第  $k$  年  $i$  省  $j$  资源生产过程的蓝水足迹的累计百分比。由公式可知,基尼系数的值在  $[-1, 1]$  之间,当其值为负时,表明粮食-能源生产的蓝水足迹更多地分布在水资源丰富裕的地区;反之,则表明粮食-能源生产的蓝水足迹集聚在缺水地区。基尼系数的绝对值愈大,水-能源-粮食资源的空间适配性愈差。

### 1.2.3 不平衡指数

基尼系数从全国层面量化了水-能源-粮食资源的空间适配程度,但无法反映局部的空间适配特征。为此,本文通过构建不平衡指数从资源短缺和资源盈余两方面刻画不同省份粮食-能源生产与水资源禀赋的适配与错配关系,计算公式如(9)、(10)所示。其含义为,在笛卡尔直角坐标系中以某省自产水资源量占全国水资源总量的比重为横坐标,以该省粮食(能源)生产蓝水足迹占全国粮食(能源)生产蓝水足迹总量的比重为纵坐标得到固定点位,根据该坐标点到直线  $y=x$  的距离刻画不平衡指数 ( $UI$ )。当  $UI$  值位于  $-0.02$ — $0.02$  之

间时,认为水-能源-粮食资源处于适配状态;当  $UI > 0.02$  时,区域粮食(能源)生产蓝水足迹的比重高于其水资源量比重,即当地水资源相对粮食(能源)资源更为短缺,被定义为 I 型错配;当  $UI < -0.02$  时,区域粮食(能源)生产蓝水足迹的比重低于其水资源量比重,即粮食(能源)生产负荷与水资源丰裕程度不符,被定义为 II 型错配。同时,从轻、中、重三个等级进一步对不平衡指数反映的错配水平进行划分,结果如表 3 所示。

$$UI_{ik}^f = \frac{WF_{ik} / \sum_i WF_{ik} - W_{ik} / \sum_i W_{ik}}{\sqrt{2}} \tag{9}$$

$$UI_{ik}^e = \frac{WE_{ik} / \sum_i WE_{ik} - W_{ik} / \sum_i W_{ik}}{\sqrt{2}} \tag{10}$$

式中,  $UI_{ik}^f$  为第  $k$  年  $i$  省粮-水不平衡指数;  $UI_{ik}^e$  为第  $k$  年  $i$  省能-水不平衡指数;  $W_{ik}$  为第  $k$  年  $i$  省水资源量  $m^3$ 。

表 3 不平衡指数对应的适配水平等级划分

Table 3 Inequal level according to unbalanced index

不平衡指数 Unbalanced index	适配水平 Matching level	定义 Definition	不平衡指数 Unbalanced index	适配水平 Matching level	定义 Definition
<-0.06	重-II型错配	生产负荷	0.02—0.04	轻-I型错配	生产负荷
-0.06—-0.04	中-II型错配	低于水资源	0.04—0.06	中-I型错配	高于水资源
-0.04—-0.02	轻-II型错配	丰裕度	>0.06	重-I型错配	丰裕度
-0.02—0.02	适配				

通过对不平衡指数进行分解,可从资源禀赋和粮食-能源生产结构两方面解析各省错配变化的驱动因素,并识别不同区域的关键影响因子。分别以  $UI_{i1}^{f(e)}$  和  $UI_{i2}^{f(e)}$  代表 2000 年和 2019 年  $i$  省粮-水(能-水)不平衡指数,具体分解过程和公式如下。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta UI_i^{f(e)} &= UI_{i2}^{f(e)} - UI_{i1}^{f(e)} \\ &= \frac{WF(E)_{i2} / \sum_i WF(E)_{i2} - W_{i2} / \sum_i W_{i2}}{\sqrt{2}} - \frac{WF(E)_{i1} / \sum_i WF(E)_{i1} - W_{i1} / \sum_i W_{i1}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{\sum_j WF(E)_{ij2} / \sum_i WF(E)_{i2} - W_{i2} / \sum_i W_{i2}}{\sqrt{2}} - \frac{\sum_j WF(E)_{ij1} / \sum_i WF(E)_{i1} - W_{i1} / \sum_i W_{i1}}{\sqrt{2}} \tag{11} \\ &= \sum_j \frac{WF(E)_{ij2} / \sum_i WF(E)_{i2} - WF(E)_{ij1} / \sum_i WF(E)_{i1}}{\sqrt{2}} + \frac{W_{i1} / \sum_i W_{i1} - W_{i2} / \sum_i W_{i2}}{\sqrt{2}} \end{aligned} \right.$$

粮食-能源生产结构效应:

$$\sum_j \frac{WF(E)_{ij2} / \sum_i WF(E)_{i2} - WF(E)_{ij1} / \sum_i WF(E)_{i1}}{\sqrt{2}} \tag{12}$$

水资源禀赋效应:

$$\frac{W_{i1} / \sum_i W_{i1} - W_{i2} / \sum_i W_{i2}}{\sqrt{2}} \tag{13}$$

## 2 结果与分析

### 2.1 中国粮食-能源生产与水资源适配格局演化趋势分析

基尼系数反映了中国粮食-能源生产蓝水足迹与水资源禀赋间的适配程度,结果如图 1 所示。整体而言,2000—2019 年粮-水基尼系数保持在 0.35 左右,而能-水基尼系数高于粮-水,且呈现 U 型对称变化( $G=0.43$ —

0.62),能源生产与水资源的空间错配程度更为严重。此外,不同类型农作物和能源产品与水资源间的适配程度和变化趋势也不相同。在粮食作物方面,稻谷、小麦和玉米等三大主粮与水源的基尼系数无明显变化趋势,但在适配表现上呈现较大差异。其中,稻谷种植与水资源量的适配程度最高( $G=0.06—0.26$ ),主要是因为稻谷生产过程灌溉需水量大(稻谷产生的蓝水足迹占全国粮食蓝水足迹总量的60%左右),主产地多分布在秦岭-淮河以南的水田区。而小麦生产与水源的适配表现最差,研究期内基尼系数多高于0.65,2019年最高达到了0.79。这主要是因为小麦优势区集中在缺水的黄淮海平原,该地区可满足全国约四分之三的小麦需求<sup>[34]</sup>。同样,广泛种植于北方地区的玉米与水资源禀赋间的适配性也较差,基尼系数在0.60上下波动。与三大主粮的表现不同,豆类、薯类生产的蓝水足迹与水资源量的基尼系数在研究期间均显著下降,尤其是豆类,基尼系数从2000年的0.56降至2019年的0.33。这与作物自然属性和经济政策等环境变化密切相关。豆类属于土地密集型作物,受耕地资源和农业技术限制,近些年我国大豆多依赖国外进口满足市场需求。本地优势产区集中在黑龙江、内蒙古等地,但近年在区域经济差异、技术创新和宏观政策等的影响下,豆类生产部分向西南地区扩散<sup>[35—36]</sup>。薯类分布与水源的适配性一直较佳,基尼系数的下降也得益于西南地区薯类种植比较效益的提升、扶贫政策推动以及技术进步、气候变化导致的可种植面积扩展等<sup>[37]</sup>。

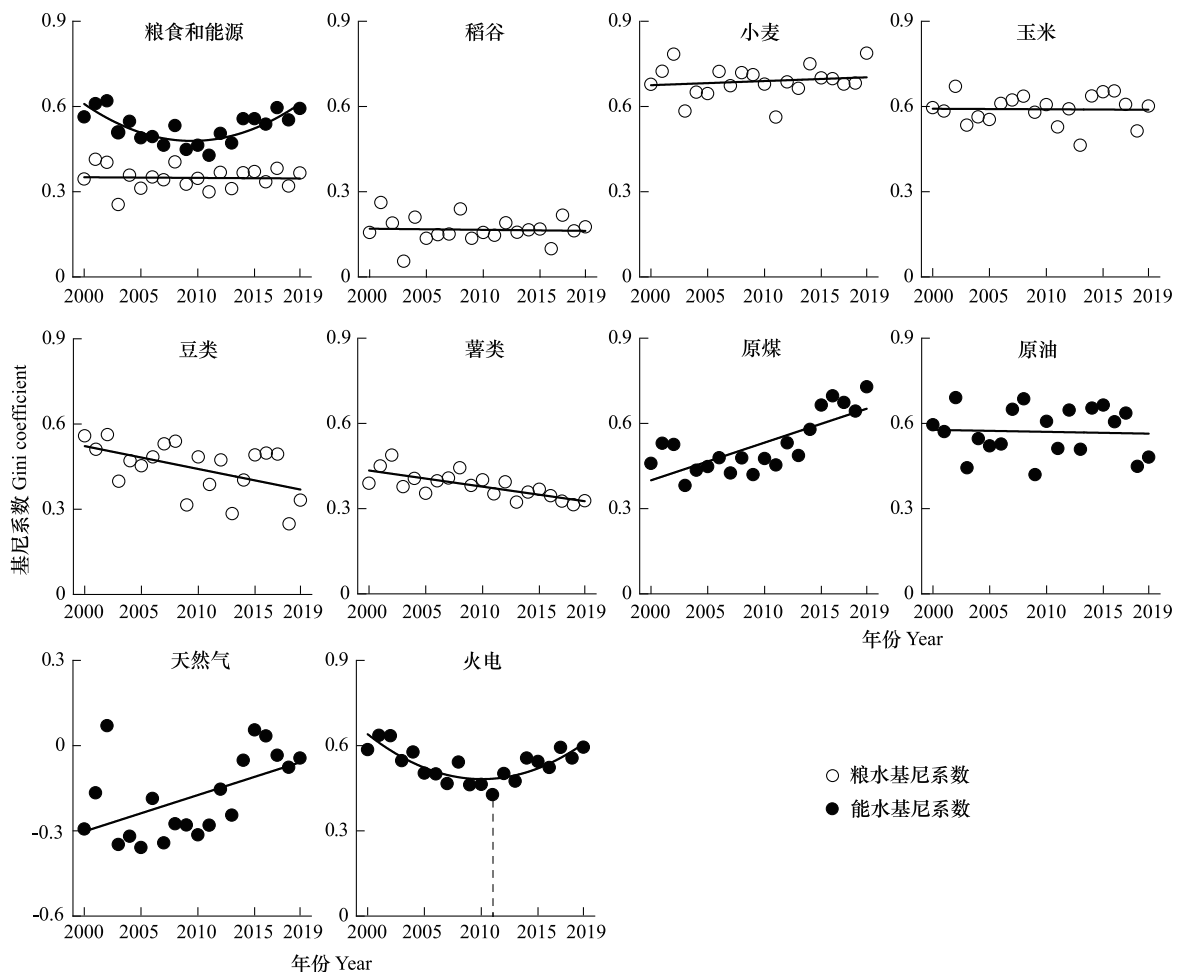


图1 2000—2019年中国粮食-能源生产蓝水足迹与水资源禀赋适配程度

Fig.1 Matching degree of freshwater resources against blue water footprint of grains and energy production during 2000—2019 in China

在能源类型方面,火力发电作为二次能源,其蓝水足迹占全国能源生产蓝水足迹总量的五分之四左右,且这一比例随着火电行业快速发展持续升高。这表明火电厂的空间分布及其用水需求决定了全国范围内能源生产与水资源禀赋间的适配关系。从适配变化来看,火电与水资源量的基尼系数与能源整体基本一致,即在

2011 年间降至最低后逐渐恢复至与 2000 年相同水平。究其原因是受政策与经济发展影响,火电蓝水足迹重心南移后又向中西部缺水地区移动。具体而言,2001 年我国加入世界贸易组织(WTO)后,东南沿海地区凭借地理优势、外向型经济基础率先受益,经济高速发展带动电力需求大幅上涨,加之粗放的用水方式使得火电的蓝水足迹重心向南方地区转移。2012 年党的十八大以后,我国以前所未有的力度推动火电行业改革,主要包括逐渐淘汰落后产能、限制长三角、珠三角、京津冀等重点区域的火电建设,鼓励中西部煤炭基地的煤电一体化开发,并出台最严格水资源管理制度,全面收紧火电机组用水效率要求等<sup>[38]</sup>。在政策推动下,西移的火电产业与水资源禀赋间的错配程度再次加重。就一次能源而言,天然气生产多集聚在水资源丰富裕的四川,2000 年西部大开发后逐步形成新疆、陕甘宁、川渝等气区。因此,天然气生产与水资源的适配表现总体较好,研究期间基尼指数从-0.30 左右波动上升至零值附近。反之,石油资源多分布在北方地区,与水资源的适配性较差,基尼系数在 0.57 上下波动。而原煤与水资源的错配程度在研究期间显著上升,基尼系数从 0.46 升至 0.73 左右。这也归因于晋陕蒙煤炭基地的迅猛发展与该地区资源性缺水的矛盾。由此可见,资源禀赋、区域经济差异和环境政策共同影响了中国能源产业布局及其与水资源的适配关系。

## 2.2 各省粮食-能源生产与水资源适配特征分析

图 2 通过不平衡指数分别显示了 2000 年和 2019 年中国各省粮食-能源生产与水资源禀赋间的适配情况。从空间分布来看,粮食、能源与水资源的错配区域总体上呈现“北 I 型、南 II 型”的格局。研究期内, I 型错配省份均由北部、东部沿海向西部地区扩展,且能-水 I 型错配覆盖范围更广。从错配程度来看,粮食生产与水资源的不平衡指数在-0.06—0.08 之间,表现为“偏向型”,即粮-水 I 型错配更加显著。而能源与水资源则表现为“对称型”(  $U^e = -0.08—0.08$  ),即 I 型、II 型错配程度相当。从变化特征来看,粮-水错配格局的空间变化较小,而能源与水资源在错配省份、类型和程度上均发生显著变化。这与农业和能源产业属性和发展模式有关。粮食生产以土地为依托,土地资源数量的有限性、在空间分布上的固定性限制了粮食产业的大规模迁移。而电力生产基本不受地理区域限制,电网输送高效快捷,同时工业化、城镇化、绿色化背景下的区域经济发展、产业结构调整高速进行,驱使着我国能源产业布局的变迁。

就分省粮食与水资源的适配情况来看,2000 年粮-水错配仅存在于个别省份,其中江苏、黑龙江、山东和河北四省为 I 型错配,而西南的云南、四川和贵州三省为 II 型错配。至 2019 年,由于农业经济的快速发展,新疆和安徽开始呈现轻- I 型错配,江苏由中- I 型错配转为重- I 型错配。同样,由于南方农业种植面积的萎缩,导致 II 型错配在长江流域以南地区呈现区域性扩散之势。

对能-水错配而言,2000 年错配区域分布在胡焕庸线以东地区,东北及东部沿海省份为 I 型错配,南方省份为 II 型错配。其中,黑龙江表现为强- I 型错配,不平衡指数高达 0.080;云南和四川为强- II 型错配,不平衡指数分别为-0.069 和-0.064。2019 年能-水错配区域向西扩散,多数省份在错配类型和错配程度上均发生明显变化。尤其是黑龙江变化最显著,由强- I 型错配转为轻- II 型错配,而内蒙古从适配状态转为中- I 型错配。此外,8 个省份发生了适配状态和轻型错配间的转换。

## 2.3 粮食-能源生产与水资源空间错配的驱动解析

通过对不平衡指数进行分解,可以从资源禀赋和粮食-能源生产结构两方面解析水-能-粮资源错配变化的驱动因素(图 3)。水资源禀赋效应可在一定程度上反映气候变化对我国水资源分布格局的影响<sup>[39]</sup>,如中部和西南地区水资源量减少,东北和长江流域中下游以南地区水资源量增加。其中,黑龙江水资源量从 619.8 亿  $m^3$  增至 1511.4 亿  $m^3$ ,促使不平衡指数减少-0.024,对能-水不平衡指数变化量的贡献率为 24.4%。江西和两广地区(广西、广东)水资源增加效应的贡献值也较大,不平衡指数降幅分别为-0.014、-0.012 和-0.010。反之,研究期间云南水资源量从 2451.8 亿  $m^3$  降至 1533.8 亿  $m^3$ ,水资源禀赋变化导致该地区不平衡指数显著增加,增幅达 0.031,对不平衡指数变化量的贡献率均值为 106.8%。由此可见,云南 II 型错配的缓解与我们的期望不符,多归因于水资源可用量的减少,而并非承担了更高的生产负荷。此外,河南和湖北两省水资源量也有所减少,引发的不平衡指数增幅分别为 0.017 和 0.013。



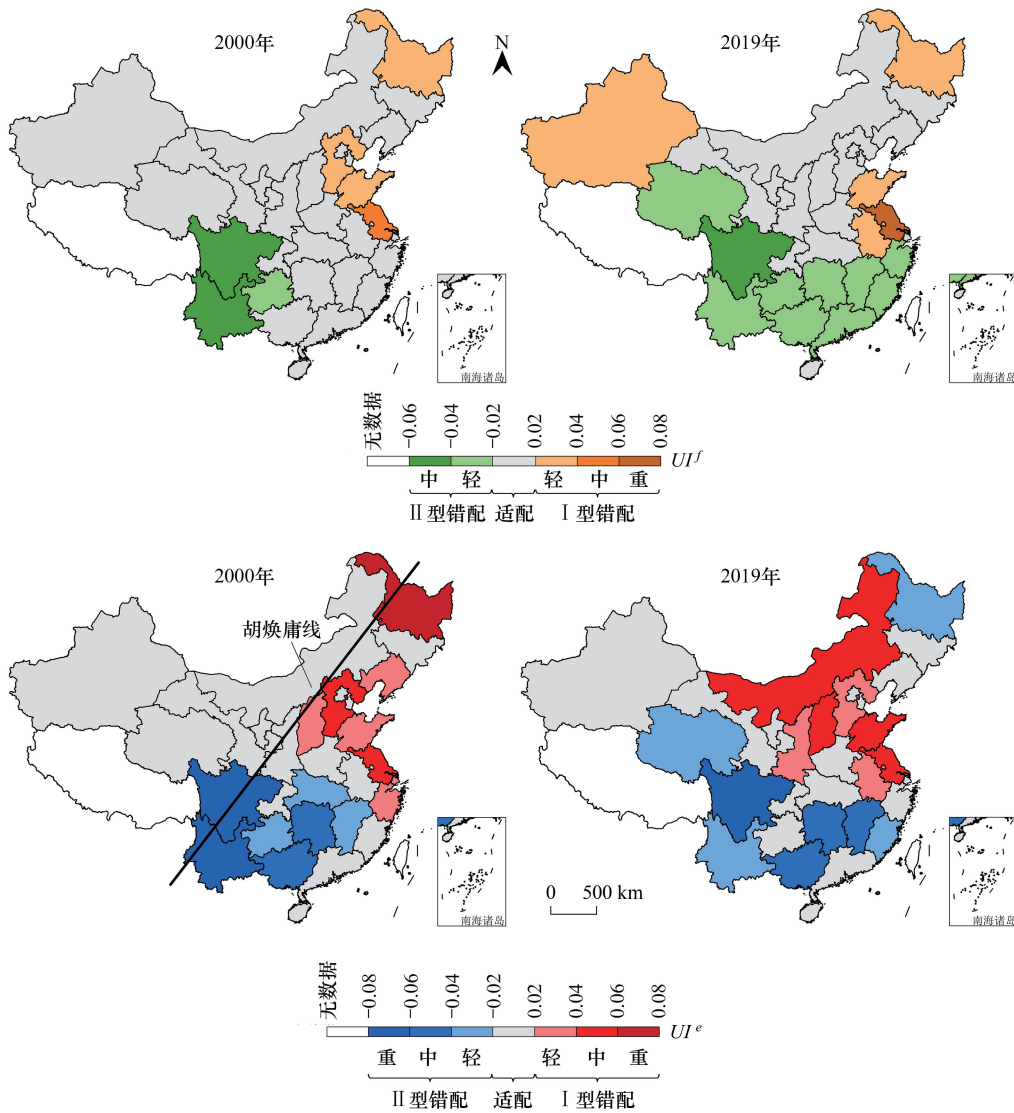


图 2 2000 年和 2019 年中国各省粮食-能源生产蓝水足迹与水资源量不平衡指数

Fig.2 Unbalanced index of freshwater resources against blue water footprint of grains and energy production among provinces between 2000 and 2019

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改

粮食-能源生产结构和蓝水足迹的变化呈现出一定的地域性特征,在北方和华东地区更为显著。在粮食作物方面,稻谷种植部分由华南、湖南、浙江等传统优势区向黑龙江和华东的江苏、安徽、江西等地转移。这些变化的根本原因是,南北方和中东部地区工业化与城镇化进程不同、经济发展水平差异等因素导致产业间、区域间比较收益差距拉大<sup>[40]</sup>。尤其是黑龙江稻谷产业发展迅猛,并逐渐成为全国新型水稻主产区。20年间黑龙江稻谷增产达1.5倍,灌溉用水量从89.9亿m<sup>3</sup>增至168.4亿m<sup>3</sup>,导致不平衡指数增加0.025,对粮-水不平衡指数变化量的贡献率为252.2%。江苏稻谷生产的蓝水足迹占比也有所上升,叠加水资源减量效应,促使该地区升级为重-I型错配。反之,华南、湖南、浙江等地稻谷种植比重下降,水资源量增加,共同驱动该地区粮-水II型错配的发生。与稻谷不同,小麦和玉米生产空间布局没有发生重大转变,但在种植规模方面有所变化。具体表现为北方地区小麦生产的蓝水足迹轻微下降,而玉米的蓝水足迹上升,以新疆和黑龙江两省最为突出。这主要是因为:1)随着社会经济的快速发展和人民生活水平的日益提高,中国居民的膳食模式向动物源食物倾斜,因此兼具粮食、饲料和经济功能的玉米需求量大幅上涨,并逐步超越小麦和水稻成为当前中国种植面积

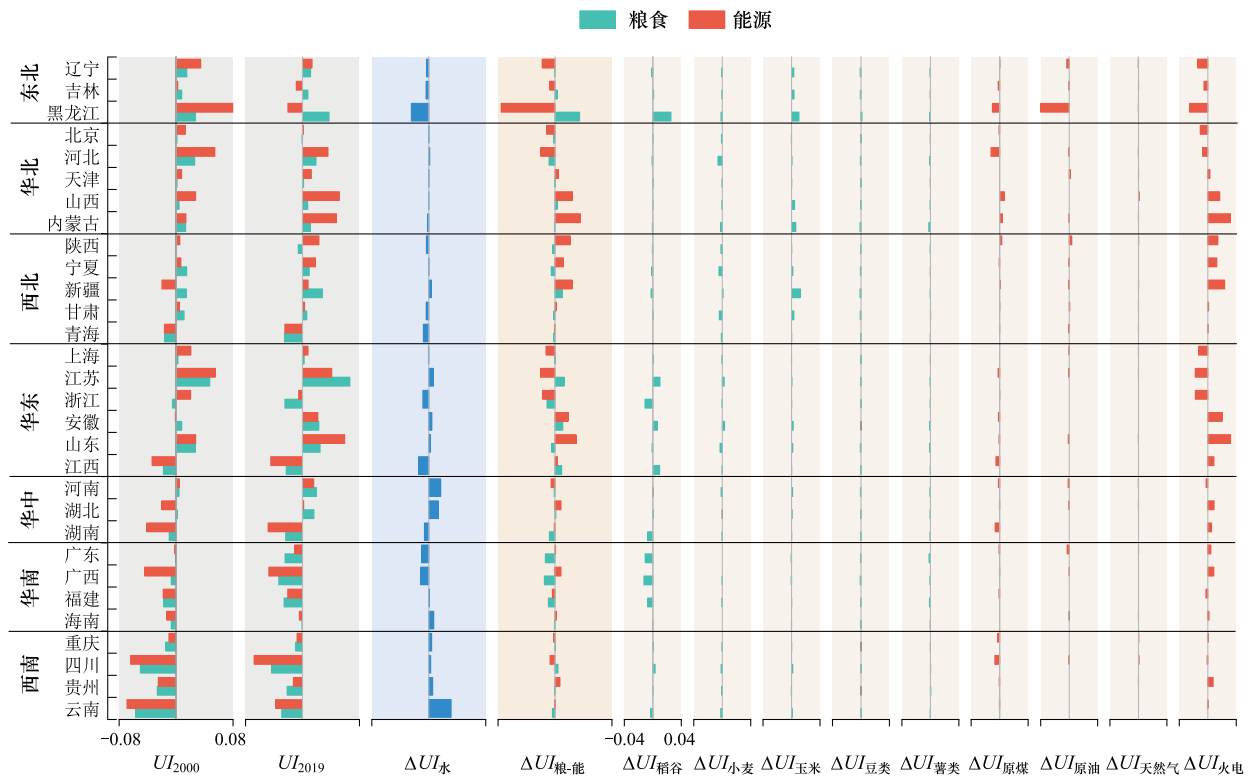


图3 2000—2019年中国各省粮-水、能-水不平衡指数因素分解

Fig.3 Decomposition of grain-water unbalanced index and energy-water unbalanced index among provinces during 2000–2019

$\Delta UI_{水}$ :2000—2019年各省水资源禀赋变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{粮-能}$ :2000—2019年各省粮食或能源生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{稻谷}$ :2000—2019年各省稻谷生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{小麦}$ :2000—2019年各省小麦生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{玉米}$ :2000—2019年各省玉米生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{豆类}$ :2000—2019年各省豆类生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{薯类}$ :2000—2019年各省薯类生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{原煤}$ :2000—2019年各省原煤生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{原油}$ :2000—2019年各省原油生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{天然气}$ :2000—2019年各省天然气生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量; $\Delta UI_{火电}$ :2000—2019年各省火电生产蓝水足迹变化引发的不平衡指数变化量

最大且产量最高的第一大作物<sup>[41]</sup>;2)小麦播种难度大,管理耗时费力,且较经济作物比较效益低,导致大量弃播和休耕<sup>[42]</sup>;3)小麦生长过程需水量大,生育期总需水量约为260—400 m<sup>3</sup>,而玉米种植以雨养为主,生育期总需水量约为200—300 m<sup>3</sup>,在以水定产和地下水可持续利用的目标导向下,小麦种植比例有所减少,玉米种植比例增加<sup>[43]</sup>。

就各能源类型对能-水不平衡指数的贡献而言,除黑龙江和河北受多种能源共同影响外,其他地区的错配变化由火电主导。具体来说,黑龙江不平衡指数的降低主要来源于三种能源的减产,贡献值由高到低排序分别为:原油(-0.040)>火电(-0.026)>原煤(-0.010),对能-水不平衡指数变化量的贡献率分别为39.9%、25.5%和10.1%。而河北原煤生产结构效应贡献较大,不平衡指数降幅为-0.012;火电次之。与前文的分析相似,研究期间火电生产空间布局发生重大改变,大致为东北、京冀和华东的江浙沪地区火电产生的蓝水足迹占比下降,西部的晋陕蒙、新宁和华东的鲁皖赣地区蓝水足迹占比增加。其中,山东和内蒙古由火电生产规模变化引发的不平衡指数增幅最大,达0.032;新疆次之,为0.024。不平衡指数降幅最大发生在黑龙江,江浙沪地区不平衡指数平均减少值为-0.016左右。这进一步印证了火电行业西移给西北缺水地区水资源可持续利用和水安全带来的挑战。

### 3 结论与建议

#### 3.1 主要结论

(1) 因用水数量、结构、方式以及水资源丰裕程度的差异,粮食、能源与水资源的适配格局呈现不同变化趋势,且能源生产与水资源的空间错配程度更为严重。具体而言,研究期间粮-水基尼系数维持在 0.35 左右,而能-水基尼系数呈现 U 型对称变化( $G=0.43-0.62$ )。各粮食作物和能源中,水密集型作物如水稻的适配程度最高,小麦、玉米、原煤、火电等适配表现较差。

(2) 粮食、能源与水资源错配区域均呈现“北 I 型、南 II 型”的分布格局,2000—2019 年间, I 型错配省份均由北部、东部沿海向西部地区扩展。就分省粮-水适配情况来说,由于种植面积的萎缩,长江流域以南地区普遍呈现 II 型错配。在能-水适配方面,黑龙江由强- I 型错配转为轻- II 型错配,而内蒙古由适配状态转为中- I 型错配。

(3) 水资源禀赋变化和稻谷种植规模北移共同驱动粮食与水资源空间错配格局的变化。云南水资源减量主导其 II 型错配减缓,黑龙江水资源量增加基本抵消稻谷生产规模扩大对 I 型错配的深化作用,华南、湖南、浙江等地水资源量增加和稻谷生产规模下降共同驱动该地区 II 型错配发生。对能-水错配的驱动因素而言,火电空间布局及其蓝水足迹的西移起到决定性作用,其中,内蒙古、山东和新疆的错配增强效应更显著。此外,黑龙江能-水错配的转型还受原油减产影响较大。

(4) 粮食作物的空间布局及其蓝水足迹与水资源的适配关系主要由自然属性、经济效益和农业扶持政策决定;而能源与水资源的适配关系主要受资源禀赋、区域经济差异和环境政策影响。

#### 3.2 政策建议

上述研究结果表明,中国水-能源-粮食资源错配矛盾广泛存在,尤其是北方 I 型错配矛盾的深化加剧了该地区水资源短缺问题,严重威胁着水、能源和粮食安全。国家通过“南水北调”工程来实现水资源的再分配,虽然在一定程度上缓解了北方缺水地区的供水压力,但这种战略性工程项目也必然伴随着一些社会-经济-环境问题,如受水区饮水成本增加、沿线区域水生态环境受损等。与此同时,“北粮南运”、“北煤南运”等工程又将蕴含在商品中的虚拟水源不断地从我国北部缺水地区输送至水资源丰富的南部地区。区域间直接水资源和虚拟水资源的反向流动,造成了人力、财力和能源的大量浪费。因此,寻求更高效、低成本的绿色发展途径,才是缓解我国资源错配现状,实现水-能源-粮食可持续发展的重点。

首先,强化产业总体规划指导,优化空间布局。坚持以水定产,以区域水资源作为最大刚性约束,在统筹考虑水资源、水生态、土地、能源资源禀赋等本底条件和区域经济发展优势下,通过政策鼓励、市场改革等方式从宏观层面调整我国粮食-能源产业布局,优化其水资源产业配置。事实上,相关政策文件也强调了产业发展应与资源环境承载力相匹配。如农业部发布的纲领性文件《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》指出优化农业生产布局应坚守耕地红线、水资源红线和生态保护红线,在水土资源匹配较好地区稳定发展优势农业,在资源过渡利用地区调整结构、适度休养。国家能源局制定的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》、《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020 年)》等文件对主要能源生产领域的用水效率设定目标值,并强调了结合生态环境和水资源承载力调整能源产业布局的必要性。

其次,加快推进产业结构调整,不断提升用水效率。在粮食生产方面,如黑龙江、新疆、山东、江苏等 I 型错配区域,加快建设以节水技术进步为核心的现代化农业水资源精细化管理体系,开发并普及非常规节水灌溉方式,稳定粮食产量的同时进一步提高粮食灌溉水生产率;南方地区,尤其西南、华南等耕地资源较丰富的地区,积极开发水田资源潜力,发展冬季优势农业,建立完善包含技术支持、种粮补贴、奖励制度等在内的政策保障体系,提升农业种植经济效益,调动农民种粮积极性。同时积极响应国家退林、退塘、退宅还耕政策,严格禁止耕地非农化非粮化,并完善配套补偿措施。就能源而言,在碳达峰、碳中和战略的推动下,西北和华北地区应积极发展陆上风电、光伏等可再生能源,逐渐降低煤炭、石油等化石能源生产规模;华东和华南等沿海地

区应逐步推进火电退出,并发挥自身优势开发海上风资源;西南地区大力发展天然气及水电等。在能源转型过渡期,针对能-水矛盾突出地区的能源节水工作也刻不容缓。如山西、内蒙古、山东和江苏等火电产业发达、I型错配显著的省份,应该实行更严格的火电行业取水定额管理制度,设定能源取水总量上限,严惩超计划超许可取水行为。

第三,加强区域合作,实现优势互补。如积极响应国家关于建立和完善水权交易制度的指示,在宁夏、山西、河北、河南等水资源缺乏地区推进水权改革,探索开展多种形式的水权交易,运用市场机制合理配置水资源、推进水资源高效利用。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Hoff H. Understanding the Nexus Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water Energy and Food Security Nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [ 2 ] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture. Rome: FAO, 2020.
- [ 3 ] International Energy Agency. World Energy Outlook 2016. Paris: IEA, 2016.
- [ 4 ] Liu J G, Yang W. Water Sustainability for China and Beyond. *Science*, 2012, 337(6095): 649-650.
- [ 5 ] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Water-Energy-Food Nexus: A new Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture. Rome: FAO, 2014.
- [ 6 ] Zhao X, Liu J G, Liu Q Y, Tillotson M R, Guan D B, Hubacek K. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [ 7 ] 支彦玲, 陈军飞, 王慧敏, 刘钢, 朱外明. 共生视角下中国区域“水-能源-粮食”复合系统适配性评估. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 129-139.
- [ 8 ] 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. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 120-128.
- [ 9 ] Mohammadpour P, Mahjabin T, Fernandez J, Grady C. From national indices to regional action—An Analysis of food, energy, water security in Ecuador, Bolivia, and Peru. *Environmental Science & Policy*, 2019, 101: 291-301.
- [ 10 ] Sun C Z, Yan X D, Zhao L S. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water-energy-food nexus in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105151.
- [ 11 ] Han D N, Yu D Y, Cao Q. Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119379.
- [ 12 ] Ibrahim M D, Ferreira D C, Daneshvar S, Marques R C. Transnational resource generativity: efficiency analysis and target setting of water, energy, land, and food nexus for OECD countries. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134017.
- [ 13 ] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析. *地理科学*, 2018, 38(10): 1653-1660.
- [ 14 ] Deng C Y, Wang H R, Gong S X, Zhang J, Yang B, Zhao Z Y. Effects of urbanization on food-energy-water systems in mega-urban regions: a case study of the Bohai MUR, China. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(4): 044014.
- [ 15 ] Wang Q, Li S Q, He G, Li R R, Wang X F. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1097-1106.
- [ 16 ] 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. *水资源保护*, 2018, 34(5): 1-8.
- [ 17 ] 盖美, 翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展. *生态学报*, 2021, 41(12): 4746-4756.
- [ 18 ] Ma T, Sun S A, Fu G T, Hall J W, Ni Y, He L H, Yi J W, Zhao N, Du Y Y, Pei T, Cheng W M, Song C, Fang C L, Zhou C H. Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-9.
- [ 19 ] 杨鑫, 穆月英. 中国粮食生产与水资源的时空匹配格局. *华南农业大学学报: 社会科学版*, 2019, 18(4): 91-100.
- [ 20 ] Li T T, Long H L, Zhang Y N, Tu S S, Ge D Z, Li Y R, Hu B Q. Analysis of the spatial mismatch of grain production and farmland resources in China based on the potential crop rotation system. *Land Use Policy*, 2017, 60: 26-36.
- [ 21 ] 许长新, 林剑婷, 宋敏. 水土匹配、空间效应及区域农业经济增长——基于中国 2003—2013 的经验分析. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(7): 153-158.
- [ 22 ] Liu D, Liu C L, Fu Q, Li M, Faiz M A, Khan M I, Li T X, Cui S. Construction and application of a refined index for measuring the regional matching characteristics between water and land resources. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 203-211.
- [ 23 ] Zhang C, Zhong L J, Wang J. Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 2018, 3(9):

792-799.

- [24] 刘欢, 贾仰文, 牛存稳. 区域水-能源资源的空间分布特征及匹配格局分析. 水电能源科学, 2017, 35(6): 127-131, 158.
- [25] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系. 资源科学, 2019, 41(11): 2008-2019.
- [26] 董东林, 张若萌, 付晶莹, 林刚. 中国能源生产用水的空间特征分析. 科技导报, 2019, 37(11): 92-100.
- [27] Zhang C, Zhong L J, Fu X T, Wang J, Wu Z X. Revealing water stress by the thermal power industry in China based on a high spatial resolution water withdrawal and consumption inventory. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(4): 1642-1652.
- [28] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 35-48.
- [29] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 186-203.
- [30] Sun S K, Wu P T, Wang Y B, Zhao X N, Liu J, Zhang X H. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 498-507.
- [31] Hua E, Wang X Y, Engel B A, Sun S K, Wang Y B. The competitive relationship between food and energy production for water in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119103.
- [32] 黄和平. 基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究. 生态学报, 2012, 32(20): 6431-6439.
- [33] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 夏军. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.
- [34] 李明辉, 周玉玺, 周林, 杨洁, 王盈桦. 中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析. 中国农业资源与区划, 2015, 36(5): 7-15.
- [35] 陈雨生, 江一帆, 张琪. 中国大豆生产格局变化及其影响因素. 经济地理, 2022, 42(3): 87-94.
- [36] 杨丹, 朱满德. 我国大豆生产格局与区域比较优势演变探析. 国土与自然资源研究, 2020(1): 58-64.
- [37] 杨亚东, 胡韵菲, 栗欣如, 马力阳, 王道龙, 罗其友. 中国马铃薯种植空间格局演变及其驱动因素分析. 农业技术经济, 2017(8): 39-47.
- [38] 潘荔, 刘志强, 张博. 中国火电节水现状分析及措施建议. 中国电力, 2017, 50(11): 158-163.
- [39] 陆咏晴, 严岩, 丁丁, 赵春黎, 宋扬, 赵景柱. 我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响. 生态学报, 2018, 38(4): 1470-1477.
- [40] 杨万江, 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析. 经济地理, 2011, 31(12): 2086-2093.
- [41] 杨艳昭, 梁玉斌, 封志明, 杨玲. 中国玉米生产消费的时空格局及供需平衡态势. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 817-823.
- [42] 张丛, 沈彦俊, 裴宏伟, 庞珊珊. 中国北方地区粮食生产格局的时空变化特征. 湖北农业科学, 2015, 54(8): 2041-2045.
- [43] 任频频, 李保国, 黄峰. 农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局. 资源科学, 2022, 44(3): 436-449.