

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.002.

李康玮, 曾贤刚. 煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变及驱动机制[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 460-469.

LI Kangwei, ZENG Xiangang. Coordinated Development Evolution and Driving Mechanism of Coal Development and Ecosystem Services in Huainan City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 460-469.

煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务 协调发展演变及驱动机制

——以淮南市为例

李康玮, 曾贤刚

(中国人民大学 环境学院, 北京 100872)

摘要: [目的] 研究煤炭开发与生态系统服务协调发展演变及驱动机制, 对推进我国资源型城市可持续发展具有重要的意义。 [方法] 结合煤炭城市生命周期理论, 在分析煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律的基础上, 采用协调度模型和灰色关联模型揭示 2005—2018 年淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度时序变化规律及主要驱动因素。 [结果] 研究期间淮南市煤炭开发综合水平呈现波动上升趋势, 生态系统服务综合水平呈缓慢下降趋势, 煤炭开发与生态系统服务协调度基本处于 0.5~0.7 之间, 二者协调度呈现上升趋势, 由勉强协调—煤炭开发滞后阶段逐步过渡到中级协调—同步发展阶段; 环境污染治理、居民生活环境需求、产业转型是淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展的主要驱动因素, 其与协调发展的关联度分别为 0.910 2, 0.817 8, 0.807 0。 [结论] 研究提出了煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律, 揭示了淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变态势及驱动机制, 可为煤炭资源型城市的经济与环境协调可持续发展提供决策依据。

关键词: 煤炭开发; 生态系统服务; 协调度; 驱动机制; 淮南市

中图分类号: X171.1; F062.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0460-10

Coordinated Development Evolution and Driving Mechanism of Coal Development and Ecosystem Services in Huainan City

LI Kangwei, ZENG Xiangang

(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: [Objective] Studying the coordinated development evolution and driving mechanism of coal development and ecosystem services is of great significance for promoting the sustainable development of resource-based cities in China. [Methods] Based on the life cycle theory of coal cities, and analysis on the coordinated development and evolution pattern of coal development and ecosystem services, the coordination degree model and gray correlation model were used to reveal the temporal variation and main driving factors of the coordination degree of coal development and ecosystem services in Huainan from 2005 to 2018. [Results] The comprehensive level of coal development in Huainan City showed a fluctuating upward trend, and the comprehensive index of ecosystem services showed a slow downward trend during the study period. The coordination degree of coal development and ecosystem services in Huainan City was basically between 0.5 and 0.7 from 2005 to 2018, which showed an upward trend, gradually transitioning from barely coordinated coal mining lag to coordinated synchronous development stage. Environmental pollution governing, residents' living environment demand

收稿日期: 2022-04-21

修回日期: 2022-05-12

资助项目: 中国人民大学“中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金”(21XNL006)

第一作者: 李康玮(1994—), 男, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要从事资源环境经济研究。E-mail: likangwei@ruc.edu.cn

通信作者: 曾贤刚(1972—), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事环境与资源经济学研究, zengxg@ruc.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

and industrial transformation were the main driving factors for the coordinated development of coal development and ecosystem services in Huainan City. The correlation degrees of environmental pollution governing, residents' living environment demand and industrial transformation with the coordinated development were 0.910 2, 0.817 8 and 0.807 0, respectively. [Conclusion] The study proposed the evolution law of coordinated development of coal development and ecosystem services in coal resource-based cities, revealed the evolution trend and driving mechanism of coordinated development of coal development and ecosystem services in Huainan City, which can provided decision-making basis for coordinated and sustainable development of economy and environment in coal resource-based cities.

Keywords: coal development; ecosystem services; coordination degree; driving mechanism; Huainan City

生态系统服务是指生态系统所提供的能够维持人类生活需要的产品和服务,是人类直接或间接从生态系统得到的利益^[1-2]。资源型城市煤炭开发是指以煤炭资源的开采与洗选为核心,通过土地、资金和劳动的投入,形成与城市功能相适应的产业集聚以及人口集聚,从而实现经济、社会与生态效益相统一的城市化进程^[3-4]。大规模煤炭资源开发在促进经济发展、人口集聚的同时,也通过土地塌陷、矿井水涌出、工业废气排放等,对区域生态系统服务造成负面影响^[5],煤炭资源开发与生态系统服务的协调发展已成为我国亟待解决的重要课题。国务院于 2013 年下发《全国资源型城市可持续发展规划》,明确提出要把生态文明建设放在突出地位,从经济发展转型、社会和谐进步、生态环境改善等方面入手,建立健全资源型城市资源开发与生态环境协调发展的格局。这表明煤炭资源型城市的可持续发展既要以煤炭资源开发促进区域经济发展、人口集聚,又要注重生态环境保护,实现煤炭开发与生态环境的协调发展。在此背景下,系统探讨资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变及驱动机制,对推进我国资源型城市可持续发展具有重要的意义。

国内外关于煤炭开发与生态系统服务的相关研究,包括两者相互作用形式及内在联系机制探讨。关于煤炭开发对生态系统服务的影响,不同研究得出的结论不一致,如 Li 等^[6]认为,煤炭开发造成了土地利用结构变化、生态景观损害、水土流失等生态环境问题,并测算出近 50 a 来北京市门头沟区煤炭开发造成的生态系统服务损失约为 20.01 亿美元。但 Xiao 等^[7]基于当量因子法测算了兖州煤田煤炭开发对高地下水位地区生态系统服务的影响,研究表明研究区的生态系统服务价值总体保持增长,采矿沉陷导致建设用和农田向水体大量过渡和恢复活动起到了重要作用。关于生态系统服务对煤炭开发活动的影响,王宏英等^[8]认为,生态系统提供的土地资源和地下水资源是决定煤炭开发规模的关键因素,并提出要根据

不同煤炭地区生态资源特征确定合理的煤炭开发规模,以促进煤炭资源可持续开发。娜仁等^[5]指出,生态系统向煤炭开发活动提供的服务和产品是有限的,如果煤炭开发不注重生态保护工作,生态系统服务将对煤炭企业的开发活动形成严重制约。

目前国内外仅有少数学者开展煤炭开发与生态系统服务协调发展的相关研究,研究方法主要包括容量耦合模型^[9]、灰色关联分析^[5]、协调度模型^[10]、系统动力学等^[11],研究尺度包括城市群^[9]、省域^[12]及市域^[5]。如 Liu 等^[11]基于系统动力学模型模拟了煤炭城市枣庄不同情景下煤炭开发与生态系统的协调发展态势,研究发现环境治理固定投资率和煤矸石利用率是关键影响因素。闫敬旺等^[9]基于协调度模型揭示了黄河流域煤炭产业和生态环境保护的协调发展过程,研究表明该地区煤炭产业和生态保护呈现高水平协调发展态势。杜左龙等^[10]从规模、效益、效率角度构建煤炭产业发展指标体系,揭示了新疆煤炭产业与生态环境协调发展态势,研究表明该地区煤炭产业和生态环境协调度不断增加,二者之间的矛盾不断得到化解,但仍需重视生态环境保护工作。Xiao 等^[12]分析了中国 547 个煤炭地区的采矿强度和社会生态韧性,提出了不同矿区生态恢复和资源开发利用的差异化策略,以促进中国煤炭资源型地区的社会生态协调发展。

以上研究为本文提供了良好的借鉴,但仍存在以下 3 方面的不足:一是缺少煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律的相关理论分析;二是没有从系统的角度全面构建煤炭开发综合指标体系,不能准确反映煤炭开发水平和质量;三是直接针对煤炭开发与生态系统服务的协调关系研究鲜有涉及,同时探讨两者协调发展驱动机制的研究更是不多。本研究的创新之处在于以煤炭资源成熟型城市淮南市为研究对象,基于生命周期理论对煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律进行分析,从产业发展、人口集聚和生态环境 3 个方面构建煤炭开发综合评价指标体系,继而基于协调度模型对煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律进行

测度,并引入经济发展、产业转型、环境污染治理、居民生活环境等社会经济因素,通过灰色关联分析方法揭示协调发展的驱动机制,以期为煤炭资源型城市的经济与环境协调可持续发展提供决策依据。

1 煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律

协调发展表征了系统演变过程内部各要素良性互动、相互和谐一致的有序状态,可以很好地反映要素发展的整体水平及二者的协同效应^[13]。煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展,是指在生态系统承载能力范围内,实现区域高水平煤炭开发活动的同时依靠煤炭经济效益为生态环境质量的改善提供物质保障,并通过产业转型、技术升级、人居环境改善、环境治理投资等驱动机制促使煤炭开发与生态系统服务良性互动、相互和谐一致,实现煤炭开发与生态环境的协调发展^[9-10]。煤炭资源的不可再生性决定了煤炭资源型城市的发展具有明显的生命周期性(初始期、成长期、成熟期、衰退期),这导致不同阶段煤炭开发与生态系统服务协调发展态势也会呈现显著差异。本研究结合煤炭资源型城市生命周期,将煤炭开发与生态系统服务协调发展阶段划分为失调阶段、过渡阶段、协调发展3个阶段(图1)。

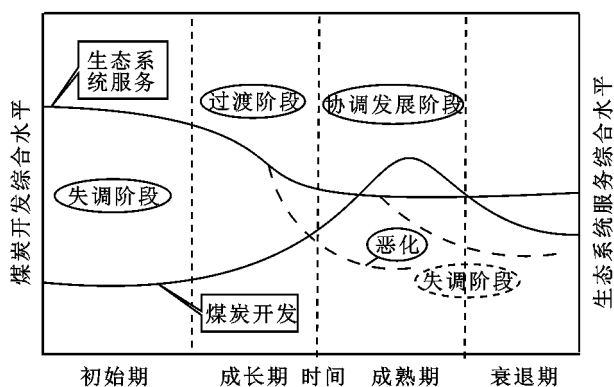


图1 煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律

(1) 失调阶段。煤炭资源型城市开发初期,煤炭产业发展不成熟,煤炭开发综合水平较低。此时由于区域经济发展并不依赖于煤炭开发活动,因此生态环境破坏力度有限,所以生态系统服务保持稳定发展态势^[5]。该阶段煤炭开发综合水平明显滞后于生态系统服务综合水平,煤炭开发与生态系统服务呈现不同步的失调状态,没有实现煤炭资源开发与生态环境的协调发展。此外,如果在煤炭资源型城市的生命周期中不注重生态环境保护问题,生态系统服务水平会快速下降,二者也会进入失调阶段。

(2) 过渡阶段。随着煤炭资源型城市发展逐渐

进入到成长期,煤炭资源型地区初步形成以煤炭行业为核心的经济发展和人口集聚模式,煤炭开发综合水平不断增加。同时煤炭开发造成的农用地减少、水资源破坏、工业废气排放等问题对生态系统服务造成严重破坏,生态系统服务综合水平开始呈缓慢下降趋势。在区域社会—经济—自然协调可持续发展的要求下,煤炭企业追求高质量发展,逐步开展生态修复与治理工程,这在一定程度上缓解了生态系统服务的下降趋势^[13-14]。同时随着煤炭开发综合水平的不断增加,二者综合水平不断接近,初步实现了煤炭资源开发与生态环境的协调发展。如果煤炭资源型城市不重视生态环境保护,不提供资金开展生态修复与治理工程,生态系统服务下降趋势会加快甚至恶化,难以支撑高水平煤炭开发,二者再次进入失调阶段。

(3) 协调发展阶段。随着煤炭资源型城市发展逐渐进入到成熟期与衰竭期,煤炭开发在城市社会—经济—自然复合系统中的影响达到峰值,煤炭开发综合水平也接近最大值。该阶段煤炭城市经济社会发展水平较高,高度重视经济转型可持续发展与生态环境保护问题,一方面大力推动城市产业结构升级,不断提高人力资本储备与技术进步,这会促使煤炭开发技术不断升级,减少对生态环境的破坏;一方面,城市经济社会发展水平较高,这为加大生态治理与修复提供了充分的资金保障,继而进一步扭转生态系统服务的下降趋势,促使煤炭开发支撑区域经济发展、人口集聚与生态系统服务良好发展保持同步,实现了整体效益最大化,二者进入协调发展阶段^[15-16]。但是如果城市转型发展失败,资源型产业作为主导产业的发展会困难重重,生态环境治理投资缺乏资金,煤炭开发与生态系统服务会进入过渡阶段甚至失调阶段。因此,煤炭资源型城市煤炭开发与生态系统服务协调发展阶段会保持动态波动,当地政府需要基于协调状态做出对应性的变化。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

淮南市是华东地区最大的煤炭资源型城市,该市位于安徽省中北部,地理位置 116°21'5"—117°12'30"E, 31°54'8"—33°00'26"N。淮南市现辖6个区县,包括田家庵区、八公山区、潘集区、谢家集区、大通区、凤台县(注:由于寿县在2015年底从六安市划入淮南市,且寿县无煤炭资源,故本研究区范围不包括寿县),研究区总面积为2584 km²。淮南市煤炭储量丰富,远景储量444亿t,占安徽省煤炭储量的70%,华东地区煤炭储量的1/3,是中国13个亿t煤炭基地之一。淮南市作为煤炭资源成熟

型城市,煤炭开发在促进区域经济社会快速发展的同时也导致了严重的生态环境问题。2013 年以来该市坚持煤炭开发与生态保护并重,在提高煤炭产业技术水平的同时,高度重视生态环境问题,大力推进生态修复与治理工程,推进大气污染防治工作,生态环境质量得到显著提升^[16-17]。

2.2 数据来源与处理

土地利用数据来自淮南市国土资源局提供的 2005—2018 年土地利用情况调查数据,其余社会经济数据主要来自 2005—2018 年《淮南统计年鉴》《淮南市国民经济和社会发展统计公报》《安徽统计年鉴》《中国城市统计年鉴》等,对于仍无法获取的数据,采取相近年份回归拟合法进行补缺^[18]。参考有关文献^[19],部分污染物数据采用煤炭行业工业增加值乘以单位工业增加值排放量的方法进行估算,本研究中的煤炭行业范围为煤炭开采和洗选业。为保证不同度量单位的数据反映原始变量的绝大部分信息,本文使用极值法^[20]、变异系数法^[21]对搜集的原始数据进行标准化及权重运算,继而运用线性加权法^[22]分别计算煤炭开发与生态系统服务的综合指数。

3 研究方法

3.1 煤炭开发评价指标体系构建

从系统论的角度看,城市是典型的社会—经济—自然复合生态系统^[23],煤炭开发活动作为煤炭资源型城市开发活动的核心,在促进区域产业集聚、人口集聚的同时对生态环境造成破坏^[5]。因此本文基于社会—经济—自然复合系统视角,根据指标选取的系统性、相关性和可操作性等原则,借鉴现有关于煤炭

开发和城市开发的相关研究^[9-10,24],从产业发展、人口集聚和生态环境 3 个方面构建煤炭开发综合评价指标体系,全面反映煤炭开发综合水平(表 1)。产业发展、人口集聚指标选取中,结合高质量发展理念^[25],从规模、结构和效率^[19] 3 个方面全面衡量煤炭开发对产业发展和人口就业的影响,产业发展方面分别选取煤炭行业工业增加值、煤炭行业工业增加值占地区工业增加值比重、煤炭行业万元产值综合能耗,反映煤炭行业发展水平、煤炭行业重要程度、煤炭行业经济效益;人口集聚方面,选取煤炭行业职工人数、煤炭行业职工人数占工业职工人数比重、煤炭行业劳动生产率,分别反映煤炭行业就业人口总量、人口结构情况、煤炭行业职工生产效率。

生态环境影响方面,从土地、水资源、大气^[5] 3 个方面分别选取采煤土地塌陷面积、煤炭行业工业废水排放量和煤炭行业工业二氧化硫排放量 3 个负向指标,全面反映煤炭开发对生态环境的影响。具体测算过程如下:(1) 参照相关研究成果^[26],淮南矿区每开发 1 万 t 煤炭塌陷面积为 0.19 hm²,据此估算出淮南市相应年份煤炭开发造成的土地塌陷面积。(2) 淮南市煤炭开发排放的工业废水主要来自煤炭开采和洗选业,由于缺少淮南市煤炭行业工业废水排放量统计资料,参考有关研究^[19],采用煤炭行业工业增加值乘以单位工业增加值污染物排放量的方法进行估算,即以淮南市煤炭行业工业增加值占该市工业增加值的比重为折算系数,以淮南市工业废水排放量为基数,对煤炭行业的工业废水排放量进行了估算。(3) 淮南市煤炭开发排放的工业二氧化硫主要来自煤炭开采和洗选业,测算思路 and 上文一致。

表 1 淮南市煤炭开发综合评价指标体系

一级指标		二级指标	指标权重	指标性质
煤炭开发	产业发展	煤炭行业工业增加值	0.1586	+
		煤炭行业工业增加值占工业增加值比重	0.0530	+
		煤炭行业万元产值综合能耗	0.0971	—
	人口集聚	煤炭行业职工人数	0.0575	+
		煤炭行业职工人数占工业职工人数比重	0.0366	+
		煤炭行业劳动生产率	0.1083	+
生态环境		采煤土地塌陷面积	0.0938	—
		煤炭行业工业废水排放量	0.1750	—
		煤炭行业工业二氧化硫排放量	0.2200	—

3.2 生态系统服务评价指标体系构建

基于谢高地等^[27]提出的当量因子法,从供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 个方面构建生态系统服务评价指标体系。当量因子指生态系统的某种生态服务价值较农田食物生产的相对重要程度^[28],谢高地

等^[27]的研究获取的当量因子代表的是全国生态系统的平均服务价值,考虑到区域存在差异性,本研究分别采用徐丽芬等^[28]、胡喜生等^[29]、宋思远等^[30]提出的修订方法从资源禀赋、生态资源稀缺性和经济发展水平 3 方面对当量因子进行修订(见公式 1),得到淮南市当量因子

修订系数为 1.41。没有人力资本投入的自然生态系统提供的经济价值是现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的 $1/7^{[31]}$,淮南市 2015—2018 年研究区平均粮食产量为 $6\ 385.27\text{ kg/hm}^2$,根据国家发展和改革委员会公布的 2018 年稻谷最低收购价确定粮食价格为 2.51 元/kg,得出淮南市生态系统服务价值当量因子的经济价值量为 $2\ 286.54\text{ 元/hm}^2$ 。建设用地虽然不属于自然生态系统,但是它会对生态系统服务价值产生负面影响,因此本文纳入建设用地生态系统服务价值,根据邓舒洪^[32]赋予建设用地生态服务价值当量,进而得到淮南市单位面积生态系统服务价值系数表(表 2),改进后

表 2 淮南市单位面积生态系统服务价值

元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)

一级类型	二级类型	林地	园地	耕地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1063.9254	1225.1262	3224.0164	1434.6873		64.4803
	原材料生产	9607.5688	5384.1074	1257.3664	951.0848		128.9607
	气体调节	13927.7508	9381.8877	2321.2918	4707.0639	-7802.1197	193.4410
调节服务	气候调节	13121.7467	9075.6061	3127.2959	25163.4479		419.1221
	水文调节	13186.2270	9043.3660	2482.4926	51922.7840	-24212.3631	225.6811
	废物处理	5545.3082	4900.5049	4481.3828	47151.2397	-7931.0803	838.2443
支持服务	保持土壤	12960.5459	10091.1713	4739.3041	3868.8197		548.0828
	维持生物多样性	14540.3139	10284.6123	3288.4967	11477.4983		1289.6066
文化服务	提供美学景观	6705.9541	4755.4242	548.0828	14717.6348		773.7639
	总计	90659.3409	64141.8061	25469.7295	161394.2605	-39945.5631	4481.3828

表 3 淮南市生态系统服务综合评价指标体系

	一级指标	二级指标	指标权重	指标性质
生态系统服务(Y)	供给服务	食物生产(Y_1)	0.0304	+
		原材料生产(Y_2)	0.0416	+
		气体调节(Y_3)	0.3452	+
	调节服务	气候调节(Y_4)	0.0692	+
		水文调节(Y_5)	0.2301	+
		废物调节(Y_6)	0.1071	+
	支持服务	保持土壤(Y_7)	0.0387	+
		维护生物多样性(Y_8)	0.0582	+
	文化服务	提供美学景观(Y_9)	0.0795	+

3.3 协调度测算

本文引入协调度模型^[33]来揭示煤炭开发与生态系统服务的协调发展规律与特征,其优势在于一方面能够测算两系统间相互作用程度,另一方面能准确反映系统整体协调一致的关系,其模型结构可表示为:

$$D = \sqrt{[\mu_1 \times \mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)^2]^{1/2} \times (\alpha\mu_1 + \beta\mu_2)} \quad (2)$$

式中: μ_1 、 μ_2 分别为煤炭开发综合评价指数和生态系统服务综合评价指数; α 、 β 为待定系数,反映两系统的相对重要程度,本文认为煤炭开发和生态系统服务具有同等重要的作用,故取 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.5$ 。结合前文提出的基于全生命周期理论的煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律,将协调度分成 3 大阶段共 6 小类,再结合 μ_1 和 μ_2 的相对大小,确定煤炭开发

的生态系统服务价值计算方法^[29]:

$$AESV = \frac{w}{W} \times \frac{lg_m}{lg_M} \times \frac{lg_g}{lg_G} \sum A_k VC_k \quad (1)$$

式中:AESV 为改进后的生态系统单项服务价值(元); w 、 W 分别为淮南市和全国的农田单位面积粮食产量; m 、 M 分别为淮南市和全国的平均人口密度; g 、 G 分别为淮南市和全国的人均国内生产总值; A_k 为第 k 种土地利用类型面积(hm^2); VC_k 为第 k 种土地利用类型单位面积的生态系统服务价值当量系数(元/ hm^2)。基于表 2,计算处理得到该市生态系统服务评价指标权重,结果如表 3 所示。

与生态系统服务相对发展程度,在 6 小类协调度的基础上再分为 18 种基本类型,具体见表 4。

3.4 灰色关联分析

城市是典型的社会—经济—自然复合生态系统,煤炭开发与生态系统服务协调发展的演变会受到复合生态系统其他因素的影响,识别这些驱动因素具有重要的理论和现实意义。参照任喜萍等^[34]做法,采用灰色关联分析方法探明煤炭开发与生态系统服务协调发展演变的主要驱动因素,该方法可依据因素之间发展趋势的相似度来衡量关联程度,适用于复合系统的动态演变分析^[35]。模型构建如下:

$$\zeta_m(t) = \frac{\min_m \min_t |Z'_0(t) - Z'_m(t)| \mu \max_m \max_t |Z'_0(t) - Z'_m(t)|}{|Z'_0(t) - Z'_m(t)| + |\mu \max_m \max_t |Z'_0(t) - Z'_m(t)|} \quad (3)$$

$$A_m = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \zeta_m(t) \quad (4)$$

式中: $\zeta_m(t)$ 、 A_m 分别为关联系数,关联度; $Z'_0(t)$ 、 $Z'_m(t)$ 为标准化后的协调度与各驱动因素序列; t 为年份; m 为第 m 项驱动因素($t=1,2,3,\dots,T$; $m=1,2,3,\dots,M$); $|Z'_0(t) - Z'_m(t)|$ 为绝对差序列; μ 为分辨系数,一般取值 0.5。若 $0 < A_m \leq 0.4$ 为弱关联度;若 $0.4 < A_m \leq 0.6$ 为中等关联度;若 $0.6 < A_m \leq 0.8$,为较强关联度;若 $0.8 < A_m \leq 1$,为极强关联度。

表 4 协调度类别划分标准

协调阶段	协调类型	协调发展区间	分类依据	关系判别特征
协调阶段	高级协调	$0.8 < D \leq 1$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	高级协调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	高级协调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	高级协调—煤炭开发滞后
	中级协调	$0.6 < D \leq 0.8$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	中级协调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	中级协调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	中级协调—煤炭开发滞后
过渡阶段	勉强协调	$0.5 < D \leq 0.6$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	勉强协调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	勉强协调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	勉强协调—煤炭开发滞后
	濒临失调	$0.4 < D \leq 0.5$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	濒临失调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	濒临失调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	濒临失调—煤炭开发滞后
失调阶段	中度失调	$0.2 < D \leq 0.4$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	中度失调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	中度失调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	中度失调—煤炭开发滞后
	严重失调	$0 < D \leq 0.2$	$ \mu_1 - \mu_2 \leq 0.1$	严重失调—煤炭开发与生态系统服务同步
			$\mu_1 - \mu_2 > 0.1$	严重失调—生态系统服务滞后
			$\mu_2 - \mu_1 > 0.1$	严重失调—煤炭开发滞后

4 结果与分析

4.1 煤炭开发与生态系统服务综合指数分析

4.1.1 煤炭开发综合水平变化 由图 2 可知, 2005—2018 年淮南市煤炭开发综合水平呈现波动上升趋势, 其中: (1) 2005—2012 年, 煤炭开发综合水平保持平稳波动状态, 其中产业发展曲线、人口集聚曲线呈现波动上升趋势, 尤其是产业发展对煤炭开发综合水平的贡献份额长期处于较高水平, 这表明在此期间淮南市依托大规模煤炭开发, 促进了区域产业快速发展和人口规模扩张。但是生态环境曲线却呈现下降趋势, 这说明淮南市煤炭开发引起生态环境问题较为突出, 煤炭行业生态环境治理工作较为滞后, 呈现低质量的发展状态^[16]; (2) 2013 年以来, 煤炭开发综合水平呈现先下降后上升的趋势, 其中产业发展曲线、人口集聚曲线呈缓慢下降态势, 生态环境曲线呈上升趋势。这是因为 2013 年以来, 淮南市城市产业转型进一步加快, 煤炭开发在区域经济发展和人口集聚中所起的作用逐渐下降, 这导致煤炭开发综合水平有小幅程度的下降。但同时淮南市政府高度重视生态环境问题, 不断开展土地复垦与煤炭产业“三废”治理工作, 生态环境质量显著改善, 生态环境曲线呈持续上升趋势^[16-17], 随着煤炭产业发展下降趋势的企稳, 煤炭开发综合水平呈先下降后上升趋势。

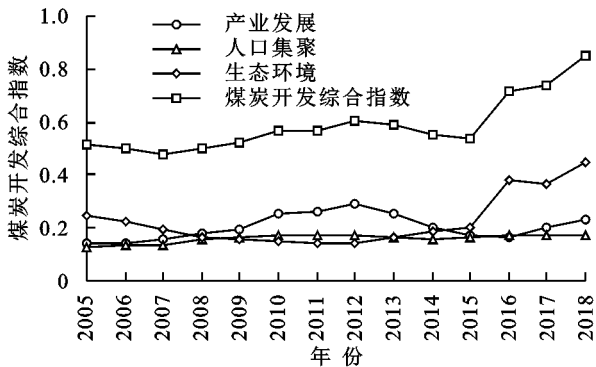


图 2 2005—2018 年淮南市煤炭开发指数变化趋势

4.1.2 生态系统服务综合水平变化 由图 3 可知, 2005—2018 年淮南市生态系统服务综合指数呈“L 型”缓慢下降趋势。究其原因, 淮南市依托煤炭开发在促进产业发展和人口集聚的同时, 导致土地利用结构发生重大变化, 耕地等生态用地不断减少, 建设用地不断增加, 使得淮南市生态系统服务呈下降趋势。根据笔者统计, 2005—2018 年该区域耕地、园地、林地、水域、未利用地面积减少分别为 3 713.25, 248.4, 446.20, 5 301.92, 513.51 hm^2 , 建设用地增加 10 223.29 hm^2 。同时该地区生态系统服务下降趋势呈现显著的阶段性特征, 第一阶段为快速下降阶段 (2005—2012 年), 生态系统服务综合指数年均下降率为 2.4%, 煤炭开发引起的生态环境问题与明显滞后的生态环境治理力度是重要原因; 第二阶段为缓慢下降阶段 (2013—2018 年), 生态系统服务综合指数年均下降

率为 0.9%，这因为 2013 年以来，淮南市高度重视生态环境保护，生态环境质量不断提升从而扭转了生态系统服务快速下降的趋势^[35]。

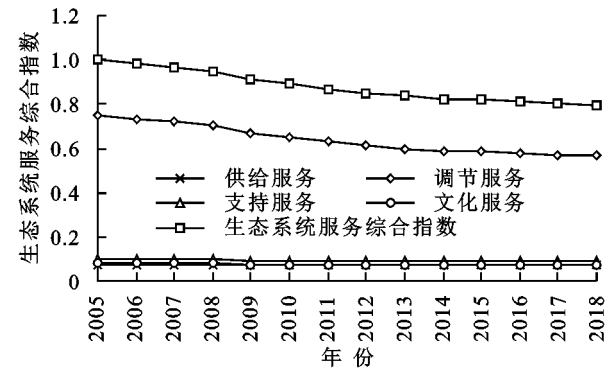


图 3 2005—2018 年淮南市生态系统服务指数变化趋势

4.2 协调度

根据协调度模型，计算得到 2005—2018 年淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度及协调发展类型（表 5，图 4）。由表 5，图 4 可见，2005—2018 年淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度由 2005 年的 0.598 3 上升为 2018 年的 0.641 3，由勉强协调—煤炭开发滞后阶段逐步过渡到中级协调—同步发展阶段，这说明淮南市煤炭开发与生态系统服务呈现愈加紧密的协

调发展态势，二者协调性不断改善。（1）2005—2015 年，勉强协调—煤炭开发滞后阶段。此阶段由于淮南市煤炭开发引发的环境问题较为严重，导致煤炭开发综合水平较小且始终滞后于生态系统服务综合水平，同时严重的环境问题导致生态系统服务指数呈下降趋势，二者协调发展并不明显。2013 年以来，淮南市资源型城市产业转型进一步加快，并高度重视生态环境保护工作，不断开展采煤塌陷区生态修复与综合治理工程^[16-17]，这减缓了生态系统服务指数的下降速度，后者于 2013 年进入缓慢下降阶段（图 3），但由于煤炭开发指数的小幅下降，二者协调发展依旧不明显。（2）2015—2018 年，中级协调—同步发展阶段。此阶段随着煤炭产业发展下降趋势的企稳，以及煤炭开发生态环境治理效果不断显现，促使煤炭开发综合水平呈现上升趋势，并于 2018 年略微领先于生态系统服务综合指数。同期由于生态环境保护工作的推进，生态系统服务综合指数下降速度进一步减缓（图 3），促进了二者协调度的不断上升。这一阶段淮南市煤炭开发与生态系统服务呈现愈加紧密的协调发展态势，二者综合发展水平较为接近，呈现同步协调发展态势^[35]。

表 5 淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度评价结果

年份	煤炭开发 综合指数	生态系统 服务综合指数	综合发展 指数	协调度	协调状态	协调类型
2005	0.5126	1.0000	0.7563	0.5983	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2006	0.5022	0.9797	0.7410	0.5922	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2007	0.4797	0.9671	0.7234	0.5836	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2008	0.5016	0.9515	0.7265	0.5877	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2009	0.5222	0.9086	0.7154	0.5869	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2010	0.5691	0.8938	0.7314	0.5972	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2011	0.5707	0.8694	0.7200	0.5934	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2012	0.6066	0.8467	0.7266	0.5986	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2013	0.5860	0.8346	0.7103	0.5913	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2014	0.5492	0.8254	0.6873	0.5802	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2015	0.5352	0.8208	0.6780	0.5757	勉强协调	勉强协调—煤炭开发滞后
2016	0.7186	0.8119	0.7653	0.6180	中级协调	中级协调—同步发展
2017	0.7414	0.8035	0.7724	0.6212	中级协调	中级协调—同步发展
2018	0.8480	0.7977	0.8228	0.6413	中级协调	中级协调—同步发展

4.3 驱动机制

本研究从城市社会—经济—自然复合生态系统理念出发，遵循指标选取的科学性、系统性、可获得性等原则，参考现有相关研究^[35-37]，从经济子系统、社会子系统、生态子系统 3 个方面选取 6 项指标作为淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展外部驱动因素。经济子系统方面，考虑到经济发展水平决定了生态治

理与修复的资金基础^[9]，煤炭资源型城市转型的核心是产业转型^[17]，均对两者协调发展具有重要作用，选取人均 GDP、第三产业产值占比作为具体指标。社会子系统方面，考虑到人力资本、科技创新是资源型城市转型实现高质量发展的关键^[36]，两者直接促进煤炭开发技术创新与应用，减少煤炭开发对生态环境的破坏，有利于两者协调发展，选取科学技术财政支

出、平均每万人在校大学生作为具体指标。生态子系统方面,开展生态治理与修复,提高生态环境质量可以缓解生态系统服务的下降趋势^[5],是两者协调发展的关键因素,选取工业固废利用率、公园绿地面积作为具体指标。

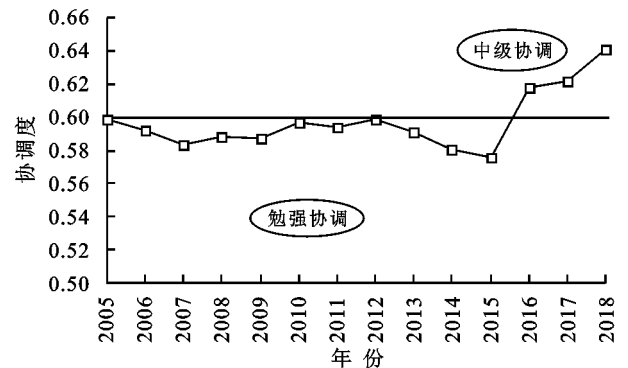


图 4 淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度时序变化

根据表 6 可知,经济发展、产业转型、人力资本、环境污染治理、居民生活环境 5 个驱动因素与协调度的关联度都在 0.6 以上,属于较强关联。其中,环境污染治理、居民生活环境和产业转型与协调度的关联度分别为 0.910 2,0.817 8,0.807 0,属于极强关联,这说明淮南市环境污染治理、居民生活环境需求和产业转型是煤炭开发与生态系统服务协调发展的最重要驱动因素。科技创新投入关联度仅为 0.512 3,这说明淮南市科技创新在促进煤炭开发与生态系统服务协调发展方面还未起到重要作用。驱动因素按其影响程度从强到弱排序依次为:环境污染治理>居民生活环境>产业转型>人力资本>经济发展>科技创新投入。

表 6 淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度驱动因素及排序

系统层	驱动因素	指标	关联度	排序
经济子系统	经济发展	人均 GDP(万元/人)	0.6622	5
	产业转型	第三产业产值占比(%)	0.8070	3
社会子系统	科技创新投入	科学技术财政支出(万元)	0.5123	6
	人力资本	平均每万人在校大学生(人)	0.7870	4
生态子系统	环境污染治理	工业固废利用率(%)	0.9102	1
	居民生活环境	公园绿地面积(hm ²)	0.8178	2

(1) 环境污染治理。环境污染治理与协调发展的关联度高达 0.910 2,这说明淮南市环境污染治理是影响淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度变化的最重要因素,这与杨霞等^[36]研究结果接近,其认为环境污染问题的解决是促进淮南市城市转型高质量发展的最重要因素。淮南市大规模煤炭开发引发严重生态环境问题,开展生态治理工作有助于减少煤炭开发的环境成本,提高煤炭开发的综合效益与水平,并缓解生态系统服务下降趋势。根据笔者统计,淮南市 2005—2018 年工业固体废弃物利用率平均值高达 87%,由于淮南市工业固体废弃物主要来

自煤炭开发与燃烧过程,这有力的缓解了煤炭开发引起的生态环境问题,促进该地区煤炭开发与生态系统服务协调发展。

(2) 居民生活环境。居民生活环境与协调发展的关联度为 0.817 8,这说明居民对生活环境的需求是影响淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度变化的重要因素。长期以来,淮南市不断破坏的生态环境与居民日益增加的生活环境质量要求形成了尖锐的矛盾。为了满足淮南市居民对生活环境质量的要求,淮南市不断推进绿色矿山和采煤塌陷区生态修复与综合治理工作^[16],生态环境质量得到显著提升,以上有效的促进了煤炭开发与生态系统服务协调发展。根据笔者统计,淮南市 2005—2018 年公园绿地面积保持稳步上升趋势,由 2005 年的 370 hm² 上升至 2018 年的 1 549 hm²,居民生活环境不断改善,这对该地区煤炭开发与生态系统服务协调发展具有重要作用。

(3) 产业转型。产业转型与协调发展的关联度达 0.807 0,这说明优化产业结构、推动产业转型升级是促进淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展的重要举措。加快推进资源型城市产业转型升级,提高第三产业比重,促进生态环境质量不断提升,有利于淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展^[17]。根据笔者统计,淮南市 2005—2018 年第三产业比重呈现“U 型”变化趋势,其中,2005—2012 年淮南市第三产业比重均值为 0.31,远低于同期全国平均水平 0.43。2013 年以来,淮南市第三产业比重持续上升至 0.43,对生态环境的破坏不断减少,有力的促进煤炭开发与生态系统服务协调发展。

(4) 人力资本。人力资本与协调发展的关联度达 0.787 0,这说明人力资本是影响淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度变化的重要因素。每万人在校大学生数是衡量地区人力资本存量水平的重要指标,根据笔者统计,2005—2018 年淮南市平均每万人在校大学生数保持在 272 人左右,大约是全国平均水平的 1.5 倍,同时也远高于山西、内蒙古、河南等煤炭资源丰裕省份的平均每万人在校大学生数。高水平人力资本为该市绿色低碳转型与经济高质量发展提供了丰富的人才储备,同时也助推该市煤炭开发技术和污染防治技术升级,有力的促进煤炭开发与生态系统服务协调发展^[38]。

(5) 经济发展。与居民生活环境需求、人力资本和产业转型相比,淮南市经济发展与协调发展的关联度相对较低,仅为 0.662 2,这可能与淮南市经济发展水平较低有关。经济发展水平的升高,有利于更多资金流入生态修复与综合治理领域,促进生态环境质量

不断改善^[39]。根据笔者统计,淮南市 2005—2018 年人均 GDP 均值仅为 2.63 万元,远低于同期全国人均 GDP 平均水平,这也就经济发展对协调度的驱动力相对较低提供了合理解释。该市应继续聚焦于产业转型升级,破除“资源诅咒”,不断提高经济发展水平,促使更多资金流入生态修复与综合治理领域,实现煤炭开发与生态系统服务高水平协调发展。

(6) 科技创新投入。科技创新投入与协调发展的关联度仅为 0.512 3,这说明目前淮南市科技创新投入对二者协调发展促进作用较小。科技创新支出为煤炭产业升级与城市污染防治提供了有力的技术支撑,对提升生态环境质量起到重要作用^[40]。根据笔者统计,淮南市 2005—2018 年科学技术财政支出保持不断上升趋势,已增至 4.02 亿元。但是其对二者之间的协调度驱动作用较小,这说明淮南市科技创新财政支出需要进一步加大,需明确认识到科技创新在资源型城市转型中的重要作用,为煤炭产业技术升级与污染防治攻坚战提供有力支撑,不断改善生态环境质量,实现煤炭开发与生态系统服务高水平协调发展。

5 结论与展望

(1) 煤炭开发与生态系统服务协调发展演变规律具有显著的阶段性特征,伴随煤炭资源型城市发展的生命周期性,会依次经历失调阶段、过渡阶段、协调发展 3 个阶段,并通过产业转型升级、技术升级、人居环境改善、环境治理投资等驱动机制促使煤炭开发与生态系统服务协调性不断改善,实现煤炭开发与生态环境的协调发展。基于相关经验数据,采用协调度模型对协调发展演变规律进行检验,演变规律得到证实。

(2) 2005—2018 年淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度基本处于 0.5,0.7 之间,二者协调发展度呈现上升趋势,由 2005 年的 0.598 3 上升为 2018 年的 0.641 3,由勉强协调—煤炭开发滞后阶段逐步过渡到中级协调—同步发展阶段,二者协调性不断改善,综合发展水平不断接近,呈现同步协调发展态势,基本实现了煤炭开发与生态环境的协调发展。

(3) 环境污染治理、居民生活环境需求、产业转型是淮南市煤炭开发与生态系统服务协调发展的主要驱动因素,其与协调发展的关联度分别为 0.910 2,0.817 8,0.807 0,其余驱动因素作用强度排序依次为人力资本>经济发展>科技创新投入。因此需继续开展生态修复与综合治理工作,通过产业结构升级、人力资本结构升级推进区域经济绿色低碳转型,以保持该地区煤炭开发与生态系统服务的同步协调发展态势。

本文基于协调度模型和灰色关联模型揭示了 2005—2018 年淮南市煤炭开发与生态系统服务协调度时序变化规律及主要驱动因素,实证研究结果能较好的切合煤炭资源型城市发展的实际情况,研究结论进一步丰富了煤炭开发与生态系统协调发展理论。同时为了更全面、清晰地厘清煤炭开发与生态系统服务协调发展及驱动因素,未来研究应关注以下几方面:(1) 研究方法需进一步拓展,已有研究通过相关性分析、回归分析等方法分析驱动因素,未来拟考虑采用以上方法开展协调发展的驱动因素研究;(2) 研究区域可进一步延伸,由于自然资源禀赋不同,神东、陕北、晋北、晋中等煤炭地区的协调度时序变化及其驱动因素将会有所差异,未来可进行研究并对比分析;(3) 研究视角需进一步拓宽,煤炭开发与生态系统服务时空协调发展具有重要意义,后续将开展二者时空协调发展及其驱动因素的相关研究。

参考文献:

- [1] Bi J, Hao R, Li J, et al. Identifying ecosystem states with patterns of ecosystem service bundles[J]. *Ecological Indicators*, 2021,131:108195.
- [2] 于媛,韩玲,李明玉,等.哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J].*水土保持研究*,2021,145(2):293-300.
- [3] Li L, Lei Y, Wu S, et al. Study on the coordinated development of economy, environment and resource in coal-based areas in Shanxi Province in China: Based on the multi-objective optimization model [J]. *Resources Policy*, 2018,55:80-86.
- [4] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].*地理学报*,2018,73(7):1242-1252.
- [5] 娜仁,李康玮,万伦来,等.淮北市煤炭开发与生态系统服务度研究[J].*环境科学研究*,2019,032(012):2048-2056.
- [6] Li F, Liu X, Zhao D, et al. Evaluating and modeling ecosystem service loss of coal mining: a case study of Mentougou district of Beijing, China [J]. *Ecological Complexity*, 2011,8(2):139-143.
- [7] Xiao W, Fu Y, Wang T, et al. Effects of land use transitions due to underground coal mining on ecosystem services in high groundwater table areas: A case study in the Yanzhou coalfield[J]. *Land Use Policy*, 2018,71:213-221.
- [8] 王宏英,葛维奇,曹海霞.中国生态环境可承载的煤炭产能研究[J].*中国煤炭*,2011,37(3):10-14.
- [9] 闫敬旺,王树斌,刘朝军.黄河流域煤炭产业发展和生态环境保护的协调发展研究[J].*煤炭经济研究*,2021,41(6):27-34.
- [10] 杜左龙,陈闻君.煤炭产业与生态环境协调发展的评价研

- 究;以新疆为例[J].长春大学学报,2014,24(5):573-576.
- [11] Liu Z. Systematic dynamics analysis of coal city coordination development[J]. *Energy Procedia*, 2011,5(1): 2486-2493.
- [12] Xiao W, Chen W, Deng X. Coupling and coordination of coal mining intensity and social-ecological resilience in China[J]. *Ecological Indicators*, 2021,131:108167.
- [13] Fang X, Shi X, Phillips T K, et al. The coupling coordinated development of urban environment towards sustainable urbanization: An empirical study of Shandong Peninsula, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129:107864.
- [14] Wang D, Wan K, Yang J. Measurement and evolution of eco-efficiency of coal industry ecosystem in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,209:803-818.
- [15] Miao C, Sun L, Yang Y. Evaluation method for coalmining-based cities ecosystem based on attribute mathematical model with Huainan City as an example[J]. *Ecological Indicators*, 2015,48:17-21.
- [16] 吴鹏.论采煤塌陷区生态修复法律制度的完善:以淮南市采煤塌陷区为例[J].*资源科学*,2013,35(2):455-461.
- [17] 朱茂宗.基于产业结构调整的淮南资源型城市转型策略分析[D].安徽淮南:安徽理工大学,2018.
- [18] 王彦超,蒋亚含.竞争政策与企业投资:基于《反垄断法》实施的准自然试验[J].*经济研究*,2020,55(8):137-152.
- [19] 方传棣,成金华,赵鹏大.大保护战略下长江经济带矿产—经济—环境耦合协调度时空演化研究[J].*中国人口·资源与环境*,2019,29(6):65-73.
- [20] 朱晓青,黄志豪,章天成,等.资源型城市国土开发强度与生态承载力时空耦合特征及驱动要素解析:以马鞍山市为例[J].*水土保持研究*,2020,27(4):317-326,335.
- [21] 程慧,徐琼,郭尧琦.我国旅游资源开发与生态环境耦合协调发展的时空演变[J].*经济地理*,2019,39(7): 233-240.
- [22] 任祁荣,于恩逸.甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析[J].*生态学报*,2021,41(8):2944-2953.
- [23] Jiang Y, Sun S, Wang Y, et al. Niche Evolution of China's Provincial Social-Economic-Natural Complex Ecosystems, 2005—2015[J]. *Sustainability*, 2018,10 (8): 2824.
- [24] 吴大放,胡悦,刘艳艳,等.城市开发强度与资源环境承载力协调分析:以珠三角为例[J].*自然资源学报*,2020, 35(1):82-94.
- [25] 李国敏,杨惠馨,李玮.基于耦合协调度的煤炭行业高质量发展评价体系研究[J].*煤炭经济研究*,2019,39 (5):38-44.
- [26] 方创琳,毛汉英.兖滕两淮地区采煤塌陷地的动态演变规律与综合整治[J].*地理学报*,1998,53(1):24-31.
- [27] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].*自然资源学报*,2008,23(5): 911-919.
- [28] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].*地理研究*,2012,31(10):1775-1784.
- [29] 胡喜生,洪伟,吴承祯.土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用:以福州市为例[J].*资源科学*,2013,35(1):30-41.
- [30] 宋思远,张帆,张海飞,等.安徽湿地生态系统服务价值评估及生态经济分析[J].*湿地科学与管理*,2017,13 (3):21-26.
- [31] Zhang X, Xie H, Shi J, et al. Assessing changes in ecosystem service values in response to land cover dynamics in Jiangxi Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020,17(9):3018.
- [32] 邓舒洪.区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D].浙江杭州:浙江大学,2012.
- [33] Wang M, Wang K. Exploring water landscape adaptability of urban spatial development base on coupling coordination degree model a case of Caidian District, Wuhan[J]. *Sustainability*, 2021,13 (3):1475.
- [34] 任喜萍,殷仲义.中国省域人口集聚、公共资源配置与服务业发展时空耦合及驱动因素[J].*中国人口·资源与环境*,2019,29(12):77-86.
- [35] 张琪,郑刘根,刘辉,等.煤炭资源型城市生态—经济—社会协调发展分析:以淮南市为例[J].*应用生态学报*, 2019,30(12):4313-4322.
- [36] 杨霞,李方虎,华小全.基于结构方程模型的资源型城市转型影响因素分析:以安徽省淮南市为例[J].*科技导报*,2021,39(13):84-92.
- [37] 曾贤刚,段存儒.煤炭资源枯竭型城市绿色转型绩效评价与区域差异研究[J].*中国人口·资源与环境*,2018, 28(7):127-135.
- [38] Akar N D, Gedikli A, Erdoan S, et al. Exploring the nexus between human capital and environmental degradation: The case of EU countries[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,295:113057.
- [39] Qin X, Li X. Evaluate on the decoupling of tourism economic development and ecological-environmental stress in China[J]. *Sustainability*, 2021,13(4):2149.
- [40] Xie Z, Wu R, Wang S. How technological progress affects the carbon emission efficiency? Evidence from national panel quantile regression[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,307:127133.