

淮河流域土地与水资源利用效率耦合 协调及其时空分异

何刚, 张世玉, 鲍珂宇, 杨霞, 侯小宇

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 科学评价淮河流域土地资源与水资源利用效率, 明晰两者间耦合协调程度及其空间分异特征, 为提高该流域土地资源与水资源利用效率, 促进水土资源良性协调发展提供理论参考。[方法] 利用 Super-SBM 模型测算淮河流域 30 个市土地与水资源利用效率, 构建耦合协调度模型, 探讨两者协调发展情况, 采用标准差椭圆和 Dagum 基尼系数法, 分析两者耦合协调度的空间偏移程度及空间分异来源。[结果] ①研究期内, 淮河流域土地与水资源利用效率均呈波动上升趋势, 空间异质性显著。②2011—2014 年, 两者耦合协调度整体处于勉强协调阶段, 2015—2020 年, 基本处于初级协调及中级协调阶段, 均以水资源利用效率滞后为主, 逐渐呈现“东西部高, 中部低”的空间格局。③淮河流域西北和东南方向城市的土地与水资源利用效率耦合协调度的增速较快, 且存在强弱交替现象。④两者耦合协调度总体差异呈下降趋势, 空间分异主要来源于超变密度, 其次为地区间分异。[结论] 淮河流域城市土地资源与水资源利用效率不高, 耦合协调度也较低, 各城市应加强水土资源的高效集约利用, 提高两者间耦合协调度, 为实行区域差异化资源开发战略提供决策依据。

关键词: 土地资源; 水资源; 耦合协调; 标准差椭圆; Dagum 基尼系数; 淮河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0283-11

中图分类号: F124.5

文献参数: 何刚, 张世玉, 鲍珂宇, 等. 淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调及其时空分异[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 283-293. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.034; He Gang, Zhang Shiyu, Bao Keyu, et al. Coupled coordination of land and water use efficiency in Huaihe River basin and its spatial and temporal divergence [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 283-293.

Coupled Coordination of Land and Water Use Efficiency in Huaihe River Basin and Its Spatial and Temporal Divergence

He Gang, Zhang Shiyu, Bao Keyu, Yang Xia, Hou Xiaoyu

(School of Economics and Management, Anhui

University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] The utilization efficiency of land and water resources in the Huaihe River basin was evaluated to clarify the degree of coupling and coordination between the two and their spatial differentiation characteristics, in order to provide a theoretical reference for improving the utilization efficiency of land and water resources and promoting the benign and coordinated development of land and water resources in the basin. [Methods] The Super-SBM model was used to measure the land and water resource utilization efficiencies of 30 cities in the Huaihe River basin. The coupling coordination degree model was constructed to discuss the coordinated development of the two. The standard deviation ellipse and the Dagum Gini coefficient method were used to analyze the spatial deviation degree and spatial differentiation source of the coupled coordination degree. [Results] ① During the study period, the utilization efficiency of land and water resources in the Huaihe River basin showed a fluctuating upward trend, and the spatial heterogeneity was significant.

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2022-12-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“淮河流域水生态风险时空演化、预警及动态响应机制研究”(72271005); 教育部人文社科规划项目(22YJAZH025); 安徽理工大学研究生基金项目(2022CX2151); 2022年度安徽省科研编制计划项目(2022AH050795)

第一作者: 何刚(1966—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态安全评价与预警等方面的研究。Email: hgang0111@163.com。

通讯作者: 张世玉(1999—), 女(汉族), 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态安全。Email: shiyu990814@163.com。

② From 2011 to 2014, the degree of coupling and coordination between the two factors was in the barely coordinated stage. From 2015 to 2020, the degree of coupling and coordination was basically in the primary coordination and intermediate coordination stage, both of which were dominated by the lag of water resource utilization efficiency. A spatial pattern of “higher in the east and west, and lower in the middle” was gradually presented. ③ The coupling and coordination degree of land and water resource utilization efficiency in the northwest and southeast cities of the Huaihe River basin increased rapidly, and there was a phenomenon of strong and weak alternation. ④ The overall difference of the coupling coordination degree between the two showed a downward trend, and the spatial differentiation mainly came from the hypervariable density, followed by regional differentiation. [Conclusion] The utilization efficiencies of urban land resources and water resources in the Huaihe River basin were not high, and the coupling coordination degree was also low. Cities should strengthen the efficient and intensive use of water and land resources, improve the coupling coordination degree between the two, and provide a decision-making basis for the implementation of differentiated resource development strategies in various regions.

Keywords: land resources; water resources; coupled coordination; standard deviation ellipse; Dagum Gini coefficient; Huaihe River basin

土地资源和水资源是维持生物多样性、生态平衡和社会经济发展的基础。土地开发利用会增加区域用水量,改变水循环过程,影响水环境系统的健康;水资源总量和分布会影响地区人口经济的发展,关系到城市土地资源建设规划,水资源污染则会渗透地面土壤,造成植物多样性减少、土壤资源退化等问题。面对日益增长的水土资源需求和水土资源关系的严峻形势,国家出台了“三条红线”在内的最严格的水资源管理制度,指出要坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”原则,推动水资源从粗放使用到集约利用^[1]。《国土资源“十三五”规划纲要》中也指明,要治理城市土地低效利用现象,并提出总量和强度“双控”措施,加强建设用地的管控^[2]。因此,急需科学评价土地资源与水资源利用效率,厘清两者的耦合协调关系及空间分异特征,建立健全土地与水资源协同开发利用机制,促进区域间的深化合作与联动。

目前,中国关于土地资源与水资源利用效率的研究主要集中在 3 个方面。第一是效率测度方面,早期主要从单一要素出发,利用比值法测算中国工业用水效率^[3],但通常会忽视其他经济社会要素投入的贡献^[4],为解决这一问题,王竞优等^[5]、李莉等^[6]、Le N. T.等^[7]采用考虑多个投入与产出要素的数据包络分析方法(DEA),研究了不同区域、不同行业的水资源利用效率及其空间分布,马琳^[8]、汪险生等^[9]、Alsharif等^[10]利用 DEA 方法研究了不同类型的土地利用效率和效益。但是单一的 DEA 方法不能反映投入产出的松弛改善以及效率的动态变化。石天戈等^[11]基于非期望产出的网络 DEA 模型,测度了中国省域水资源综合效率,研究发现中国水资源的生产

效率高于治理效率;施建刚等^[12]利用 VRS-DEA 模型和 Malmquist 指数对长三角城市群工业园的土地利用效率进行分解,定量分析投入产出要素的改善潜力。第二是影响因素研究,已有文献围绕科技创新水平、GDP 值、工业用水量、产业结构等影响因素展开了研究^[13-14]。陈艳萍等^[15]提出 Shephard 水资源距离函数,认为经济发展水平与水资源利用效率呈正相关,水资源禀赋、城镇化水平等与水资源利用效率呈负相关;刘玉杰等^[16]利用空间面板回归模型,从劳动力、资本等方面探究了中国农业资源效率的影响因素。第三是其他要素与土地资源、水资源利用效率之间的耦合关系。何莎莎等^[17]测算并分析了江苏省土地利用效率和高质量发展水平之间的时空交互响应关系,认为两者之间耦合协调度逐年增长;Liu Gang等^[18]为了优化水资源配置,评估了土地、人口和经济因素对水资源配置的影响。除此之外,还有不少学者研究土地资源、水资源与粮食、能源、产业、生态环境等要素间的关系^[19-20]。但现有研究多集中于全国、黄河流域、长江经济带等区域,较少涉及到淮河流域研究。研究内容大多集中于土地资源或水资源的单一要素的效率测算与评估,或是考虑能源、经济、社会等要素与水土资源之间的耦合作用关系,较少研究土地资源与水资源利用效率之间的交互关系。鉴于此,本文利用 Super-SBM 模型测算了淮河流域 30 个市 2011—2020 年的土地资源与水资源利用效率;构建耦合协调度模型研究土地资源与水资源利用效率耦合协调度;利用标准差椭圆分析水土资源利用效率耦合协调度的空间偏移程度和速度;采用 Dagum 基尼系数多维度解析水土资源利用效率耦合协调度的空间分异来源,为淮河流域提高土地资源与水资源

利用效率、促进水土资源良性协调发展提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

淮河流域位于中国东部,介于长江和黄河流域之间,流经湖北、河南、安徽、山东、江苏5个省份,全长约1 000 km,面积为 $2.70 \times 10^5 \text{ km}^2$,多年平均总水资源量约 $7.94 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。根据全国公告的第二次水土流失遥感资料 and 实际调查情况,淮河流域水土流失总面积为 $4.14 \times 10^4 \text{ km}^2$,占流域面积的12.44%,多年平均土壤侵蚀量 $1.58 \times 10^8 \text{ t}$ (计算面积 $2.01 \times 10^5 \text{ km}^2$),耕地面积不断减少,土地生产力持续破坏。此外,淮河流域是中国十分重要的粮食生产基地,人均水资源量仅为全国的1/5,流域内耕地平均化肥施用强度为 776.6 kg/hm^2 ,远高于中国生态乡镇建设制定的化肥施用强度上限标准。受投资不足,治理成本增加等影响,土地资源和水资源治理进度缓慢,水土保持生态环境建设形势十分不利。考虑数据的可获取性和研究工作的方便,未研究湖北省的3个县,以及只有不足1/2的面积隶属淮河流域的洛阳市、南阳市、安庆市、合肥市、南京市、镇江市、淄博市、泰安市8个地级市,仅对淮河流域的河南、安徽、江苏以及山东的30个地级市展开研究。

1.2 数据来源

本研究使用的统计数据来自于2010—2021年《中国城市统计年鉴》,2010—2021年各城市统计年鉴,2010—2021年各城市《水资源统计公报》,部分缺失数据,采用插值法补充完整。淮河流域的遥感影像数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.Resde.cn>),选取2020年分辨率为15 m的Landsat 8遥感影像,坐标统一为Albers投影。根据土地资源属性分为25个类型,淮河流域不存在戈壁,故为24种土地利用类型。

2 指标体系构建与研究方法

2.1 指标体系构建

土地资源与水资源的利用效率评价需考虑投入和产出变量,参考以往的研究成果^[21-22],结合淮河流域实际情况,基于数据可获取性和指标科学性,构建淮河流域土地资源和水资源利用效率的投入产出指标体系(表1)。在投入方面,建设用地面积作为土地资源的物质投入,农业用水量、工业用水量、生活用水量作为水资源的物质投入,年末就业人口和全社会固定资产投资总额作为两者的劳动力投入和资本投入。

在产出方面,包含经济产出、社会产出、环境效益产出。采用GDP、城镇居民可支配收入作为经济产出和社会效益产出,对于环境效益产出,土地资源采用建设区绿化覆盖面积,水资源采用污水处理率。

表1 淮河流域土地资源和水资源利用效率评价指标
Table 1 Evaluation indicators of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin

目标层	指标分类	指标构成
土地资源利用效率	投入	建设用地面积/ km^2
		年末就业人口数/万人
	产出	全社会固定资产投资总额/亿元
		GDP/亿元
水资源利用效率	投入	城镇居民可支配收入/元
		建成区绿化覆盖面积/ km^2
		农业用水量/ 10^4 m^3
	产出	工业用水量/ 10^4 m^3
		生活用水量/ 10^4 m^3
		污水处理率/%

2.2 研究方法

2.2.1 Super-SBM模型 Tone^[23]提出了Super-SBM模型,充分考虑了投入和产出的松弛问题,是非径向非角度的效率度量方法,可以解决有效单元的排序问题。本研究采用Super-SBM模型对研究对象进行分析,避免投入产出的松弛问题,而且对效率值为1的决策单元,用线性组合代替效率评价的决策单元,允许有效决策单元效率大于1,实现对有效决策单元的排序。计算公式为:

$$\min E = \frac{1 + 1/m \sum_{i=1}^m (s_i^- / x_{ik})}{1 - 1/s \sum_{r=1}^s (s_r^+ / y_{rk})} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \leq y_{rk} \\ \lambda, s^-, s^+ \leq 0 \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j = 1 \\ [i=1, 2 \dots m; \quad r=1, 2 \dots s; \\ j=1, 2 \dots n \quad (j \neq k)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为决策单元(DMU)的效率; x, y 分别作为投入和产出; m, s 为投入和产出的指标数量。 λ 为

DMU 的线性组合系数; x_{ij}, x_{ik} 分别为第 j, k 个 DMU 的第 i 种投入值; y_{rj}, y_{rk} 分别为第 j, k 个 DMU 的第 r 种产出值; s_i^-, s_r^+ 为第 i 种投入和第 r 种产出的松弛变量。

2.2.2 耦合协调度 耦合度源于物理学概念,指两个或两个以上的实体相互依赖于对方的程度,后来被引入地理、社会、经济等研究领域^[24]。协调度能够反映系统要素之间的协同效应和平衡状态。基于此,本文参考已有研究,构建了土地资源利用效率—水资源利用效率耦合协调度模型,表征二者的交互作用及协调发展水平。具体计算公式为:

$$C = \sqrt{\frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)^2}} \quad (3)$$

式中: U_1, U_2 分别为土地利用效率和水资源利用效

率; C 为耦合度,取值范围 $[0, 1]$, C 值越高,说明两者相互作用越强。

$$T = aU_1 + bU_2 \quad (4)$$

式中: T 是综合协调指数, a, b 为待定系数, $a + b = 1$, 本文研究的是土地资源与水资源两系统间的耦合协调关系,为保证两者在统计计量中的“对等”(平等)关系,取 $a = b = 0.5$ 。

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (5)$$

式中: D 为耦合协调度, $D = [0, 1]$, D 值越大说明两者关系越协调。

根据淮河流域土地与水资源现状及其他学者的研究^[25-26],将土地与水资源利用效率耦合协调度划分成 10 个阶段,每个阶段按照两者之差又分为 3 个类型(表 2)。

表 2 土地与水资源利用效率耦合协调度等级划分标准

Table 2 Criteria for dividing coupling coordination level of land and water use efficiency

耦合协调等级	区间范围	耦合协调等级	区间范围
极度失调(I)	$0.00 \leq D < 0.10$	勉强协调(VI)	$0.50 \leq D < 0.60$
严重失调(II)	$0.10 \leq D < 0.20$	初级协调(VII)	$0.60 \leq D < 0.70$
中度失调(III)	$0.20 \leq D < 0.30$	中级协调(VIII)	$0.70 \leq D < 0.80$
轻度失调(IV)	$0.30 \leq D < 0.40$	良性协调(IX)	$0.80 \leq D < 0.90$
濒临失调(V)	$0.40 \leq D < 0.50$	优质协调(X)	$0.90 \leq D < 1.00$
	$U_2 - U_1 > 0.1$		土地资源利用效率滞后
	$U_1 - U_2 < 0.1$		水资源利用效率滞后
	$ U_2 - U_1 \leq 0.1$		同步

2.2.3 标准差椭圆 该模型最早由 Lefever 在 1926 年提出^[27],通过定量分析点要素空间分布特征,构建地理要素的空间分布椭圆,揭示地理要素的空间关系,诸多领域将其作为一种地理空间描述性探索的方法广泛应用^[28]。这种方法同时适用于在时间变化上进行描述性分析和空间分布变化的比较。主要包括椭圆重心坐标、长轴与短轴、旋转角 4 个要素,计算公式为:

$$\tan\theta = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 \tilde{y}_i^2} \right]}{2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 \tilde{y}_i^2} \quad (9)$$

式中: (x_i, y_i) 代表淮河流域 30 个市对象的空间区位; ω_i 代表对应权重; $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 代表各研究对象区位到重心 (X, Y) 的坐标偏差; σ_x, σ_y 分别代表沿 x 轴和 y 轴的标准差; θ 代表椭圆方位角。

2.2.4 Dagum 基尼系数分解方法 该方法是由 Dagum 提出的一种基尼系数分解方法,能够有效解决样本之间相互重叠的问题。一般在计算所有子群

$$\text{坐标: } X = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \cos\theta - \omega_i \tilde{y}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \sin\theta - \omega_i \tilde{y}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \quad (8)$$

总体基尼系数 G 的基础上,将空间差异基尼系数 G 分解为 3 个部分:地区内空间差异对 G 的贡献(G_w),地区间空间差异对 G 的贡献(G_{nb}),地区间组间(超变密度)差异对 G 的贡献(G_t),三者满足 $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。具体计算公式为^[29]:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^2 u} \quad (10)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} p_j s_j \quad (11)$$

$$G_{jj} = \frac{1}{2u_j} \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{jr}|}{n_j^2} \quad (12)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_j + p_h s_h) D_{jh} \quad (13)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (u_j + u_h)} \quad (14)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) (1 - D_{jh}) \quad (15)$$

$$D_{jh} = \frac{d_{jh} - p_{jh}}{d_{jh} + p_{jh}} \quad (16)$$

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \quad (17)$$

$$p_{jh} = \int_0^{\infty} dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x) \quad (18)$$

式中: n 为淮河流域城市的数量; k 为子群数量, 在本文中分别为河南段、安徽段、江苏段、山东段; n_j (n_h) 为 j (h) 某个子群内城市的数量; j 和 h 为子群划分个数, i 和 r 为子群内城市的个数; G 为总体基尼系数; y_{ji} (y_{hr}) 为 j (h) 分区内各城市土地资源与水资源利用效率耦合协调度; u 为各城市土地资源与水资源利用效率耦合协调度的均值; G_{jj} 为子群 j 土地资源与水资源利用效率耦合协调度的基尼系数; u_j (u_h) 为子群 j (h) 土地资源与水资源利用效率耦合协调度的平均值; G_{jh} 为子群 j 和 h 之间的基尼系数; $p_j = n_j/n$ 为子群 j 地级市数与淮河流域总地级市数的比值; $s_i = n_i u_i / nu$; D_{jh} 为 j 子群和 h 子群间的土地资源和水资源利用效率的耦合协调度的相互影响;

d_{jh} 可视为 j 和 h 子群中满足 $y_{ji} - y_{hr} > 0$ 条件的所有样本值之和的数学期望; p_{jh} 可视为 j 和 h 子群中所有 $y_{hr} - y_{ji} > 0$ 样本值之和的数学期望; $F_j(y)$, $F_h(y)$ 为 j, h 子群的累积密度分布函数。

3 结果与分析

3.1 淮河流域土地和水资源利用效率测度结果及分析

为探究淮河流域土地和水资源利用效率的时空发展特征, 利用 DEA-Solver 5.0 中规模报酬可变的非径向超效率 SBM 模型, 测算淮河流域土地资源和土地资源利用效率, 结果详见表 3。由表 3 可知, 研究期内, 淮河流域土地利用效率总体水平不高, 平均水平仅达到 0.747, 改善空间较大。2011—2020 年, 各省土地利用效率均值排序为: 安徽段(0.770) > 河南段(0.762) > 江苏段(0.736) > 山东段(0.698), 安徽段土地利用效率均值虽位居第一, 但总体呈现下降趋势。江苏段土地利用效率增长幅度最大, 达 32.16%。其中, 徐州土地利用效率大幅下降了 43.10%, 主要原因是徐州作为老工业城市和资源型城市, 长期大规模、高强度的矿山开采造成了耕地损毁、山体破损等一系列问题。河南段总体土地利用效率上升 16.95%, 仅信阳、周口分别小幅度下降 8.10%, 3.46%。山东段总体土地利用效率上升 23.49%, 各市均处于上升趋势, 其中济宁土地利用效率提高幅度最大, 达 50.63%。这说明江苏和山东地区能够在提高土地利用效率方面给予安徽和河南地区更多的经验借鉴。

表 3 淮河流域 2011—2020 年土地资源、水资源利用效率

Table 3 Utilization efficiency of land and water resources in Huaihe River basin from 2011 to 2020

年份	土地资源利用效率					水资源利用效率				
	河南段 均值	安徽段 均值	江苏段 均值	山东段 均值	淮河流域 均值	河南段 均值	安徽段 均值	江苏段 均值	山东段 均值	淮河流域 均值
2011	0.767	0.888	0.709	0.694	0.772	0.615	0.775	0.512	0.836	0.667
2012	0.731	0.775	0.710	0.678	0.728	0.587	0.653	0.731	0.715	0.665
2013	1.062	0.759	0.646	0.641	0.800	0.871	0.730	0.512	0.681	0.616
2014	0.699	0.725	0.646	0.651	0.684	0.635	0.691	0.527	0.699	0.632
2015	0.716	0.716	0.652	0.659	0.689	0.647	0.654	0.564	0.689	0.634
2016	0.729	0.714	0.669	0.647	0.695	0.747	0.574	0.590	0.688	0.649
2017	0.744	0.770	0.702	0.679	0.729	0.724	0.634	0.652	0.744	0.684
2018	0.729	0.751	0.818	0.707	0.755	0.603	0.682	0.729	0.735	0.680
2019	0.768	0.764	0.879	0.764	0.795	0.747	0.651	0.835	0.877	0.766
2020	0.897	0.842	0.937	0.857	0.886	0.806	0.767	0.944	0.903	0.848

淮河流域水资源利用效率整体呈现波动上升趋势, 但处于较低水平。2011—2015 年, 各市水资源利用效率波动下降, 2016—2020 年呈现波动上升趋势, 平

均效率达 0.848, 逐渐接近有效状态。2011—2020 年, 江苏段水资源利用效率增长幅度最大, 达 84.38%, 高于淮河流域的平均水平。具体来看, 2011 年江苏段

8个城市水资源利用效率相对较低,盐城甚至仅为0.371。2020年江苏段8个城市已有半数水资源利用效率达到有效,其主要原因是南水北调东线工程通过统筹调配江水、淮水及沂沭泗水,逐步解决了江苏北部及北方各省市的水资源紧张问题,实现了水资源优化调度。2011—2020年,安徽段水资源利用效率呈现明显的W形波动,河南段和山东段的水资源利用效率均稳定上升。未来发展中应大力发展节水教育,积极进行环境治理,促进水资源高效利用,实现水资源可持续利用。

3.2 淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度分析

3.2.1 时空动态演进 根据公式(3)—(5)计算出淮

河流域土地与水资源利用效率耦合协调度,将各地区耦合协调类型按照表2划分。

由表4(部分等级的隶属城市个数为0,不予展示)可以看出,2011—2014年,淮河流域土地资源利用效率耦合度值整体处于勉强协调阶段,2015—2020年,基本处于初级协调及中级协调阶段,土地与水资源利用效率之间相互影响程度逐步深化。2011—2014年,淮河流域处于粗放型发展阶段,水资源利用效率均不高。自2014年国家提出“新型城镇化战略”和“创新驱动发展战略”,土地市场逐步回暖,水资源逐渐实现多级、循环利用,土地和水资源利用效率不断提高。

表4 淮河流域2011—2020年土地与水资源利用效率耦合协调度统计结果

Table 4 Statistical result of coupling coordination degree of land and water use efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

协调等级	2011年		2014年		2017年		2020年	
	个数/个	比例/%	个数/个	比例/%	个数/个	比例/%	个数/个	比例/%
濒临失调(V)	2	6.67	3	10.00	1	3.33	0	0.00
勉强协调(VI)	18	60.00	18	60.00	18	60.00	8	26.67
初级协调(VII)	6	20.00	8	26.67	9	30.00	12	40.00
中级协调(VIII)	4	13.33	1	3.33	2	6.67	9	30.00
良性协调(IX)	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	3.33

3.2.2 空间格局演化与问题区域识别 为了更直观地分析淮河流域30市土地和水资源利用效率耦合协调度时空格局,利用ArcGIS 10.8可视化2011,2014,2017和2020年淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度测算结果(图1),结合2011—2020年土地与水资源利用效率的差值大小,进一步揭示各城市土地和水资源利用效率的滞后类型。河南段整体耦合协调发展水平较为均衡且呈现稳步提高趋势,由勉强协调阶段向中级协调阶段过渡,以水资源利用效率滞后为主。从局部来看,2011—2020年,许昌市土地与水资源利用效率耦合协调度增长25%,土地利用效率与水资源利用效率几乎同步,归因于许昌市积极承接郑州航空港、河南自贸区产业辐射和溢出,凭借自身较强的经济、交通优势,产业结构得到优化调整。信阳、周口、商丘三市处于郑州外环,受到省会的辐射效应随着距离的增加逐渐减小,土地与水资源利用效率耦合协调度上升趋势不显著,且水资源利用效率滞后明显,主要是由于这些城市地处淮河平原,属于传统农业区,工业发展基础相对薄弱,经济发展水平偏低,水资源“农转非”程度相对较低^[30]。安徽段耦合协调度水平呈现下降趋势,除淮北外,基本以水资源利用效率滞后为主。主要原因是安徽省耕地面积较多,水

资源相对较少,土地资源分布存在局部不平衡。其中,淮北市土地与水资源利用效率耦合协调度由中级协调发展至良好协调,2011—2018年,土地与水资源利用效率处于同步阶段,2019—2020年,土地资源利用效率滞后,淮北市是典型的煤矿型城市,前期的经济发展造成了建设用地、采煤塌陷区偏多,导致该市土地利用“后遗症”逐渐出现。江苏段耦合协调度整体平稳上升,总体可分成两个阶段:2011—2015年,处于勉强协调—水资源利用效率滞后阶段,2016—2020年,处于初级协调和中级协调阶段,土地资源和水资源利用效率基本保持同步。主要原因是苏北地区灌溉方式粗犷,农业节水技术资金投入不足,耗水量很大。2015年中国颁布了最严格的节水政策,节水理念深入人心,同时江苏省经济发展迅速,带动水循环经济发展,科学规划基础设施建设,提高了土地与水资源的利用效率。山东段耦合协调度虽有所上升,但比较缓慢,由勉强协调阶段发展至初级协调阶段,以土地资源利用效率滞后为主。主要因为山东段5市属于南水北调工程沿线城市,在水利设施管理、水体污染治理和水环境保护等方面加大了力度,提升水资源利用效率,而山东地区的人口增长速度与其基础设施建设不协调,导致土地资源利用效率滞后于水资源利用效率。

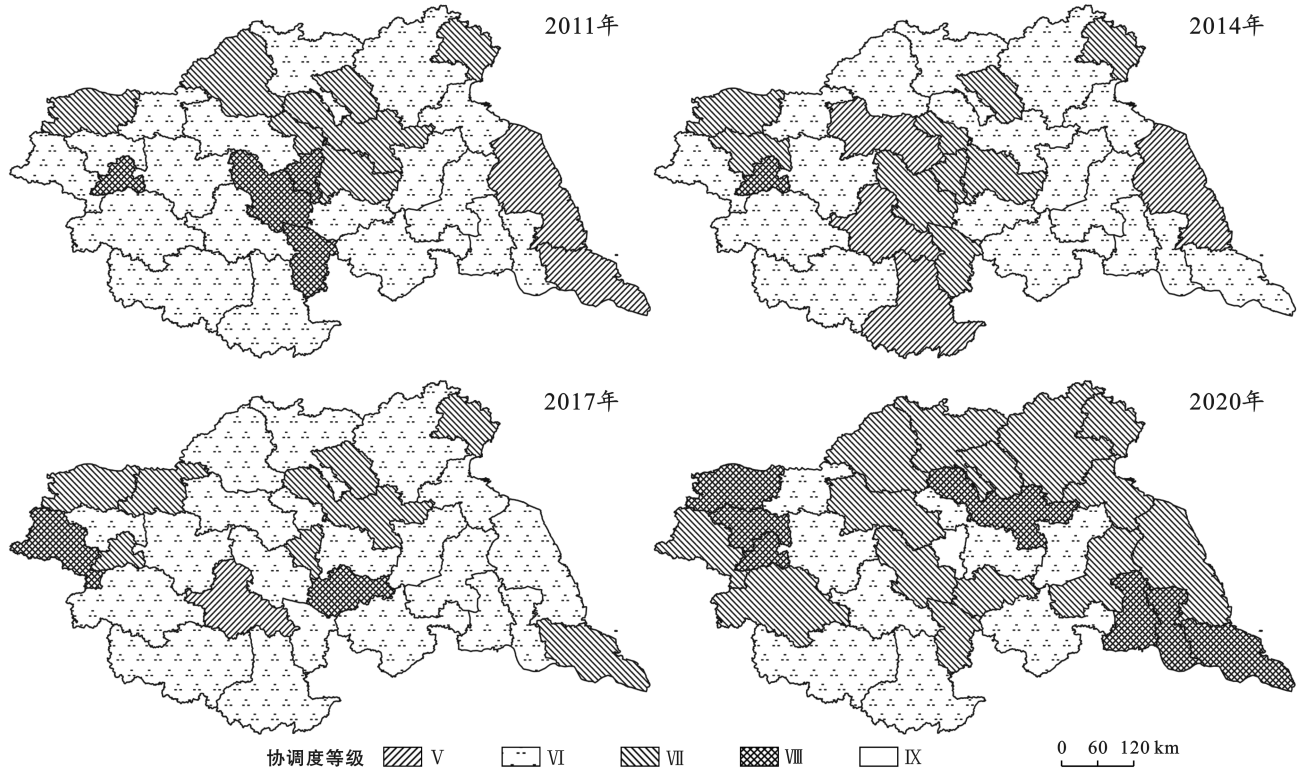


图 1 淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度等级空间分布

Fig.1 Spatial distribution of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin

3.3 淮河流域土地与水资源耦合协调度空间

利用 ArcGIS 10.8 软件,研究 2011—2020 年淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度标准差椭圆的空间变化及重心空间转移,同时计算出

2011—2020 年各椭圆参数(如表 5 所示)。从图 2 椭圆分布形状来看,2011—2020 年,椭圆“东—西”长轴始终大于“南—北”短轴,呈现出明显的“东—西”分布格局。

表 5 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度标准差椭圆参数

Table 5 Standard deviation ellipse parameters of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

年份	重心坐标		长轴/km	短轴/km	方位角/(°)
	经度	纬度			
2011	116°44'52"E	33°43'11"N	276.95	158.79	91.197
2012	116°48'03"E	33°43'15"N	279.50	157.61	91.591
2013	116°44'12"E	33°42'01"N	281.44	158.04	90.710
2014	116°46'14"E	33°42'49"N	282.73	158.39	91.735
2015	116°45'48"E	33°42'57"N	286.05	158.16	91.843
2016	116°44'43"E	33°43'06"N	289.57	158.09	92.139
2017	116°47'19"E	33°42'52"N	287.80	158.14	92.652
2018	116°52'37"E	33°41'32"N	287.40	159.26	93.184
2019	116°52'21"E	33°42'36"N	290.67	158.55	93.448
2020	116°50'57"E	33°41'52"N	289.32	157.83	93.128

椭圆长轴由 276.95 km 增加到 289.32 km,短轴由 158.79 km 缩短到 157.83 km,这表明:研究期内淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度在东西方向上增大,南北方向上减小,且增大的趋势大于减小

的趋势。从方位角来看,方位角经历了“增大—缩小—增大—缩小”的演变过程,研究期内增大了 1.973 度,即位于西北或东南方向的城市耦合协调度增长较快,主要原因是位于西北位的郑州、许昌等市与东南

位的南通、泰州、扬州等市大力发展经济,积极研发和引进节水治污技术和理念,完善交通基础设施、提升土地市场化水平,以提高土地和水资源的利用效率。从重心迁移方向和距离来看,椭圆重心一直位于淮北市内部,2011—2020年呈现“东南→西南→东北→西北→东南→西北”的移动趋势,这表明2011—2012年、2016—2018年东南区域的城市耦合协调度增速大于西北地区,2014—2016年、2018—2020年西北区域的城市耦合协调度增速大于东南地区,东南区域和西北区域的耦合协调度增速存在强弱交替现象。综合来看,2011—2020年重心向东南方向移动,2017—2018

年移动距离最大,达到10.14 km,打破了“西弱东强”的初始格局,究其原因,东部城市依托经济发展的“先发优势”,通过优化产业结构,集约高效利用水资源,深化土地利用改革,实现了耦合协调度的大幅度提高。

3.4 淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度的区域差异及其来源

为了进一步探究淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度空间分异来源及其演变特征,将淮河流域按照省份划分为四段。利用Dagum基尼系数计算出耦合协调度的总体基尼系数、地区内差异、地区间差异和超变密度(如表6所示)。

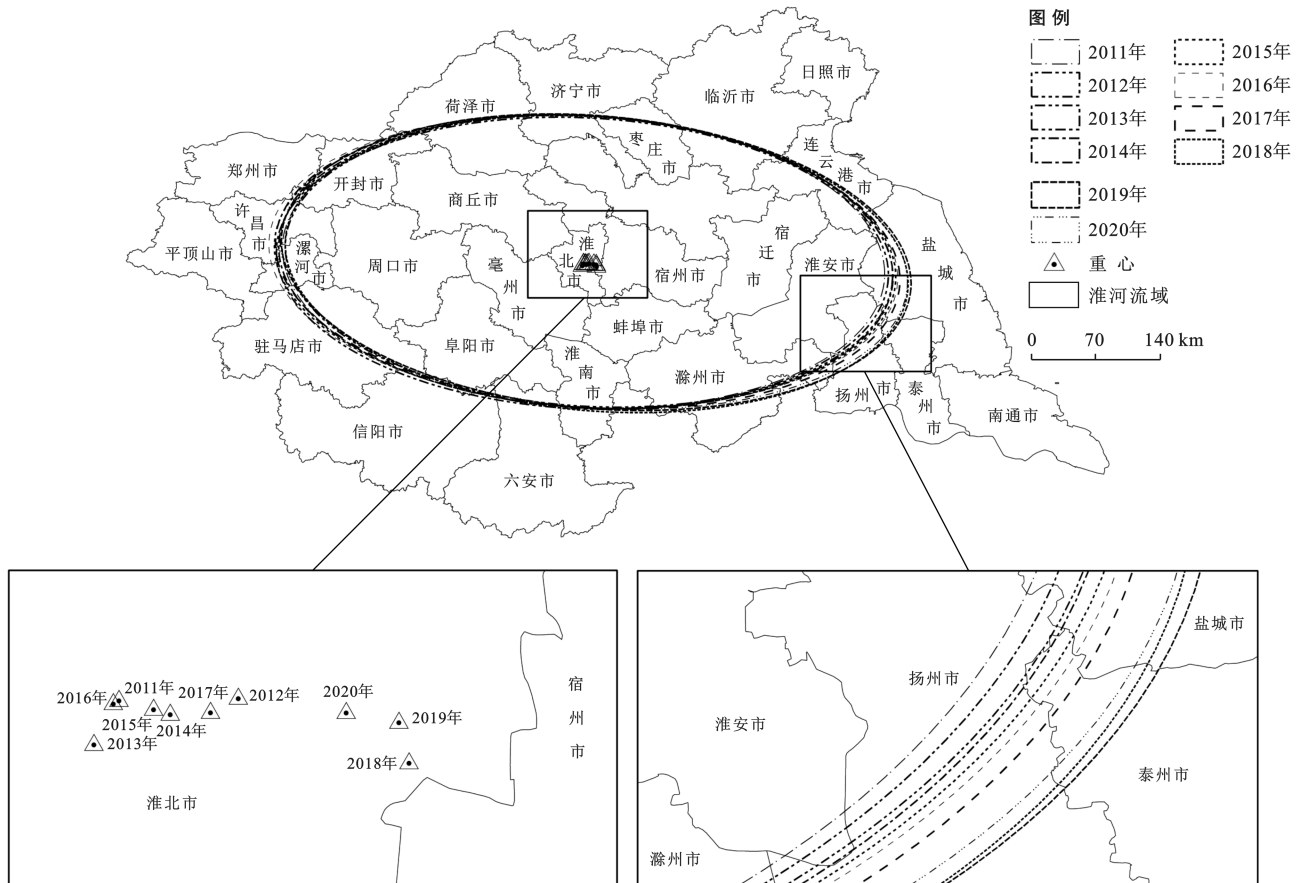


图2 淮河流域2011—2020年土地与水资源利用效率耦合协调度标准差椭圆
Fig.2 Standard deviation ellipse of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

3.4.1 总体区域差异及其演变趋势 图3反映了淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度总体区域差异的演变趋势,从演变过程来看,2011—2020年淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度基尼系数整体呈下降趋势,从2011年的0.068下降到2020年的0.060,下降幅度11.76%。说明随着市域耦合协调度的提高,区域间差异在逐渐减小。

3.4.2 地区内差异及其演变趋势 由图4可以看出,2011—2018年河南段地区内差异波动幅度较大,

2018—2020年比较平缓;2011—2016年安徽段地区内差异波动较为平缓,2016—2020年波动更加显著。江苏段地区内差异呈U形变化,2012年增加到最大值0.083,至2013年断崖式降低73.49%,2014—2020年稳定增长,山东段地区内差异由2011年的0.052阶梯式下降到2020年的0.028。综合来看,4个省份地区内差距年均值排序为:河南段(0.066) > 安徽段(0.065) > 山东段(0.042) > 江苏段(0.038),河南段耦合协调度地区内分异程度占主导地位。

表 6 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度 Dagum 基尼系数分解结果

Table 6 Decomposition results of Dagum Gini coefficient of coupling coordination degree between land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

项目	基尼系数										
	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	
总体	0.068	0.067	0.068	0.060	0.059	0.062	0.058	0.054	0.057	0.060	
地区内 差异	河南段	0.056	0.053	0.087	0.064	0.076	0.088	0.068	0.050	0.062	0.061
	安徽段	0.071	0.062	0.068	0.072	0.066	0.057	0.073	0.063	0.049	0.071
	江苏段	0.042	0.083	0.022	0.019	0.021	0.024	0.029	0.045	0.049	0.044
	山东段	0.052	0.053	0.046	0.048	0.041	0.046	0.039	0.031	0.035	0.028
地区间 差异	河南段—安徽段	0.069	0.059	0.081	0.071	0.073	0.077	0.072	0.059	0.058	0.070
	河南段—江苏段	0.053	0.070	0.065	0.048	0.057	0.066	0.053	0.053	0.059	0.055
	河南段—山东段	0.060	0.055	0.075	0.060	0.067	0.076	0.060	0.047	0.056	0.052
	安徽段—江苏段	0.073	0.076	0.061	0.058	0.049	0.042	0.055	0.057	0.057	0.067
	安徽段—山东段	0.068	0.059	0.063	0.066	0.060	0.054	0.062	0.054	0.051	0.062
空间差异来源	地区内	0.015	0.017	0.016	0.014	0.014	0.015	0.015	0.013	0.013	0.014
	地区间	0.034	0.008	0.024	0.017	0.010	0.014	0.007	0.016	0.021	0.018
	超变密度	0.020	0.043	0.029	0.029	0.035	0.032	0.036	0.025	0.022	0.029
空间差异贡献	地区内	21.46	24.63	23.19	23.12	24.16	24.40	24.98	24.01	23.65	23.39
	地区间	49.28	12.13	35.06	28.67	16.55	23.40	12.57	29.07	37.17	29.45
	超变密度	29.26	63.24	41.76	48.21	59.29	52.20	62.46	46.92	39.18	47.16

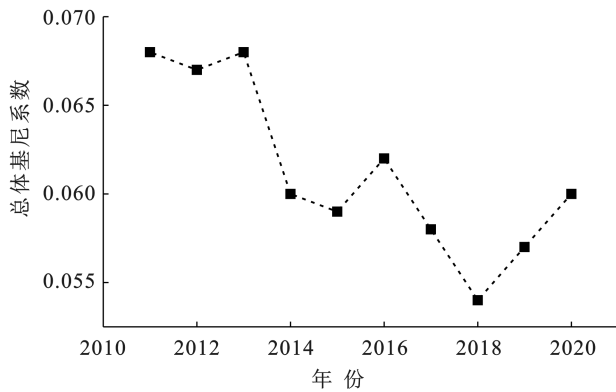


图 3 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度总体基尼系数

Fig.3 Overall Gini coefficient of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

3.4.3 地区间差异来源及其贡献 图 5 为 4 个省份间基尼系数的时序变化趋势。由图 5 可以看出,河南段—安徽段、河南段—山东段、安徽段—山东段、安徽段—江苏段差异较为明显, Dagum 基尼系数年均值分别为 0.069, 0.061, 0.060 和 0.059, 高于淮河流域 Dagum 基尼系数年均值 0.058, 缩小安徽段与其他省份、河南段与山东段的地区差异有助于实现淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调的空间均衡发展。从整体演变来看, 各地区之间的差异总体是下降的, 表现出增减交替特征, 说明区域间差异越来越小。

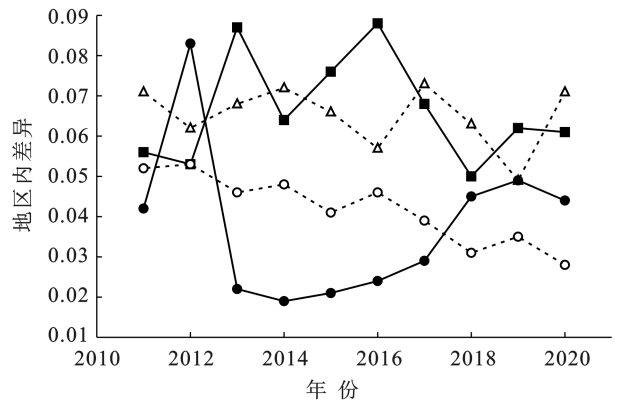


图 4 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度地区内差异

Fig.4 Intra-regional differences of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

3.4.4 地区差异来源及其贡献 图 6 为淮河流域耦合协调度区域差异来源及其贡献率的演变趋势。由图 6 可知, 研究期内, 在总体差异的贡献率中, 地区内差异贡献率均值为 23.70%, 处于相对稳定的状态, 说明就单一地区而言, 在其内部, 耦合协调度大小基本上比较稳定, 这也暗示着可能存在地区收敛。地区间差异贡献率均值为 27.33%, 超变密度的贡献率均值为 48.97%, 远高于地区间差异贡献度, 这表明山东段、江苏段的耦合协调度整体水平虽高于河南段和安

徽段,但其内部少数城市的耦合协调度又低于河南段和安徽段的少数城市,地区间耦合协调度发展存在较为严重的交叉重叠现象。

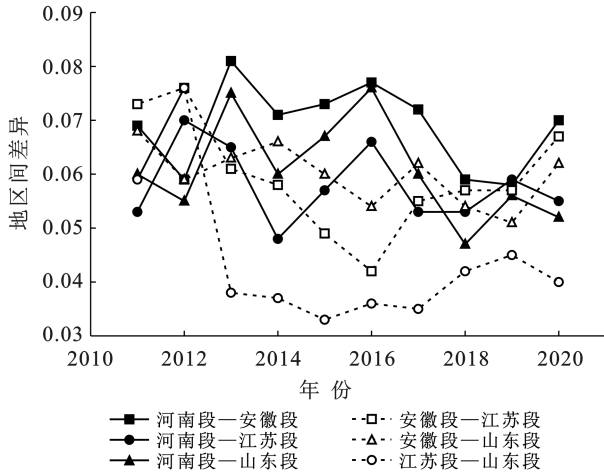


图 5 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度地区间差异

Fig.5 Regional differences of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

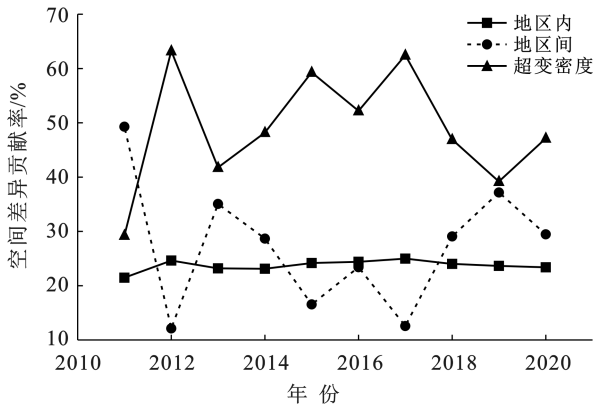


图 6 淮河流域 2011—2020 年土地与水资源利用效率耦合协调度空间差异来源

Fig.6 Spatial difference source of coupling coordination degree of land and water resources utilization efficiency in Huaihe River basin from 2011 to 2020

4 结论和建议

4.1 结论

(1) 研究期内,淮河流域土地资源与水资源利用效率总体水平不高,呈现波动上升趋势,具有明显的空间异质性,土地资源利用效率排名前三的是安徽段、河南段、江苏段,水资源利用效率排名前三的是山东段、安徽段、河南段。

(2) 2011—2014 年,淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度整体处于勉强协调阶段,2015—2020

年,基本处于初级协调及中级协调阶段,研究期内均以水资源利用效率滞后类型为主。耦合协调度空间差异显著,逐渐演变为“东西部高、中部低”的空间格局。

(3) 从标准差椭圆结果来看,淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度在“东—西”方向上增大的趋势大于在“南—北”方向上减小的趋势,位于西北和东南方向的城市耦合协调度增长速度较快,且其耦合协调度增速存在强弱交替现象。

(4) 研究期内,淮河流域土地与水资源利用效率耦合协调度总体差异呈下降趋势,从地区内差异来看,河南段占主导地位,其次是安徽段;从地区间差异来看,各地区之间差异整体上是下降的,表现出增减交替特征;空间分异主要来源于超变密度,其次为地区间分异,地区内分异几乎保持不变。

4.2 建议

沿淮流域 4 个省份水土资源利用效率及其耦合协调度不同,故各省份的建议应具有针对性。河南段应维持水土资源利用效率耦合向好发展的势头,一方面借助南水北调工程缓解水资源短缺的压力,另一方面引进新兴技术和人才、推广节水经验,严格把控高污染高耗水的项目,改善水资源利用效率滞后的局面。安徽段应全力提高各城市土地和水资源利用效率,积极响应水利工程建设,改变依赖资源的经济发展模式,推动城域间对口合作,缩小与其他省份发展差距。江苏段应带动周边省份发展,主动分享治理经验,协同共进。同时兼顾自身社会效益与生态环境效益,借助经济优势重点发展低耗能的可持续性产业,进一步提高水土资源利用效率及其耦合协调度。山东段应加强土地生态保护,提高市域土地生态环境容量,加速提升土地资源利用效率,促进区域内水土资源耦合协调高速发展。

总的来看,淮河流域各城市应因地制宜,多渠道提高土地资源与水资源利用效率,一方面引进新兴技术和人才,推广节水经验,优化国土空间开发格局,加强城市土地资源与水资源的高效集约利用。另一方面有效缩短区域间土地资源与水资源耦合协调度差距。首先,制定城市用地、用水政策时,不能受限于传统“定点施策”的固定思维,应发挥中心城市的辐射和带动作用,畅通区域间土地利用、用水节水资本、知识和技术等基本要素的流通渠道,建立城市间高效的协同机制。其次,加大淮河流域内环境补偿,采取转移支付的方式,提供土地开发程度较大、用水量较大的地区一定的资金支持,提高财政补贴额度,建立完善的补偿机制,缩小地区差异。

[参 考 文 献]

- [1] 周申蓓,肖亚朋.污染物排放约束下的水资源环境效率空间收敛分析[J].水电能源科学,2016,34(6):27-31.
- [2] 叶小军,徐家明,朱晨,等.减量导向下苏南村镇工业用地更新困境与转型路径探讨[J].规划师,2021,37(21):37-43.
- [3] 朱启荣.中国工业用水效率与节水潜力实证研究[J].工业技术经济,2007(9):48-51.
- [4] 沈晓梅,谢雨涵.农业绿色水资源利用效率及其影响因素研究[J].中国农村水利水电,2022(3):13-18,24.
- [5] 王竞优,边杨子,聂炜,等.中国环境保护重点城市水资源利用效率分析[J].科技导报,2018,36(2):55-60.
- [6] 李莉,刘爽.基于 DEA-BC2 模型的新疆水资源利用效率时空差异性分析[J].水文,2019,39(2):28-32,43.
- [7] Le N T, Thinh N A, Ha N T V, et al. Measuring water resource use efficiency of the Dong Nai River basin (Vietnam): an application of the two-stage data envelopment analysis (DEA) [J]. Environment, Development and Sustainability, 2021,24:1-19.
- [8] 马琳.上海市郊区土地利用效率评价研究:基于 DEA 模型的实证分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(5):59-62.
- [9] 汪险生,郭忠兴.基于 DEA 方法的农地非农化效率研究[J].自然资源学报,2014,29(6):944-955.
- [10] Alsharif K A, Fouad G. Lake performance differences in response to land use and water quality: data envelopment analysis [J]. Lake and Reservoir Management, 2012,28(2):130-141.
- [11] 石天戈,时卉.基于网络 DEA 的中国省域水资源效率特征与影响因素分析[J].生态经济,2022,38(7):176-183.
- [12] 施建刚,徐天珩.基于 VRS-DEA 模型与 Malmquist 指数的工业园区土地利用效率评价:以长三角城市群 16 个工业园区为例[J].资源科学,2017,39(6):1026-1036.
- [13] 丁绪辉,高素惠,吴凤平.环境规制、FDI 集聚与长江经济带用水效率的空间溢出效应研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(8):148-155.
- [14] 赵良仕,孙才志,刘凤朝.环境约束下中国省际水资源两阶段效率及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(5):27-36.
- [15] 陈艳萍,刘畅.中国水资源利用效率及其影响因素研究:基于 Shephard 水资源距离函数[J].世界地理研究,2022,31(3):591-601.
- [16] 刘玉杰,耿献辉.中国农业资源效率时空分异与驱动因素研究[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2021,15(5):65-71.
- [17] 何莎莎,方斌,李欣,等.城市土地利用效率与高质量发展时空演变及交互响应:以江苏省为例[J].地理与地理信息科学,2022,38(5):79-87.
- [18] Liu Gang, Lu Shi, Li K W. Equitable allocation of blue and green water footprints based on land-use types: a case study of the Yangtze River economic belt [J]. Sustainability, 2018,10(10):3556.
- [19] 赵勇,常免宇,桑学锋,等.京津冀水资源—粮食—能源—生态协同调控研究(II):应用[J].水利学报,2022,53(10):1251-1261.
- [20] 叶芸,於冉,万年顺,等.长江经济带产业—碳排放—土地协同发展研究[J].水土保持通报,2022,42(5):312-320.
- [21] 胡绵好,廖桂莹,袁菊红,等.基于 DEA-CCA 模型的鄱阳湖生态经济区用水效率时空变化及影响因素分析[J].江西师范大学学报(自然科学版),2018,42(4):427-433.
- [22] 刘蒙罢,张安录,熊燕飞.长江经济带城市土地利用生态效率空间差异及其与产业结构升级的交互溢出效应[J].中国人口·资源与环境,2022,32(10):125-139.
- [23] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J] European Journal of Operational Research, 2001,130:498-509.
- [24] 朱媛媛,汪紫薇,罗静,等.中国中部重点农区新型城镇化与粮食安全耦合协调发展研究:以河南省为例[J].地理科学,2021,41(11):1947-1958.
- [25] 黄晓楠,张目.中国省域生态文明建设与金融集聚耦合协调发展研究[J].林业经济,2020,42(4):34-45.
- [26] 白彩全,黄芽保,宋伟轩,等.省域金融集聚与生态效率耦合协调发展研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):1-7.
- [27] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse [J]. American Journal of Sociology, 1926,32(1):88-94.
- [28] 郑德凤,徐文瑾,姜俊超,等.中国水资源承载力与城镇化质量演化趋势及协调发展分析[J].经济地理,2021,41(2):72-81.
- [29] 章激扬.长三角城市群创新发展空间差异及收敛性研究:基于 Dagum 基尼系数分解[J].长江流域资源与环境,2023,32(2):235-249.
- [30] 焦士兴,王安周,李玉靖,等.河南省水资源“农转非”时空演变及驱动力[J].水资源保护,2022,38(3):109-116.