

DOI: 10.5846/stxb202206091640

李思雅, 梁伟, 吕一河, 纪秋磊, 严建武, 兰志洋. 黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析. 生态学报, 2023, 43(13): 5417-5431.

Li S Y, Liang W, Lü Y H, Ji Q L, Yan J W, Lan Z Y. Decoupling relationship and driving effect between economic development and eco-environmental pressure in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5417-5431.

黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析

李思雅¹, 梁 伟^{1,*}, 吕一河², 纪秋磊², 严建武¹, 兰志洋¹

¹ 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

² 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 经济发展与生态环境的协调平衡是推动黄河流域高质量发展的重要途径之一, 这对区域经济一体化高质量发展和生态环境健康可持续具有重要的现实意义。以黄河流域 379 个区县为研究对象, 基于熵值-TOPSIS 综合评价法和 Tapio 脱钩模型动态解析 1990—2018 年经济发展与生态环境压力的脱钩关系, 引入结构分解模型(SDA)探讨影响生态环境压力的驱动因素, 并运用因果诊断算法(PCMC)推断驱动经济发展与生态环境压力脱钩的因果关联路径。结果表明: (1) 黄河流域 70% 的区县生态环境压力处于较低压和低压, 但因资源条件禀赋经济得以快速发展的内蒙古地区生态环境仍承载着较高压和高压。(2) 生态环境压力主要受技术效应和经济效应驱动, 技术效应的驱动作用实现经济产出并缓解了生态环境压力, 经济效应的驱动作用在流域中下游地区更为突出。(3) 黄河流域 68.34% 的区县实现了经济发展与生态环境压力的有效脱钩(强脱钩和弱脱钩), 经济总量增长的同时减小了生态环境承载的压力, 但黄河流域各区县经济发展与生态环境压力的脱钩类型处于动态变化之中, 应防范强脱钩或弱脱钩类型的区县倒退至负脱钩类型。(4) 以乡村人口和城镇化率要素为代表的人口因子有效驱动了黄河流域经济发展与生态环境压力脱钩, 其中乡村人口与脱钩指数出现因果关系的频率最高, 城镇化率要素与脱钩指数的因果强度最大, 农业技术因子主导了最多的区县实现经济发展与生态环境压力脱钩, 农业结构多样化和农业集约化缓解了经济发展对生态环境的压力。研究结果对提高经济高质量发展与生态环境保护的可持续性具有可推广的实践价值。

关键词: 经济发展; 生态环境压力; 脱钩模型; 因果诊断; 黄河流域

Decoupling relationship and driving effect between economic development and eco-environmental pressure in the Yellow River Basin

LI Siya¹, LIANG Wei^{1,*}, LÜ Yihe², JI Qiulei², YAN Jianwu¹, LAN Zhiyang¹

¹ School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

² State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The harmonious balance between economic development and the eco-environment is one of the essential ways to promote the high-quality development of the Yellow River Basin, which is of great practical significance to the high-quality development of regional economic integration and the healthy and sustainable ecosystem. This study takes 379 districts and counties in the Yellow River Basin as the research objects. The decoupling relationship between economic development and eco-environmental pressure from 1990 to 2018 was dynamically analyzed based on the Entropy-TOPSIS comprehensive evaluation method and the Tapio decoupling model. We also introduced the structural decomposition model to explore the

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(42071144)

收稿日期: 2022-06-09; 网络出版日期: 2023-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangwei@snnu.edu.cn

driving factors affecting the eco-environmental pressure, and used the PCMC algorithm to infer the causal association paths driving the decoupling of economic development and eco-environmental pressure. The results demonstrate that: (1) 70% of the districts and counties are under low pressure in the Yellow River Basin, but the eco-environment in the Inner Mongolia, where the economy has developed rapidly due to the endowment of resource conditions, still carries high pressure. (2) The eco-environmental pressure is mainly driven by technical effects and economic effects. The driving effect of technology promotes the economic output and reduces the eco-environmental pressure, while the driving effect of the economy is more prominent in the middle and lower reaches of the Basin. (3) 68.34% of the districts and counties have achieved effective decoupling between economic development and eco-environmental pressure (strong decoupling and weak decoupling) in the Yellow River Basin. The total economic growth has reduced the pressure on the eco-environment load, but the type of decoupling between economic development and eco-environmental pressure is in dynamic changes. The districts and counties with strong or weak decoupling should be prevented from falling back to negative decoupling. (4) The demographic factors represented by rural population and urbanization rate effectively drive the decoupling of economic development from eco-environmental pressure in the Yellow River Basin. The rural population has the highest frequency of causality with the decoupling index and the urbanization rate has the most incredible causal intensity with the decoupling index. The agricultural technology factors dominate the decoupling of economic development from eco-environmental pressure in the largest number of districts and counties, and the diversification and intensification of farming structures alleviate the pressure of economic development on the eco-environment. The research has an implementable practical value for improving the sustainability of high-quality economic development and eco-environment protection.

Key Words: economic development; eco-environmental pressure; Tapio Model; causal diagnosis; Yellow River Basin

随着人类文明的不断推进,全球城市化发展迅速,城市人口已从 1990 年的 22.9 亿增加到 2018 年的 42.2 亿^[1]。中国作为人口大国,世界上最大的发展中国家,自改革开放以来,国民经济飞速增长,国内生产总值(GDP)已由 1990 年的 1.90 万亿元增加到 2018 年的 90.06 万亿元,城市化水平由 1990 年的 26.4% 增长至 2018 年的 59.6%,创造了世界发展史上的奇迹^[2]。随着全球生产交流的不断深化,区域经济发展和生态建设遭受越来越多的挑战,危机的蔓延深度和广度明显提升,加之工业化与城镇化的快速推进,城市空间扩张、资源过度消耗和生态环境污染也给人类带来了沉重的生存压力^[3]。大城市的工业发展遵循“高耗能”、“高排放”的模式,其经济增长通常以生态环境的自然资源如土地、森林、水和能源为代价^[4]。尽管中国为实现可持续发展付出了巨大努力^[5],但由经济快速发展带来的环境问题如土地退化、气候变化以及温室效应仍未避免^[6]。因此,为确保社会生态系统的可持续发展,应权衡经济增长对生态环境的影响。经济增长能够衡量国家或地区的经济发展规模,其受到自然资源、技术创新水平、人力资本集聚以及生态环境质量等多重因素的影响;生态系统结构关系到社会经济的有序发展,只有人类活动对生态环境的干扰在生态承载力范围之内,才能稳固社会-经济-生态复合系统的可持续发展。社会经济发展和生态环境质量相互作用的模式已成为学者们关注的热点^[7-8],二者相互作用关系的研究既是人类活动对生态环境压力和自然资源利用效率的评估,也是地理学界研究人地系统耦合的真实写照^[9]。

黄河流域作为中国重要的生态屏障和发展区域,在国家的经济建设和生态保护领域中有着重要作用^[10],流域的生态保护和高质量发展已上升为国家发展战略^[11]。黄河流域文化底蕴久远、产业体系完备、经济基础扎实、市场前景广阔,但由于地区之间经济发展水平差异较大、自然资源分布不均及贫困地区相对集中等方面的自身特殊性^[12],呈现出水资源短缺制约经济发展^[13]、产业结构偏向资源依赖^[14]等地带性问题,这些问题不仅限制了黄河流域经济的可持续发展,还加剧了流域生态环境负担。在资源约束趋紧、环境逐渐恶化的背景下如何剖析经济增长与生态环境压力的协调关系是亟需解决的重要科学问题。为此,相关学者在黄河流域开展了大量研究^[15-20],证明在过去几十年中黄河流域的社会和生态层面都发生了剧烈的变化,但已有研究多

是对经济发展或生态环境的表象进行刻画与描述,对经济发展和生态环境相互作用的认识仍不够全面,缺乏二者相互作用关系的综合系统论述^[21],对系统间的复杂交互作用考虑较少。单一过程的研究无法深刻解析区域综合的社会经济发展与生态环境压力的主要矛盾,也不利于整个区域的经济发展规划和生态环境治理^[22]。而脱钩理论为上述问题的解决提供了基本思路,能够动态的监测经济发展与生态环境压力的耦合关系变化,因果网络分析也以新的视角为二者的耦合关系研究开拓了系统性的思维,能够挖掘经济发展与生态环境压力复杂交互作用的关键要素及要素间的因果关联路径,实现经济发展与生态环境压力空间演化机制的过程解析,更高层次地剖析黄河流域经济增长与生态环境保护之间的关键点。

鉴于此,本文以黄河流域为研究对象,构建了经济发展与生态环境压力脱钩的分析体系,利用脱钩理论和因果诊断算法解析经济发展与生态环境压力的脱钩关系以及驱动脱钩关系变化的因果网络,实现经济发展与生态环境压力脱钩的过程解析,动态并系统地表征区域经济发展与生态环境压力脱钩的相互作用机制。研究结果有助于协调社会经济发展与生态环境保护的步伐,旨在为实现区域经济一体化高质量发展提供决策参考,为促进黄河流域生态环境健康可持续提供科学有效支撑。

1 研究区概况

研究区覆盖黄河流域和黄土高原(下文简称为黄河流域),区域总面积为 96.7 万 km²,约为中国领土的十分之一^[23]。研究区海拔高度-52—6254m,涵盖山脉、盆地、丘陵等多种地貌类型^[24],属温带季风气候,年平均温度为-4—14.3℃,地区年降水量普遍在 200—650mm 之间,呈东南多、西北少的空间分布格局。黄河发源于青藏高原,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等省份,最终流入渤海,上游的河套平原、中游的汾渭平原以及下游的河南引黄灌区都是重要的农产品基地^[25]。黄土高原位于中国中北部,为四大高原之一^[26],由于植被稀疏,夏季降雨量较为集中,流水侵蚀作用强,同时煤炭、石油和天然气等能源丰富,是我国典型的生态脆弱敏感区和重要的能源化工基地,也是生态恢复和生态文明建设的重点区域^[27]。近年来,虽黄河流域的经济发展、生态保护都取得了实质性进展,但流域自然本底值小、森林植被覆盖率低、水资源短缺等问题使得经济增长对生态环境仍具有较高的依存性,面临着严峻的生态环境压力,能源富集地区的开采也处于采掘和粗加工状态,产业规模得不到集聚。人地矛盾突出,亟需关注人地系统演化机理与优化调控路径,探究黄河流域经济发展与生态环境压力的耦合关系演变以及社会生态系统动态^[28]。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

本研究首先运用熵值-TOPSIS 综合评价法^[29]测算黄河流域的生态环境压力值,然后基于结构分解模型(Structural decomposition analysis, SDA)^[3]解释生态环境压力的时空演变,进一步将生态环境压力值与地区生产总值指标引入 Tapio^[30]模型动态评估黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系,最后运用 PCMC^[31]因果网络推断驱动经济发展与生态环境压力脱钩的关键要素与要素间的因果关联路径,实现经济发展与生态环境压力脱钩的过程解析,依据研究结果阐明重要意义。研究框架如图 1 所示:

2.1.1 熵值-TOPSIS 综合评价

熵值法是通过计算指标的信息熵,根据各项指标的相对变化程度对系统的影响来决定指标的权重^[32];TOPSIS 是通过逼近理想最优解的综合距离来评估方案系统中各个方案的优劣等级^[29]。具体计算方法参考孙涵^[29]等。

2.1.2 结构分解模型

结构分解模型(SDA)是用于探究系统影响因子的典型方法,原理是将因变量分解为影响因变量的自变量,通过计算自变量变化对因变量变化的贡献度来解释其影响机理^[3],拓展了分解深度,受到众多研究学者的青睐,是一种精密的分解方法。计算公式为:

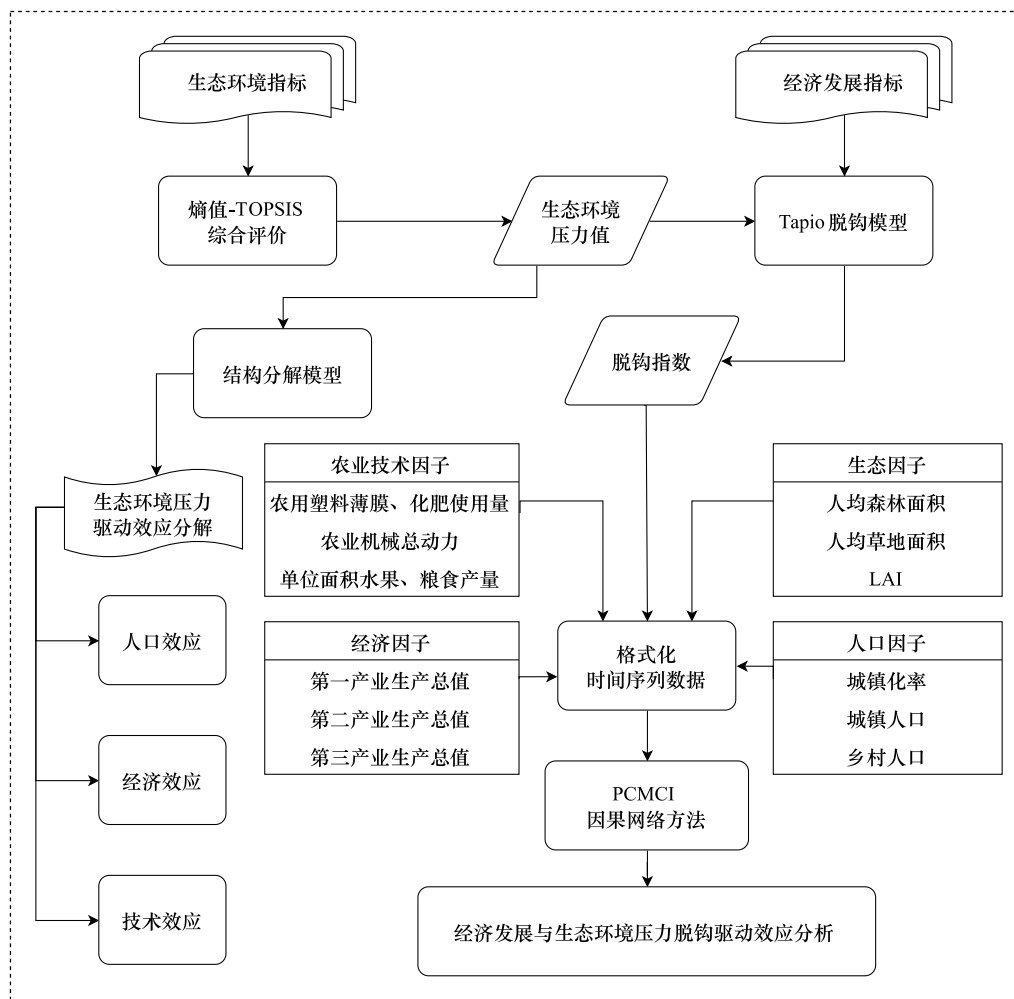


图1 经济发展与生态环境压力脱钩关系及其驱动效应研究框架

Fig.1 Research framework of decoupling relationship and driving effect between economic development and eco-environmental pressure

$$EP = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{EP}{GDP} = P \times G \times T \quad (1)$$

式中: EP 为生态环境压力; P 为人口, 表征人口效应; G 为人均生产总值, 表征经济效应; T 为单位经济产出对生态环境的压力, 表征技术效应, 技术效应值越高, 生态环境压力越大。

2.1.3 Tapio 脱钩模型

“脱钩”(Decoupling)也称为“解耦”, 源于物理学领域, 是指具有影响关系的两个或多个物理量不再具有相互关系^[33]。经典的脱钩模型主要有 Tapio^[30]提出的弹性系数和经济合作与发展组织(OECD)提出的脱钩因子两种, 与后者相比, 前者的脱钩评价体系较为全面, 能够避免选择基期带来的影响, 通过引入增量数据来动态表现脱钩。计算公式为:

$$DI = \frac{(EP_t - EP_{t-1}) / EP_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1}) / GDP_{t-1}} = \frac{\Delta EP}{\Delta GDP} \quad (2)$$

式中: DI 为脱钩指数; EP_t 、 EP_{t-1} 表示黄河流域各区县在 t 、 $t-1$ 年的生态环境压力值; GDP_t 、 GDP_{t-1} 表示黄河流域区县在 t 、 $t-1$ 年的经济总量; ΔEP 为生态环境压力增长率; ΔGDP 为经济增长率。

Tapio 脱钩模型中经济发展层的评价指标为地区生产总值, 生态环境压力层的评价指标为人均耕地面积、人均果园与梯田面积、人均城镇用地面积。模型以脱钩指数的 0、0.8、1.2 为临界值将脱钩类型划分为

8 类^[34],本研究根据脱钩关系的具体含义,将其整理为强脱钩、弱脱钩、扩张连接、弱负脱钩及负脱钩 5 种类型。强脱钩和弱脱钩状态属于有效脱钩状态,扩张连接属于一般状态,弱负脱钩和负脱钩属于不可持续状态。

2.1.4 PCMCI 因果网络

PCMCI^[31]因果网络方法遵循图因果模型框架,能够适应不同类型的数据,将线性或非线性条件独立测试与因果识别算法灵活地结合在一起,可以从大规模时间序列数据集中估算因果网络,具有比诸如 Lasso 或 Granger 因果关系之类的方法高得多的检测能力^[31]。

PCMCI 方法包含两部分:(1) PC_1 条件选择,以识别所有时间序列变量的相关条件,(2) 瞬时条件独立性 (MCI) 测试。计算公式为:

$$PC: X_t^i = f_j(P(X_t^i), \eta_t^i) \quad (3)$$

$$MCI: X_{t-\tau}^i \text{ not } \perp\!\!\!\perp X_t^i \mid \hat{P}(X_t^i) \setminus \{X_{t-\tau}^i\}, \hat{P}(X_{t-\tau}^i) \quad (4)$$

式中: X_t^i 为基本时间依附系统; $X_{t-\tau}^i$ 为时间变化系统; f_j 为潜在非线性函数依赖关系; η_t^i 为相互独立的动态噪声; $P(X_t^i)$ 为变量 X_t^i 的因果双亲。 PC_1 是一种基于 PC 稳定算法的马尔科夫算法,通过迭代独立性测试去除变量中的不相关条件;MCI 测试推断高度相互依赖的变量间的因果关系,以控制假阳性率。结合 PC 算法和 MCI 测试可以从大规模时间序列数据集中诊断因果网络^[31]。

本研究综合考虑了影响经济发展和生态环境压力脱钩关系的人口、经济、生态以及农业技术因子,将这些因子的代表性指标连同脱钩指数一起输入 PCMCI 因果网络算法,构建包含脱钩指数和各指标节点的因果网络。人口因子指标包括城镇化率、城镇人口、乡村人口;经济因子指标为第一、二、三产业生产总值;生态因子指标包括叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)、人均森林面积、人均草地面积;农业技术因子涵盖单位面积园林水果产量、单位面积粮食产量、农业机械总动力、农用化肥施用量、农用塑料薄膜使用量等指标。

在因果网络中,网络节点的连边数表征两个要素节点出现因果关系的频率,表现为网络图中的连边粗细;网络节点的度表征各要素节点参与的因果系数^[35],表现为网络图中的节点大小;各要素节点对目标节点的平均因果强度表征各要素节点与目标节点因果联系的强烈程度。

2.2 数据来源

本研究使用的数据包括自然变量、土地利用和社会经济数据,数据列表如表 1 所示。

表 1 数据列表
Table 1 The data list

数据类型 Data type	数据名称 Data name	单位 Unit	数据来源 Data source	时空分辨率 Spatio-temporal resolution
自然变量 Natural variable	叶面积指数 (LAI)	—	美国国家海洋大气局 (NOAA)	d/0.05°
土地利用 LUCC	耕地	—	Ji, Liang 等 ^[23]	a/90m
	草地	—		
	森林	—		
	城镇用地	—		
	果园与梯田	—		
	城镇人口、乡村人口	万人		
社会经济 Socio-economy	城镇化率	%	各省(市)统计年鉴统计局官网	a
	第一、二、三生产总值	万元		
	单位面积园林水果产量	t/km ²		
	单位面积粮食产量	t/km ²		
	农业机械总动力	万 kW		
	农用化肥施用量	t		
	农用塑料薄膜使用量	t		

使用的自然变量数据为 LAI,该数据集源自于 NOAA 系列卫星 AVHRR 传感器的地表反射率产品,时间分辨率为 1d,空间分辨率为 0.05°。

土地利用数据来源于 Ji^[23] 等所生产的 1986—2018 年长时间序列的黄河流域土地利用数据,空间分辨率为 90m。数据主要包括耕地、森林、草地、城镇用地和果园与梯田等利用类型,该数据集中增加果园与梯田分类,符合黄河流域大面积梯田建设的真实情况。

黄河流域 1990—2018 年 379 个区县的社会经济数据来源于国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心 (<http://loess.geodata.cn/>)、各省(市)统计年鉴以及统计局官网;数据缺失部分采用线性插值法进行填补。

3 结果与分析

3.1 经济发展与生态环境压力时空演变

基于熵值-TOPSIS 综合评价法测算了黄河流域生态环境压力值,将其与人均生产总值进行叠加,每隔 5 年进行空间展示(图 2)。生态环境压力采用自然间断法分类,人均生产总值根据研究和文献资料划分为低、中等、较高和高收入 4 个等级。

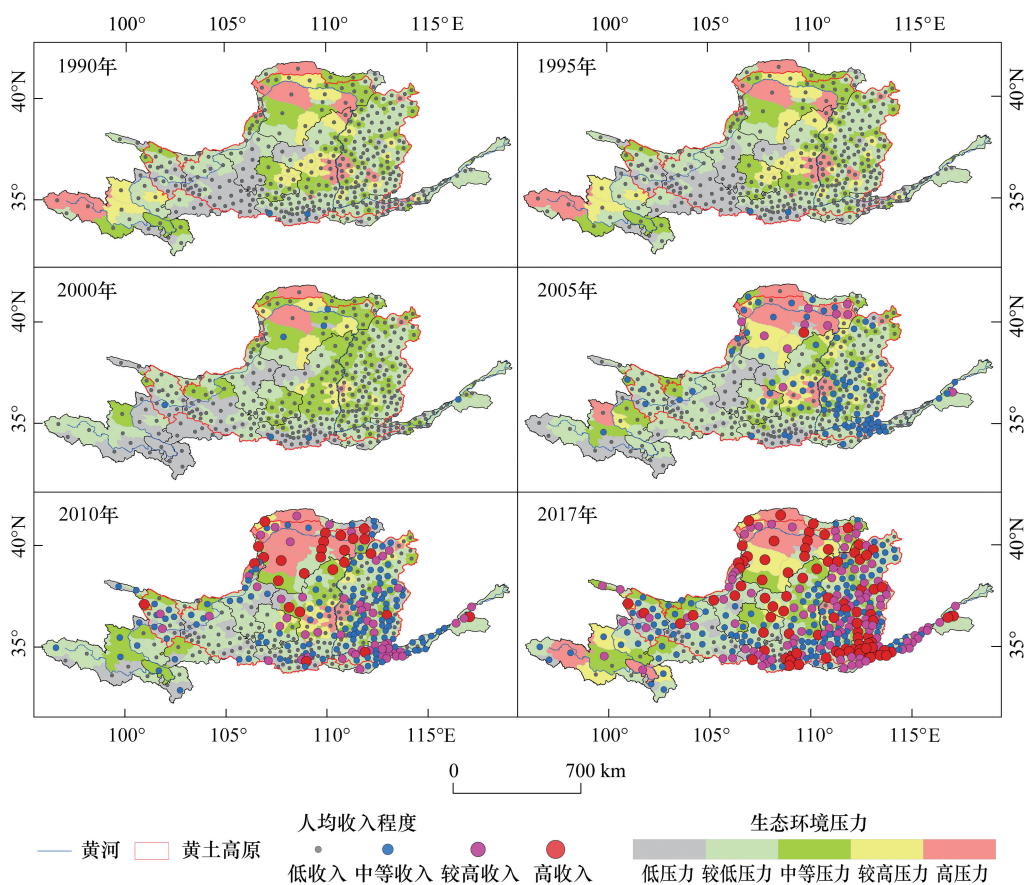


图 2 经济增长与生态环境压力的时空分布

Fig.2 The spatio-temporal distribution of economic growth and eco-environmental pressure

研究发现黄河流域的人均生产总值具有明显的时空异质性。1990—1995 年黄河流域区县均为低收入等级(图 2);2000 年内蒙古鄂尔多斯市出现中等收入区域;2005 年较多区县由低收入转化为中等和较高收入等级,其中转化为中等收入地区主要位于河南省、河套灌区以及陕西延安市,转化为较高收入地区分布于内蒙古鄂尔多斯和呼和浩特市;2010 年内蒙古鄂尔多斯和呼和浩特市率先进入高收入地区,鄂尔多斯经济的高速发展可能得益于 20 世纪末紧抓国家能源战略西移的机遇,于 2000 年实现了由农牧业经济主导转变为以工业经

济为主导,推动了经济的繁荣;研究期间的 29 年中 49.34%的低收入地区向中等收入转化,26.12%的地区向较高收入转化,山西太原、河南郑州、陕西西安等地已进入高收入水平。

黄河流域生态环境压力的空间异质性较时间异质性更为突出。研究期间内六盘山、汾渭平原和黄河下游地区的生态环境总体位于较低压和低压(图 2),这可能得益于退耕还林还草和天然林保护等生态工程带来的植被覆盖度的极大提升,这些生态工程的实施对生态环境的保护成效明显,使得生态环境压力一直处于可持续的范围内,有研究发现退耕还林还草生态工程实施后植被覆盖度的增长速率为生态工程实施前的 10 倍^[36]。另外黄河源区生态环境质量明显好转,2000 年之前黄河源区的 7 个区县生态环境承载着较高压和高压,2000 年之后这些区县的生态环境压力逐渐向较低压和低压转化,生态压力的减轻可能源于退化湿地恢复、草地综合治理等措施对草原生态系统的有效修复,促进了生态环境的良性发展,遥感监测也表明 2000 年之后实施的生态恢复工程扩大了低覆盖率和较高覆盖率草原的面积,这将有助于改善黄河源区的生态水文循环^[37]。中等压力地区主要分布于陕西榆林、延安和山西忻州、临汾市等地,这些工业发达的地区实行工业反哺农业的举措既促进了产业结构均衡发展,也有助于减小生态环境的压力。较高压力和高压地区主要位于内蒙古自治区,该地区以煤炭、天然气为代表的能源奠定了全国重要能源化工基地的地位^[38],虽资源条件禀赋,但经济发展的同时生态环境承载的压力也较高,给生态环境保护带来了巨大挑战。

3.2 生态环境压力的驱动效应分析

运用 SDA 测算了影响黄河流域生态环境压力的人口、经济和技术效应的绝对贡献率,研究发现,影响黄河流域生态环境压力的因素主要是经济效应(42.99%)和技术效应(49.37%),人口效应和经济效应对生态环境压力的驱动为增量作用,技术效应对生态环境压力的驱动为减量作用。

黄河流域的人口效应于 1990—1997 年对生态环境压力的驱动作用逐渐上升,1998—2003 年对生态环境压力的驱动作用逐渐回落,而后又逐渐增强,于 2014 年达到顶峰,贡献率达 15.58%,总体趋势正向发展,随着人口数量的增长,生态环境压力也逐渐提高(图 3)。人口效应对生态环境压力的驱动作用具有较明显的空间异质性,69.92%的区县人口效应对生态环境压力的贡献率低于 9%,经济发展较好的地区人口效应对生态环境压力的驱动作用高于经济欠发达的地区,例如陕西榆林、河南郑州以及山西吕梁、运城等地,其范围内的区县人口效应对生态环境压力的贡献率明显高于其它地区。

经济效应于 1990—2000 年对生态环境压力的驱动作用逐渐减弱,2000—2006 年的驱动作用明显提升,而后再次减弱,经济发展对生态环境的压力逐渐减小(图 3),这表明流域在发展经济的同时更加强调生态效益,从追求经济的高速增长逐步转变为追求经济与生态一体化的高质量发展。经济效应在黄河中下游地区对生态环境压力的驱动作用更高,陕西榆林、渭南和河南郑州、洛阳等地经济效应对生态环境压力的贡献率高于 45%。

技术效应对生态环境压力的贡献率普遍高于经济效应,1990—2000 年技术效应对生态环境压力的驱动作用有所上升,2000 年之后逐渐减弱,总体呈现下降的变化趋势(图 3),表明科学技术的创新在实现经济产出的同时有效地缓解了生产活动对生态环境的压力,改善并强化了生态环境质量。46.44%的区县技术效应对生态环境压力的贡献率大于 50%,属于技术效应主导型,主要分布于青海、甘肃、陕西延安、山西运城和内蒙古巴彦淖尔、鄂尔多斯市,这些地区自然资源丰富,经济发展与生态环境密不可分,技术效应主导生态环境压力的演变反映出提高生产设备、改进污染治理手段、产业绿色转型等科技创新有助于经济有序增长和生态环境保护的和谐发展。

3.3 经济发展与生态环境压力脱钩分析

基于 Tapio 脱钩模型分析黄河流域经济发展与生态环境压力脱钩关系的结果发现,29 年间黄河流域主要脱钩类型为强脱钩和弱脱钩,截至 2018 年共有 243 个区县(占区县数量的 64.12%)实现了强脱钩,但黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系一直处于动态变化之中,脱钩类型呈现反复,例如:从强脱钩到弱脱钩,弱脱钩到强脱钩,弱负脱钩到强脱钩等(图 4)。因此决策制定者和科学管理人员应时刻保持警惕,及时防

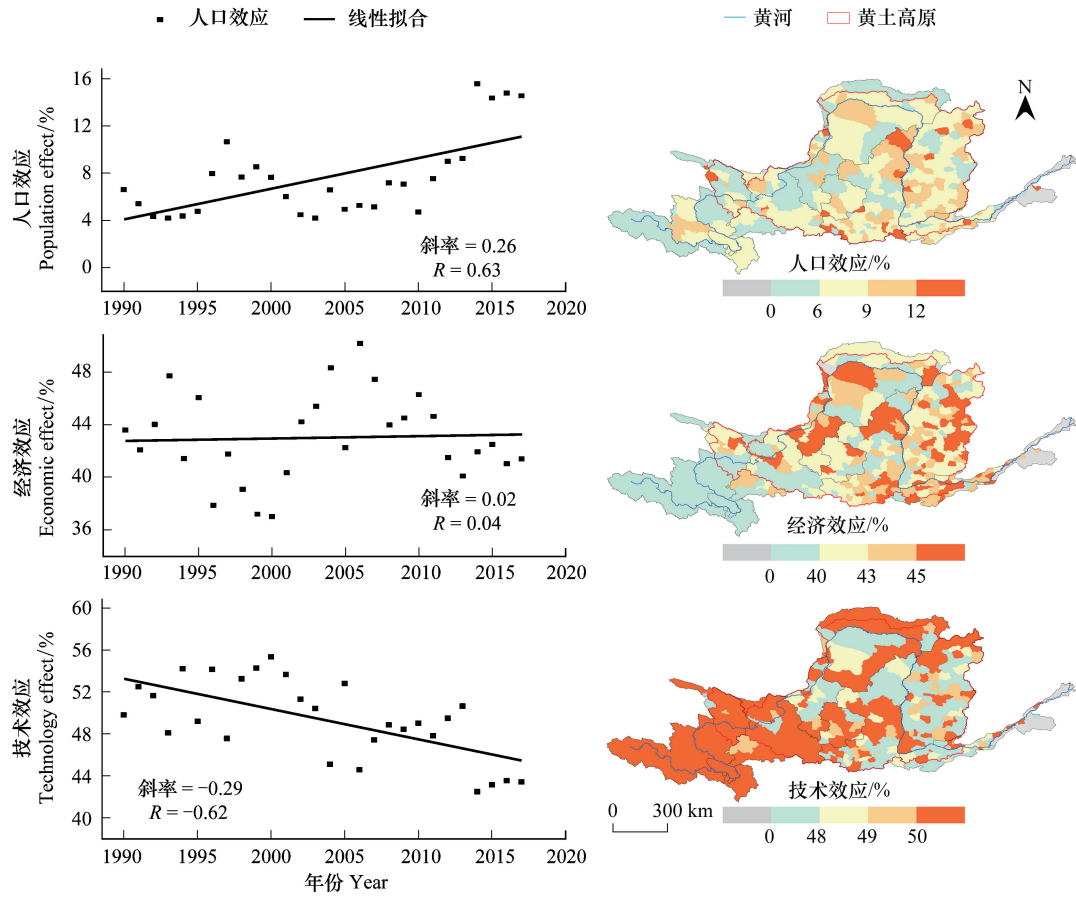


图3 1990—2018年生态环境压力驱动效应的平均贡献率

Fig.3 The average contribution rate of eco-environmental pressure driving effect from 1990 to 2018

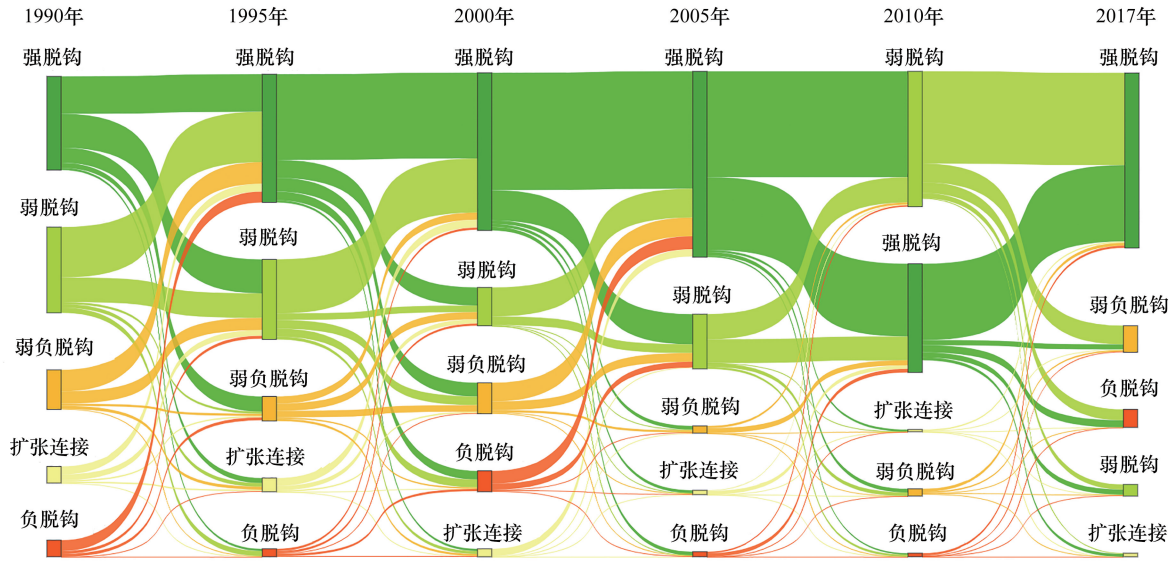


图4 经济发展与生态环境压力脱钩类型变化

Fig.4 The changes of decoupling between economic development and eco-environmental pressure

范处于强脱钩类型的地区后退至不可持续的负脱钩类型,进一步巩固和提高黄河流域经济发展与生态环境压力脱钩关系的可持续性。

1990—1991 年黄河流域 34.30% 的区县处于强脱钩类型,区县特征表现为经济增长速率平稳、生态环境压力增长速率较缓,空间上主要分布于宁夏、陕西和内蒙古自治区等地(图 5);31.40% 的区县处于弱脱钩类型,弱脱钩类型区县的经济增长速率与强脱钩类型相近,但生态环境压力增长速率较快,好在经济增长速率较生态环境压力增长速率更为迅速,单位经济产出对生态环境的压力较小,经济发展与生态环境压力的脱钩关系仍处于较理想状态,主要分布于陕西省中部、河套灌区和河南省;14.51% 的区县处于弱负脱钩类型,区县特征为经济增长速率较为缓慢,而生态环境压力增长速率显著加快,主要分布于青海和甘肃省;山西省经济发展对生态环境的依附性很强,生态环境承载的压力较大,大多区县处于负脱钩类型。

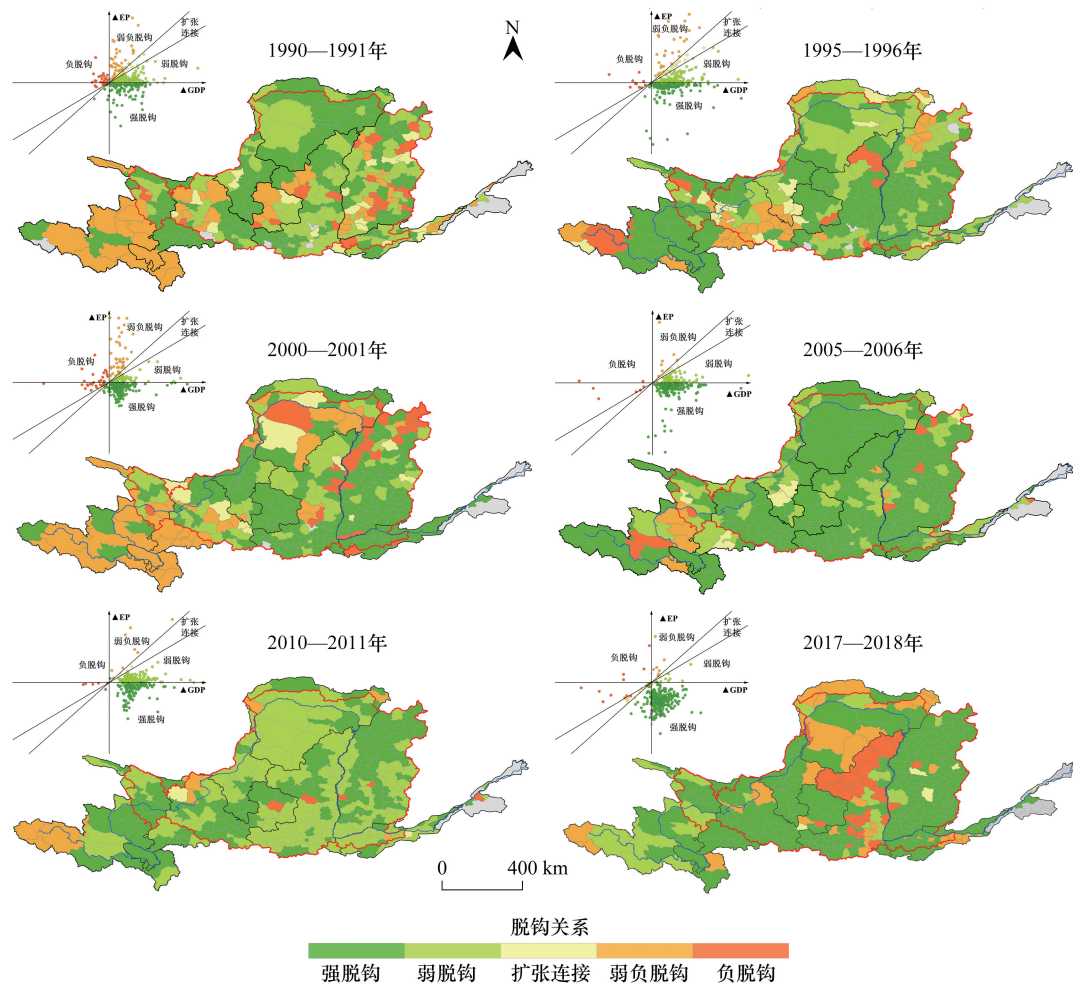


图 5 经济发展与生态环境压力脱钩的时空变化

Fig.5 The spatial-temporal changes of decoupling between economic development and eco-environmental pressure

EP: 生态环境压力增长率 Ecological Pressure

1995—1996 年山西和青海省的经济发展与生态环境压力的脱钩关系趋于优化,由弱负脱钩或负脱钩转化为强脱钩或弱脱钩类型,这与山西省政府意识到资源型经济转型的必要性和一系列保护生态环境和提高生产活力的政策出台密切相关;陕西咸阳、山西朔州以及内蒙古鄂尔多斯和呼和浩特市等地生态环境压力增长速率虽逐渐加快,由强脱钩后退至弱脱钩类型,但经济发展与生态环境压力的脱钩关系较为理想。2000—2001 年黄河流域 75 个区县由弱脱钩转化为强脱钩,主要位于河南、宁夏、山西晋中市以及陕西关中平原地区(图 5),这些地区生态环境压力增长速率逐渐下降;但黄河源区的部分区县由强脱钩后退至弱负脱钩类型,生态环境压力增长速率显著提高,这可能与黄河源区在 20 世纪 90 年代经历退化有关。

2005—2006 年 29 个区县由弱负脱钩转化为强脱钩类型,主要位于黄河源区、甘肃省定西市和内蒙古鄂

尔多斯市(图5),黄河源区的生态环境压力增长速率明显放缓,表明封山禁牧、退化湿地恢复等生态恢复工程的成效已初步显露;山西忻州市部分区县由负脱钩转化为强脱钩类型,经济增长速率显著加快。2010—2011年147个区县由强脱钩倒退为弱脱钩类型,生态环境压力增长速率逐渐加快,主要位于内蒙古鄂尔多斯和巴彦淖尔市以及汾渭平原地区,与生态环境保护相比,该时期研究区域更强调经济发展的重要性。

2017—2018年内蒙古鄂尔多斯和巴彦淖尔市由弱脱钩倒退至弱负脱钩类型,生态环境压力增长速率显著加快;陕西北部由强脱钩或弱脱钩倒退至负脱钩类型,经济逐渐衰退,生态环境压力增长速率也较为迅速,处于较消极的不可持续状态。内蒙古和陕西北部地区依煤炭兴盛,经济发展迅速,但也存在过度依赖煤炭资源带来的产业结构单一、生态环境破坏、社会活力不足等问题^[39],反映出石油、煤炭等能源丰富的地区经济发展与生态环境压力的脱钩关系具有阶段性和不可持续性,间接表明产业结构调整、绿色能源有效利用、科技创新等方式才是实现经济发展与生态环境压力脱钩的关键,应大力优化产业结构,转变经济增长方式,实现经济与生态和谐发展。

3.4 经济发展与生态环境压力脱钩驱动效应分析

运用 PCMC 因果网络构建了黄河流域经济发展和生态环境压力脱钩的因果网络(图6),解析了驱动脱钩的因果关联路径(图7),统计了各要素节点与脱钩指数的因果连边和影响脱钩指数的平均因果强度。整体来说,以乡村人口和城镇化率要素为代表的人口因子与脱钩指数的因果关联最紧密。

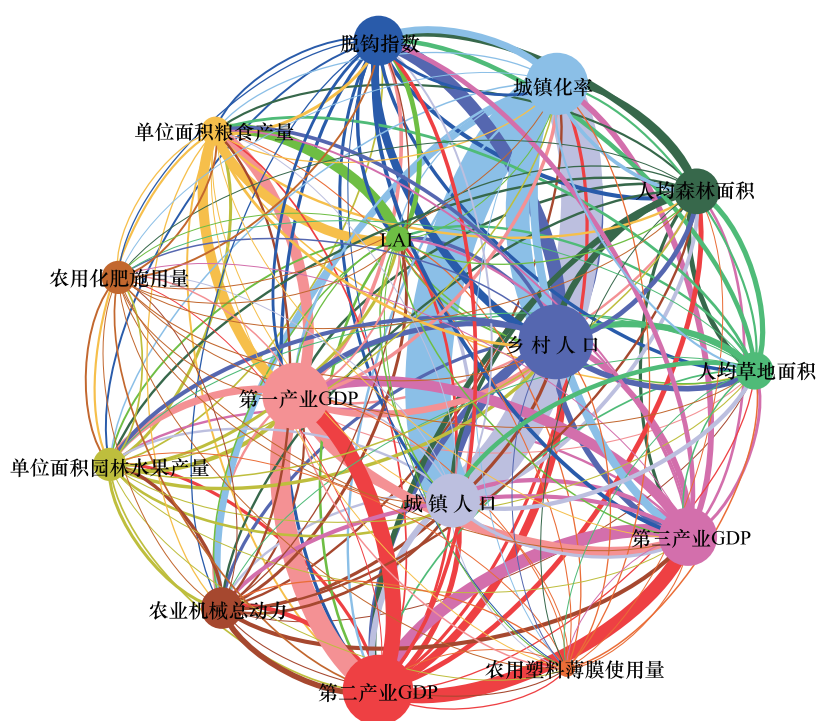


图6 经济发展与生态环境压力脱钩的因果网络

Fig.6 The causal network of decoupling between economic development and eco-environmental pressure

黄河流域28%的区县以农业技术因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,主要分布于陕西榆林和延安市以及山西临汾、吕梁和运城市(图8)。农业技术因子中单位面积粮食产量、单位面积园林水果产量要素驱动经济发展与生态环境压力脱钩,这可能得益于2014年政府启动实施的新一轮退耕还林还草工程,新一轮退耕还林还草工程大力度鼓励农业结构多样化,在提高森林植被覆盖度的同时让林下经营面积增加,在政府和企业的带动下,农户相继改变了以粮为主的经营手段,丰富了农业经营方式,增加了经济收入^[40—41],例如山东、陕西和甘肃等地水果产量丰富,经济作物带来的收入已成为农民家庭经营的重要组成部分^[42],在强

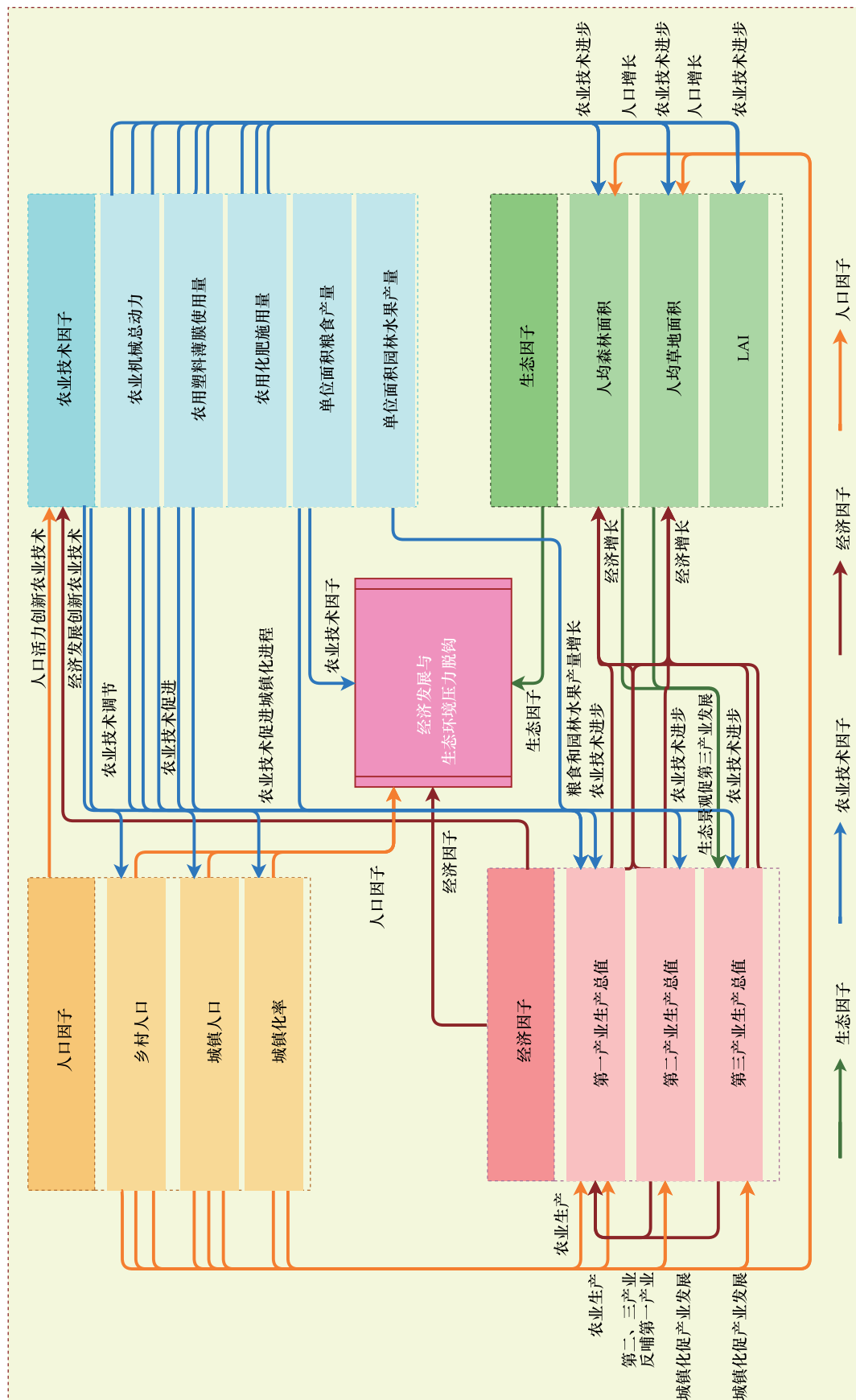


图 7 经济发展与生态环境压力脱钩的因果网络路径
Fig. 7 The causal network path of decoupling between economic development and eco-environmental pressure

化退耕还林还草工程优良成果的同时推动了精准脱贫^[24],促进了农民增收,有助于经济发展与生态环境压力脱钩,实现生态环境保护和经济有序发展的双赢^[43-44]。农用塑料薄膜使用量和农用化肥施用量要素不仅对驱动经济发展与生态环境压力脱钩产生了积极而重大的影响,而且与单位面积粮食产量、乡村人口以及产业生产总值等要素的因果联系十分紧密(图 7),现代农业通过使用大小型农业机械^[45]、农用塑料薄膜和农用化肥^[46-47]等集约化措施显著增加了粮食和园林水果产量^[48-49],调节了乡村人口数量,提高了农业生产效率,进一步贡献了地区生产总值,生产总值的增长也加强了对农业生产技术的投入,形成了良性循环。

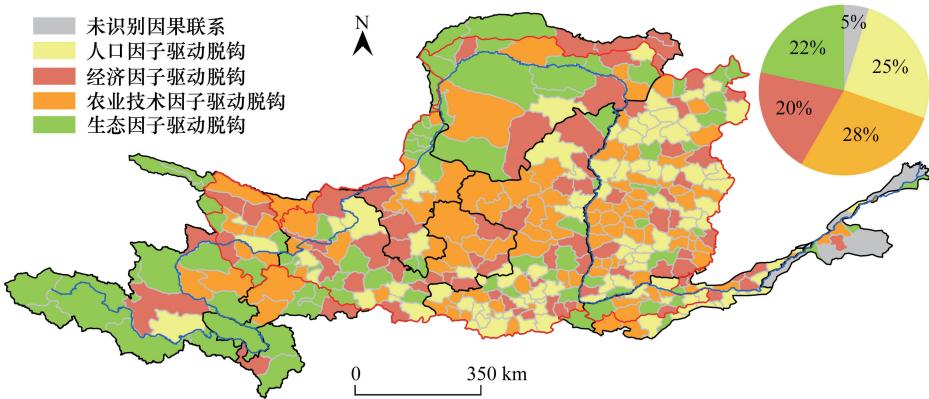


图 8 黄河流域县域经济发展与生态环境压力脱钩驱动效应的空间分布

Fig.8 The spatial distribution of decoupling driving effect between economic development and eco-environmental pressure in counties of the Yellow River Basin

25%的区县以人口因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,即城镇化率、城镇人口和乡村人口要素指向脱钩指数,空间上主要分布于河南省、山西省和陕西关中平原地区(图 8)。乡村人口要素与脱钩指数的因果连边数最多,表明其与脱钩指数出现因果关系的频率最高;城镇化率要素影响脱钩指数的平均因果强度最大,其与脱钩指数的因果联系最强(表 2)。乡村人口的迁移推动了城镇化的发展进程,越来越多的农户

表 2 各要素节点连接脱钩指数的因果网络度量统计

Table 2 Measurement and statistics of causal network of various elements connecting decoupling index

脱钩驱动类型 Decoupling drive type	要素节点 Object	与脱钩指数连边数 Number of edges connected with decoupling index	指向脱钩指数连边数 Number of edges pointing to decoupling index	影响脱钩指数的平均因果强度 Average causal intensity affecting decoupling index
人口因子 Demographic factor	乡村人口	101	37	0.674
	城镇化率	45	13	0.716
	城镇人口	23	14	0.575
经济因子 Economic factor	第三产业生产总值	40	18	0.621
	第二产业生产总值	32	15	0.582
	第一产业生产总值	30	13	0.564
生态因子 Ecological factor	人均森林	48	19	0.571
	人均草地	38	16	0.602
	LAI	37	16	0.611
农业技术因子 Agricultural technology factor	单位面积粮食产量	23	9	0.597
	单位面积园林水果产量	17	9	0.565
	农业机械总动力	15	6	0.589
	农用塑料薄膜使用量	12	6	0.608
	农用化肥施用量	3	3	0.642

迁移到城镇工作生活,提高了城镇建设用地的集约化程度,促进了经济的蓬勃发展,减少了人为活动对生态环境的影响。城镇化与生态环境耦合作为人地关系系统中极其重要的一环^[50],二者的相互协调有效地推动了经济发展与生态环境压力脱钩。

22%的区县以生态因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,主要分布于草地和植被茂盛的黄河源区(图8)。此外,生态因子与人口和农业技术因子的因果联系密切,城镇化的进程和农业开垦占用了大面积的自然植被,使得人均草地面积、人均森林面积不断降低,但农业生产技术的提高增强了农业集约化,减缓了人均草地和人均森林面积下降的速率,对生态环境承载的压力进行了较好的缓冲。

20%的区县以经济因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,主要分布于甘肃平凉、山西长治、陕西渭南和榆林市。经济因子中第一、二、三产业生产总值要素不仅与脱钩指数的因果连边较多,促进了经济发展与生态环境压力脱钩,而且经济因子内部也存在因果联系,第二、三产业生产总值与第一产业生产总值存在明显的因果网络连边(图6),黄河流域第二、三产业向第一产业反哺,旨在逐步缩小贫富差距,促进产业结构协调发展。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过 1990—2018 年黄河流域经济发展与生态环境脱钩关系的时空动态变化以及脱钩关系的驱动效应分析,得出结论如下:

(1)黄河流域生态环境压力呈现明显的空间异质性,70%的区县生态环境压力总体处于较低压和低压,空间上主要分布于六盘山、汾渭平原和黄河下游地区,中等压力地区主要分布于陕西延安和榆林市以及吕梁山一带,较高压力和高压力地区主要位于内蒙古,该地区虽资源条件禀赋,但经济发展的同时生态环境也承载了巨大压力。

(2)生态环境压力演变的主要驱动因素是经济效应和技术效应,流域中下游地区经济效应对生态环境压力的驱动作用高于上游地区,技术效应对生态环境压力的驱动作用总体呈现下降的变化趋势,科学技术的创新实现经济产出的同时减小了对生态环境的压力,改善并强化了生态环境质量。

(3)黄河流域经济发展与生态环境压力的主要脱钩类型为强脱钩和弱脱钩,截至 2018 年 68.34%的区县实现经济发展与生态环境压力有效脱钩,但黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系一直处于动态变化之中,应及时防范处于强脱钩类型地区后退至负脱钩类型,进一步巩固和提高经济发展与生态环境压力脱钩关系的可持续性。

(4)28%的区县以农业技术因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,农业集约化和农业结构多样化增加了粮食和园林水果产量,促进了农民增收,有效地驱动了经济发展与生态环境压力脱钩;25%的区县以人口因子驱动经济发展与生态环境压力脱钩为主导,乡村人口要素与脱钩指数的因果连边数最多,城镇化率要素指向脱钩指数的平均因果强度最强,乡村人口的迁移促进了城镇化进程,推动了经济的蓬勃发展,减少了人为活动对生态环境的影响,对驱动经济发展与生态环境脱钩有着积极而重大的影响。

研究黄河流域这一典型区域的经济发展与生态环境压力的脱钩关系的时空变化及其背后的因果机制,对促进经济繁荣和提升生态环境质量具有可实行和可参考的示范价值。

4.2 讨论

本研究认为黄河流域 68.34%的区县实现经济发展与生态环境压力有效脱钩,得益于中央政府一直以来对黄河流域生态保护与经济发展的重视。新中国成立后,毛泽东主席提出“要把黄河的事情办好”,从此揭开了黄河治理的序幕;退耕还林还草^[45]等生态保护工程的实施也为黄河流域生态环境绿化及经济总量增长贡献了巨大力量,推动了生态环境保护及经济发展的双赢,当今习近平主席提出了黄河流域生态保护和高质量发展战略^[11],将黄河的治理事业推到新的高度。不同区县经济发展与生态环境压力的脱钩关系存在差异,本

文认为这些差异是各区县所处的区位条件、经济基础、交通便利程度、国家及地方政策等因素综合作用的结果。资源禀赋地区的能源化工产业虽能直接推动经济发展,但随着煤炭、石油、天然气等能源的不断枯竭以及当地生态环境恶化带来的负面影响,人们逐渐意识到仅仅依靠能源产业不能长久地实现经济发展,促进生态环境保护和经济增长的协调融合才是实现可持续发展的关键。对此,本研究认为黄河流域实现经济高质量发展和生态环境保护应大力支持工业对农业进行反哺,城市支持农村,推进乡村振兴,推动产业结构均衡发展;同时应整体把握黄河流域上中下游的资源环境差异,充分发挥自身优势,因地制宜地促进社会经济增长与生态环境保护的协调发展;此外资源禀赋地区应发展战略性新兴产业,加快产业转型升级,优化经济结构,提升产业的核心竞争力;并且充分发挥流域中下游经济发达城市的技术创新优势,加大资本投入吸引创新性技术人才,推动发展效率和品质的提升,带动周边地区的迅速崛起,协助流域上游的经济增长,实现整个区域的繁荣;最后应加强流域内与流域外的复杂交互作用,完善基础设施建设,构建发达的经济文化贸易网络,消除流域内外交流的屏障,打破市场竞争的鸿沟,促进黄河流域社会经济生态系统和谐稳定发展。

受限于黄河流域县域数据的质量、数量和可获得性,本文仅关注于土地系统选取了部分代表性指标在宏观层面对生态环境压力值进行表征,未来研究可以考虑增加林草面积、大气质量、水环境、水土保持与荒漠化等指标对生态环境压力进行综合评估,在数据精度、指标全面等方面优化黄河流域经济发展与生态环境压力脱钩关系的研究。

参考文献 (References):

- [1] United Nations. World Urbanization Prospects 2018. New York: United Nations.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴—2018. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [3] 胡美娟, 孙萍, 李在军, 侯兵. 长三角城市经济增长与资源环境压力的脱钩效应. 世界地理研究, 2022, 31(3): 538-548.
- [4] Guan X L, Wei H K, Lu S S, Dai Q, Su H J. Assessment on the urbanization strategy in China: achievements, challenges and reflections. Habitat International, 2018, 71: 97-109.
- [5] Tan X D, Wu Q, Shao H Y. Global commitments and China's endeavors to promote health and achieve sustainable development goals. Journal of Health, Population and Nutrition, 2018, 37(1): 8.
- [6] Sun Q, Zhang X H, Zhang H W, Niu H P. Coordinated development of a coupled social economy and resource environment system: a case study in Henan Province, China. Environment, Development and Sustainability, 2018, 20(3): 1385-1404.
- [7] Bryndin E. Creation of social self-sufficient digital ecological economy of natural needs of healthy living activities. Resources and Environmental Economics, 2020, 2(2): 184-190.
- [8] Zhang C M, Wang C X, Mao G X, Wang M, Hsu W L. An empirical study on the ecological economy of the Huai River in China. Water, 2020, 12(8): 2162.
- [9] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 钟士恩, 虞虎, 韩娅. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展. 资源科学, 2020, 42(4): 593-606.
- [10] 崔乃霞. 在“黄河大合唱”中唱响“海事强音”. 中国海事, 2020, (8): 10-13.
- [11] 牛玉国, 张金鹏. 对黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的几点思考. 人民黄河, 2020, 42(11): 1-4, 10-10.
- [12] 任保平. 黄河流域高质量发展的特殊性及其模式选择. 人文杂志, 2020, (1): 1-4.
- [13] 金凤君, 马丽, 许堞. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136.
- [14] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略. 资源科学, 2020, 42(3): 409-423.
- [15] Hu Y F, Gao M, Batunacun. Evaluations of water yield and soil erosion in the Shaanxi-Gansu Loess Plateau under different land use and climate change scenarios. Environmental Development, 2020, 34: 100488.
- [16] Jin Z, Liang W, Yang Y T, Zhang W B, Yan J W, Chen X J, Li S, Mo X G. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8191.
- [17] Guo B Y, Niu Y Q, Mantravadi V S, Zhang L, Liu G Z. The variation of rainfall runoff after vegetation restoration in upper reaches of the Yellow River by the remote sensing technology. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(36): 50707-50717.
- [18] 安善涛, 焦磊, 梁伟, 严建武, 张为彬, 金朝, 纪秋磊, 王凤娇, 杨盼. 基于多源数据的黄土高原陆地水循环结构变化分析. 生态学报, 2021, 41(17): 6800-6813.
- [19] 苗长虹, 张伯发. 黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究. 经济地理, 2021, 41(10): 143-153.
- [20] 李梦程, 王成新, 刘海猛, 王瑞莉, 于尚坤. 黄河流域城市发展质量评价与空间联系网络特征. 经济地理, 2021, 41(12): 84-93.
- [21] 杨清可, 王磊, 李永乐, 秦贤宏. 供需匹配视角下土地利用空间均衡的理论分析与状态评价——以江苏省为例. 资源科学, 2021, 43(5): 932-943.
- [22] Liang W, Zhang W B, Jin Z, Yan J W, Lü Y H, Li S, Yu Q. Rapid urbanization and agricultural intensification increase regional evaporative

- water consumption of the Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(23): e2020JD033380.
- [23] Ji Q L, Liang W, Fu B J, Zhang W B, Yan J W, Lü Y H, Yue C, Jin Z, Lan Z Y, Li S Y, Yang P. Mapping land use/cover dynamics of the Yellow River Basin from 1986 to 2018 supported by google earth engine. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1299.
- [24] 纪秋磊, 梁伟, 傅伯杰, 吕一河, 严建武, 张为彬, 金朝, 兰志洋. 基于 Google Earth Engine 平台与复杂网络的黄河流域土地利用/覆被变化分析. *生态学报*, 2022, 42(6): 2122-2135.
- [25] 彭少明, 王煜, 蒋桂芹. 黄河流域主要灌区灌溉需水与干旱的关系研究. *人民黄河*, 2017, 39(11): 5-10.
- [26] Zhang Z Y. Theoretical and technical analysis of vegetation restoration and construction in Loess Plateau//*Proceedings of 2018 7th International Conference on Social Science, Education and Humanities Research (SSEHR 2018)*. Xi'an: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2018.
- [27] 张丙昌, 武志芳, 李彬. 黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1123-1131.
- [28] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509.
- [29] 孙涵, 聂飞飞, 胡雪原. 基于熵权 TOPSIS 法的中国区域能源安全评价及差异分析. *资源科学*, 2018, 40(3): 477-485.
- [30] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [31] Runge J, Nowack P, Kretschmer M, Flaxman S, Sejdinovic D. Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaau4996.
- [32] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 贾明璐. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. *地理科学*, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [33] 钟太洋, 黄贤金, 韩立, 王柏源. 资源环境领域脱钩分析研究进展. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1400-1412.
- [34] 王翔宇, 高培超, 宋长青, 陈小强, 王成新. 不同尺度下城市用地扩张与经济增强的脱钩关系——以山东省为例. *经济地理*, 2021, 41(3): 97-104, 125-125.
- [35] Pržulj N. Biological network comparison using graphlet degree distribution. *Bioinformatics*, 2007, 23(2): e177-e183.
- [36] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [37] Li Z Y, Liu X H, Niu T L, Kejia D, Zhou Q P, Ma T X, Gao Y Y. Ecological restoration and its effects on a regional climate: the source region of the Yellow River, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(10): 5897-5904.
- [38] 李博, 张文忠, 余建辉, 刘倩倩. 能源富集区区域经济发展水平空间格局演变——基于晋陕蒙甘宁地区. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 668-682.
- [39] 袁映奇. 陕西榆林推进经济绿色转型发展的思考. *中国国情国力*, 2021, (5): 71-76.
- [40] Delang C O. The second phase of the grain for green program: adapting the largest reforestation program in the world to the new conditions in Rural China. *Environmental Management*, 2019, 64(3): 303-312.
- [41] 国家林业和草原局. 中国退耕还林还草二十年(1999—2019). (2020-06-30). <http://www.forestry.gov.cn/zlszz/4262/20200701/095836370996190.html>.
- [42] 朱振亚, 罗水香. 我国经济作物产出的宏观形势分析: 1983-2014. *农业经济*, 2017, (1): 44-46.
- [43] Li S, Liang W, Fu B J, Lü Y H, Fu S Y, Wang S, Su H M. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570: 1032-1039.
- [44] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 87-99.
- [45] Qiao F B. Increasing wage, mechanization, and agriculture production in China. *China Economic Review*, 2017, 46: 249-260.
- [46] Sun D B, Li H G, Wang E L, He W Q, Hao W P, Yan C R, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q, Sun Z X, Jia Z K, Zhou H P, Fan T L, Zhang X C, Liu Q, Wang F J, Zhang C C, Shen J B, Wang Q S, Zhang F S. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency. *National Science Review*, 2020, 7(10): 1523-1526.
- [47] Gao H H, Yan C R, Liu Q, Ding W L, Chen B Q, Li Z. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 484-492.
- [48] Zuo L J, Zhang Z X, Carlson K M, MacDonald G K, Brauman K A, Liu Y C, Zhang W, Zhang H Y, Wu W B, Zhao X L, Wang X, Liu B, Yi L, Wen Q K, Liu F, Xu J Y, Hu S G, Sun F F, Gerber J S, West P C. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 304-313.
- [49] Tang Q, Bennett S J, Xu Y, Li Y. Agricultural practices and sustainable livelihoods: Rural transformation within the Loess Plateau, China. *Applied Geography*, 2013, 41: 15-23.
- [50] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 1-7.