

黄河流域农业高质量发展 and 生态保护协调性 及交互关系研究*

谈家凯¹, 汪红梅¹

(1.西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 本研究构建农业高质量发展和生态保护综合指标, 利用 2005-2019 年黄河流域 9 省区的截面数据, 采用耦合协调模型、交互胁迫模型以及灰色关联度模型, 讨论它们的时空特征、滞后性、交互关系和影响因素。研究表明, 黄河流域整体耦合协调发展趋势良好, 但在时空格局具有差异, 时间维度表现为稳趋势, 微变动, 空间维度表现为西低东高; 在整体与省域尺度上, 黄河流域农业高质量发展指数普遍低于生态保护指数, 说明农业高质量发展的不协调状况是由于农业高质量发展落后造成的; 黄河流域各省份确实存在农业高质量发展—生态保护交互胁迫关系, 演变轨迹符合多个“S”型曲线组合的发展特征, 再次验证了农业高质量发展的滞后性; 在影响协调度诸多因素中环境保护和农业创新的影响最为显著。

关键词: 农业高质量发展; 生态保护; 耦合协调; 交互胁迫; 黄河流域

中图分类号: F326.1; F326.2; TV882.1 **文献标志码:** A

一、引言

习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的演讲中强调, 黄河流域的耕地资源丰富, 土壤富饶肥沃, 充足的光热资源为各类粮油作物和经济作物的种植创造了有利条件, 农业文明历史悠久^[1]。但近年来, 农业生产的社会化发展与黄河流域的资源环境特征和承载能力不匹配, 导致农业发展滞后、当地环境污染和潜在的生态威胁等问题的出现。到目前为止, 黄河流域受水土流失影响的面积达 451700 平方公里, 占总面积的 71%。黄河流域是一个缺水地区, 人均供水量为 647 立方米, 为全国平均水平的 1/3。黄河流域空气污染严重, 在中国主要进行空气质量监测的 169 个城市中, 有 53 个城市位于黄河流域。生态基础薄弱是黄河流域高质量发展的严重障碍。研究生态保护与高质量发展之间的联系和协调, 可以为促进生态保护和高质量发展提供科学指导 (刘琳轲等 2021)^[2]。以黄河流域为主体的研究中, 大部分学者主要研究经济发展和生态环境之间的耦合关系 (刘同超 2021; 宁朝山等 2020; 孙久文等 2022)^[3-5], 在此基础上少部分学者进一步探究黄河流域经济高质量发展同生态环境之间的耦合, 张建威等 (2021) 认为流域的协调度发展态势向好, 且耦合协调发展具有差异性^[6]; 石涛 (2020) 指出, 黄河流域生态保护和经济高质量发展在空间上的联系具有异质性、脆弱性和密度的趋同性等^[7]。另外焦念涛 (2020) 等人对黄河流域旅游经济与生态环境协调关系进行了探讨, 并对影响因素作了进一步的分析^[8]; 赵建吉等 (2020) 对新型城镇化和生态环境耦合协调度进行测度, 对两者的时空格局以及两者同步发展的状态进行了探索^[9]; 杨晨

谈家凯, 西北农林科技大学经济管理学院, 邮编: 712100。本文系陕西省生态空间治理重点课题: 黄河流域生态保护和经济高质量发展耦合协调演进特征分析 (2022HZ1841); 陕西省社科界重大理论与现实问题研究重大项目子课题“陕西农业产业高质量发展水平测度与目标框架构建” (2021ZD1055) 的阶段性成果。

汪红梅 (通讯作者), 西北农林科技大学经济管理学院, 邮编: 712100。

钰婧（2022）等人探讨黄河流域生态保护和农林经济发展的机制和相互作用^[10]。

当前在黄河流域经济与生态保护协同发展研究中，大多从宏观角度研究生态保护与经济、旅游产业、城镇化的关系，而对于黄河流域农业高质量发展与生态环境保护的耦合协调关系鲜有从农业角度出发的研究，且研究层面多偏重于时间角度而忽视了空间角度。目前，黄河流域生态保护如何兼顾农业发展，流域、省域间协调程度如何演进仍待深入研究。以新发展理念为引领，聚焦农业高质量发展与生态环境保护。搭建评价指标体系，运用熵值法计算综合发展指数，构建耦合协调度模型。从时序与空间视角，深入研究黄河流域耦合协调度变化规律，进行滞后性分析以及交互胁迫分析。应用灰色关联模型揭示关键影响因素，经实证分析，提出切实可行的政策建议，推动区域可持续发展迈出坚实步伐。

二、研究区域概况及数据来源

（一）研究区概况

黄河流域，广阔面积 75.24 万平方公里，横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等 9 省区，形成了自西向东的地理分布。上游涵盖青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古等地；中游跨足陕西和山西两省；而下游则囊括河南和山东两省。这一广袤区域在整个黄河流域中扮演着重要而多样的角色。

（二）数据来源

本研究基于 2005-2019 年的多个数据源，包括《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、各省区统计年鉴、国家统计局公布数据，以及黄河流域各省的国民经济和社会发展统计公报。针对缺失数据，采用插值法进行了补充，并对部分数据进行整理和计算，为研究提供了可靠的数据基础。

（三）指标体系构建

指标体系构建的科学性与合理性对耦合协调度的评价起着至关重要的作用，直接影响到评价结果的信效度。本研究以绿色发展理论、可持续发展理论、生态理论、区域产业经济等相关理论为基础，在综合参考已有研究的基础上^[11-13]，遵循科学性、层次性、系统性、指标代表性的原则，兼顾数据可得性和指标纵向匹配性因素，选取 32 个指标构建农业高质量发展和生态保护协调发展评价指标体系(见表 1)。其中，农业高质量发展水平从创新、协调、绿色、开放、共享五大新发展理念出发，创新维度从农业创新基础和农业创新效率两个方面选取了 7 个指标；协调维度从农业产业结构和农业经济增长结构两个方面选取了 5 个指标；绿色则从农业资源消耗和农业环境保护两个方面选取了 6 个指标，开放从农业开放程度选取了 1 个指标，共享从城乡差距和农村公共服务选取了 4 个指标；生态保护水平包含环境压力 and 环境保护两个维度，环境压力从废水、废气、固废三个方面选取了 3 个指标，环境保护从污染治理和生态状况两个方面选取了 6 个指标。

表 1 黄河流域农业高质量发展和生态保护评价指标体系

系统	维度指标	要素指标	基础指标	指标性质
农业高质量发展	创新	农业创新基础	农业劳动者教育水平	正

水平(U1)			农业机械化程度	正	
			农业电气化程度	正	
		农业创新效率		农业劳动生产率	正
				粮食单产	正
				农业规模化程度	正
				有效灌溉率	正
	协调	农业产业结构	第一产业比较生产率	正	
			农业产业链延伸	正	
		农业经济增长结构	农村居民恩格尔系数	负	
			农业经济增长率	正	
	绿色	农业资源消耗	农业中间消耗量	负	
			农用柴油使用强度	负	
			农作物成灾率	负	
		农业环境污染	单位面积农膜使用量	负	
			单位面积化肥使用量	负	
			单位面积农药使用量	负	
	开放	农业开放程度	外贸依存度	正	
	共享	城乡差距	城乡居民收入比	负	
			农民收入水平	正	
农村公共服务		农村医疗卫生水平	正		
		农村社会保障水平	正		
生态保护水平(U2)	环境压力	废水排放	单位 GDP 废水排放量	负	
		废气排放	单位 GDP 二氧化硫排放量	负	
		固废排放	单位 GDP 烟(粉)尘排放量	负	
	环境保护	污染治理	一般工业固体废物综合利用率	正	
			污水处理厂集中处理率	正	
			生活垃圾无害化处理率	正	
		生态状况	人均公园绿地面积	正	
			建成区绿化覆盖率	正	
			建成区绿化面积	正	

三、研究方法

(一) 耦合协调度模型

耦合评价模型用于衡量系统内部各因素的交互耦合程度与协调程度，平衡主观因素与客观有效性。耦合度主要表现了系统之间相互作用和相互影响的强度。本文通过熵值法构建指标体系，进而建立了黄河流域农业高质量发展与生态保护耦合协调模型，如（1）式所示：

$$C_{ij} = 2 \left[\frac{U_i U_j}{U_i + U_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式(1)中， $i, j=1, 2$ ，且 $i \neq j$ 。 U_i 表示农业高质量发展子系统， U_j 表示生态保护子系统， C_{ij} 表示农业高质量发展和生态保护的耦合度，取值在 $[0, 1]$ 之间，值越大说明两个系统之间的耦合水平越高。

与耦合度模型相比，耦合度模型则评估不同要素间的协调度，为区域可持续发展提供指导。耦合协调度函数表达为（2）、（3）式：

$$D_{ij} = \sqrt{C_{ij} T_{ij}} \quad (2)$$

$$T_{ij} = \alpha U_i + \beta U_j \quad (3)$$

式(2)中， D_{ij} 表示农业高质量发展和生态保护的耦合协调度，取值在 $[0, 1]$ 之间。式(3)中， T_{ij} 为反映农业高质量发展和生态保护整体协同效应的综合评价指数。由于农业高质量发展和生态保护两个子系统重要性相同，因此确定系数 $\alpha=\beta=0.5$ 。根据耦合协调度取值大小，可以对系统耦合程度进行判断。参考相关研究成果，依据耦合协调度对农业高质量发展和生态保护的协调程度进行等级划分，见表 2。

表 2 耦合协调度评价标准

耦合协调度	等级	耦合协调度	等级
(0.90, 1.00]	优质协调	(0.40, 0.50]	濒临失调
(0.80, 0.90]	良好协调	(0.30, 0.40]	轻度失调
(0.70, 0.80]	中等协调	(0.20, 0.30]	中度失调
(0.60, 0.70]	初级协调	(0.10, 0.20]	严重失调
(0.50, 0.60]	勉强协调	[0, 0.10]	极度失调

(二) 交互胁迫模型

本文通过交互胁迫模型来探究农业高质量发展与生态保护之间的交互关系。1982 年周一星等^[14]研究发现城市化水平和经济发展水平存在着某种对数曲线的交互关系，其表达式见式（1）。

$$Y = a \lg x + b. \quad (1)$$

式中： y 为城市化水平； x 为人均 GDP； a, b 为非负待定参数。

而克鲁斯曼（Grossman）和克鲁格（Krueger）^[15]已经证实经济发展水平与生态保护之间存在倒“U”形曲线的变化关系，其表达式见式（2）。

$$z = m - n(x - p)^2 \quad (2)$$

式中： z 为生态环境恶化指数； x 为人均 GDP； m, n, p 为非负待定参数。

根据上述 2 种关系模型，2003 年黄金川等^[16]构建了城市化与生态环境之间的双指数交互胁迫关

系曲线，其表达式见式（3）。

$$z=m-n(10^{(y-b)/a} - p)^2 \quad (3)$$

式中： z 为生态环境恶化指数； y 为城市化水平； m,n,p,a,b 为非负待定参数。

随着研究的深入，也有学者将城市化与生态环境交互胁迫模型应用于海洋生态经济系统^[17]、旅游经济与生态环境^[18-19]、轨道交通与常规公交^[20]之间的研究。交互胁迫理论认为，生态经济系统内部存在复杂的相互影响胁迫关系。在生态经济系统的发展过程中，系统内部不仅存在着恶性循环，还涌现出良性循环环节。当某一子系统受到的胁迫作用超过某一临界点时，压力将开始显现，与此同时，胁迫系统将被迫进行调整以减缓压力。随着积极的调控措施生效，子系统之间的矛盾得以缓解，引发新一轮的恶性→良性循环，这正是生态经济系统在各子系统相互影响胁迫下遵循的“S”型发展机制^[21]。农业生态经济系统与此趋势相同，笔者将借助此模型用以验证农业高质量发展和生态保护之间的交互胁迫关系，其表达式见式（4）。

$$z=m-n(10^{(y-b)/a} - p)^2 \quad (4)$$

式中： z 为生态保护水平指数； y 为农业高质量发展水平； m,n,a,b,p 为非负待定参数。

（三）灰色关联分析

灰色关联分析是一种有效方法，用于探究不同因素之间的相互影响。通过计算灰色关联度，可以揭示变量之间的发展趋势和相似度，进行定量分析。影响因子的相关性分析和回归分析有助于理解因素差异及其对目标的影响。

首先，确定参考序列和比较序列。将黄河流域高质量发展和生态保护耦合协调值作为参考序列 $M_0 = \{m_0(1), m_0(2), m_0(3), \dots, m_0(n)\}$ ，将评价指标体系中的各项指标值作为比较序列 $M_i = \{m_i(1), m_i(2), m_i(3), \dots, m_i(n)\}$ 。其中， i 表示指标数量， n 表示年份数量。

其次，计算标准化处理后的参考序列和比较序列的最大差和最小差。通过标准化处理后，确定最大值序列与最小值序列中的最大值和最小值，即两级最大差和最小差，并分别表示为 Δ_{max} 和 Δ_{min} 。

$$\Delta_i(t) = |M_0(t) - M_i(t)|, (i = 1,2,3,\dots,k) \quad (1)$$

第三，计算灰色关联系数。采用式（2）计算。

$$\delta_i(t) = \frac{\Delta_{min} + \rho \Delta_{max}}{\Delta_i(t) + \rho \Delta_{max}} \quad (2)$$

其中， $\delta_i(t)$ 为灰色关联系数， ρ 为分辨系数，通常令 $\rho = 0.5$

最后，计算参考序列和比较序列在不同节点的关联系数平均值，如式（3）示，作为灰色关联度。

$$R_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i(t) \quad (3)$$

其中， $R_i(t)$ 表示灰色关联度， $R_i(t)$ 数值越大，说明高质量发展与生态保护评价指标体系中的指标对两者耦合协调度的影响越大。

四、结果及分析

（一）黄河流域整体耦合协调发展的时序演变分析

本研究采用熵值法对 2005—2019 年黄河流域整体的面板数据进行处理，得出了一系列关键指数，包括农业高质量发展指数、生态保护指数、综合发展指数以及耦合协调度指数。详细的测算结果列于表 3 中。黄河流域整体相关指数变化情况如图 1 所示。

表 3 2005-2019 年黄河流域整体相关指数

年份	U1	U2	T	C	D	协调状况
2005	0.386	0.069	0.228	0.719	0.405	濒临失调
2006	0.361	0.149	0.255	0.910	0.482	濒临失调
2007	0.379	0.236	0.308	0.973	0.547	勉强协调
2008	0.423	0.318	0.371	0.990	0.606	初级协调
2009	0.340	0.395	0.367	0.997	0.605	初级协调
2010	0.419	0.430	0.425	1.000	0.652	初级协调
2011	0.434	0.447	0.441	1.000	0.664	初级协调
2012	0.427	0.508	0.468	0.996	0.683	初级协调
2013	0.464	0.557	0.511	0.996	0.713	中等协调
2014	0.475	0.572	0.523	0.996	0.722	中等协调
2015	0.430	0.590	0.510	0.988	0.710	中等协调
2016	0.470	0.791	0.631	0.967	0.781	中等协调
2017	0.540	0.764	0.652	0.985	0.801	良好协调
2018	0.606	0.771	0.688	0.993	0.827	良好协调
2019	0.753	0.752	0.752	1.000	0.867	良好协调

注：U1 指农业高质量发展指数；U2 指生态保护指数；T 指综合发展指数；C 指耦合度指数；D 指耦合协调度指数。

由表 3 和图 1 可知：（1）从农业高质量发展指数来看，黄河流域的农业高质量发展指数整体呈上升趋势，由 2005 年的 0.411 提升至 2019 年 0.85，其中 2009 年与 2015 年出现小幅度回落；2009 年农业机械化程度、外贸依存度以及农村社会保障水平出现小幅度下滑；2015 年农业经济增长率、外贸依存度出现小幅度下滑，农作物成灾率上升。黄河流域的农业发展质量呈现良好态势，但发展相对缓慢，成效并不显著。（2）从生态保护指数来看，2005-2019 年黄河流域的生态保护指数整体增幅较大，由 2005 年的 0.069 提升至 0.752；在 2015 年出现急剧上升，在之后几年稍有回落。2016 年“三废”排放急剧减少，致使生态保护指数急剧上升。黄河流域近年的生态保护呈现迅速发展的趋势。（3）从综合发展指数来看，2005-2019 年黄河流域的综合发展指数同样呈现稳步上升趋势，由 2005 年的 0.24 提升至 0.756。（4）从耦合协调度指数来看，2005-2019 年黄河流域的耦合协调度指数由 0.411 提升至 0.869，协调发展阶段呈现“濒临失调-良好协调”的演进态势；整体来看，2005-2019 年耦合协调度从濒临失调稳步上升 4 个等级到达良好协调，农业高质量发展与生态保护的耦合协调状况逐步优化，已进入农业高质量发展和生态保护协调发展阶段。

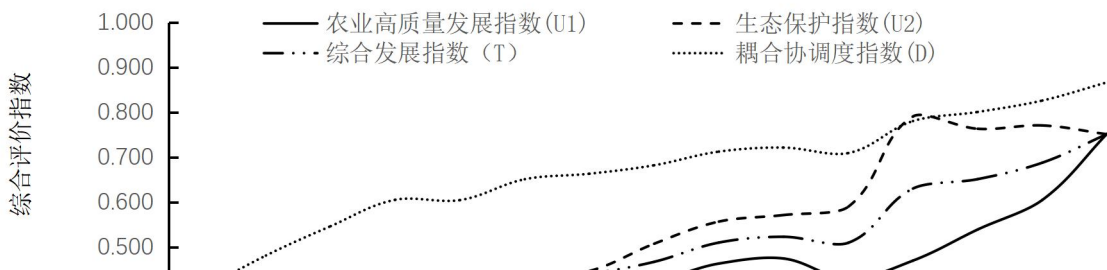


图 1 2005-2019 年黄河流域指数变化

(二) 黄河流域各省耦合协调发展的时序演变分析

图 2、图 3 分别反映了 9 个省区在 2005~2019 年农业高质量发展指数和生态保护指数。可见指数在总体上均呈逐渐增长的态势，但生态保护指数增幅要大于农业高质量发展。

在耦合协调度计算公式中分别带入黄河流域 9 省（区）农业高质量发展和生态保护两大系统的评估值，计算得出农业高质量发展和生态保护两大系统耦合协调度值。

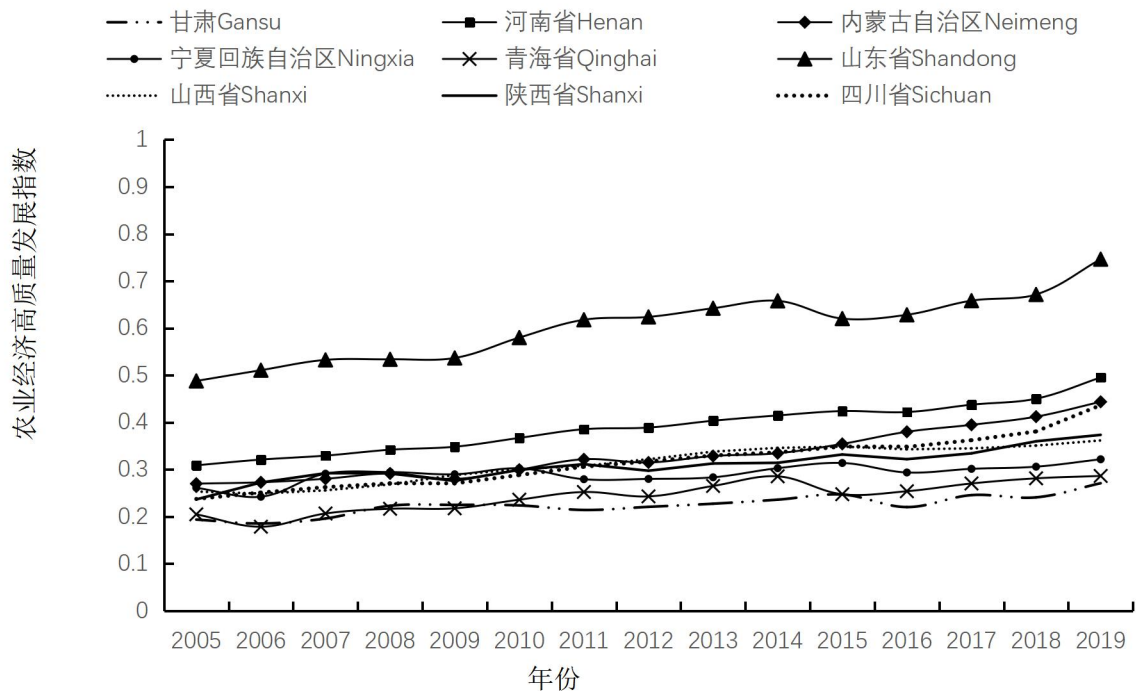


图 2 2005-2019 年黄河流域省域农业经济高质量发展指数变化情况

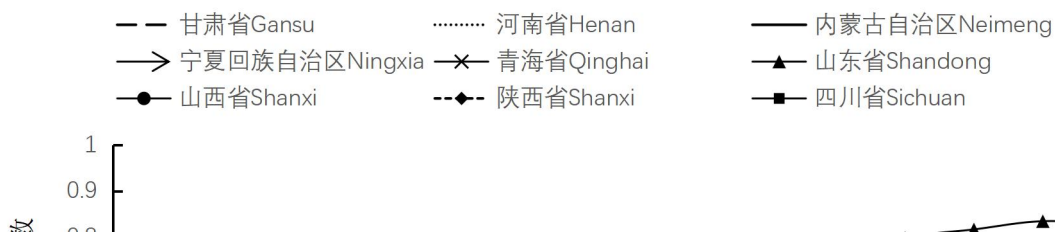


图 3 2005-2019 年黄河流域省域生态保护指数变化情况

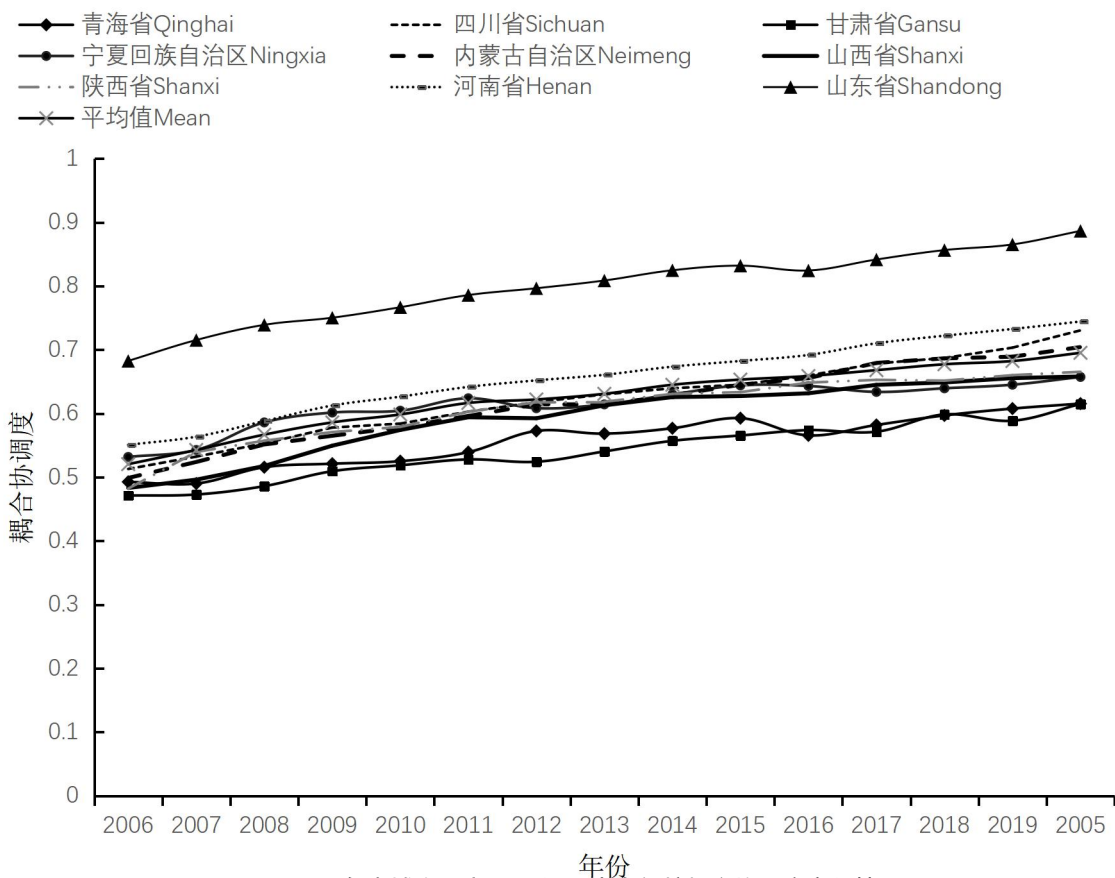


图 4 2005-2019 年省域农业高质量发展-生态保护耦合协调度变化情况

在时间维度上，流域内农业高质量发展—生态保护的耦合协调呈现出稳中有升的特点。从 2005-2019 年全省区域农业高质量发展-生态保护耦合协调度变化情况（见图 4）可以看出：（1）农业高质量发展-生态保护耦合协调度总体较为平稳，局部地区略有变化，农业高质量发展-生态保护

耦合协调度虽呈稳中有升态势，但增幅大多不超过 0.1。（2）在黄河流域 9 个省中，山东省的耦合协调度较高，其次是河南省，位于下游地区两省的耦合协调度在 2005-2019 年 15 年中，均高于流域的平均值；宁夏、山西、四川、陕西和内蒙古五个省份的耦合协调度变化情况和黄河流域地区均值的变化情况大致相同，在 2005-2019 年期间呈现稳步上升趋势，且增速较为缓慢；甘肃和青海两个省份的耦合协调度在 2005-2019 年这 15 年中，均低于流域的平均值；其中陕西省、山西省和宁夏回族自治区耦合协调度走势较为接近，山西省在 2005 年排名最后，但在 2005-2011 年期间增速较高，在 2011 年与宁夏回族自治区持平；甘肃省耦合协调度在 9 省中排名最后，且距离区域均值还有一定的差距。

（三）黄河流域各省耦合协调发展的空间格局分析

黄河流域内农业高质量发展与生态保护呈现明显的区域性差异：一方面上游地区以游牧产业为主，倚重于畜牧业的发展，而中游涵盖了渭北和晋南两大农业核心区，以粮食种植为主导，注重粮食生产。相较之下，下游地区地理优势显著，拥有广袤的平原和黄河三角洲等丰富自然资源，使其在农业发展中具备独特优势。就农业高质量发展指数而言，2019 年黄河上游各省 U1 均值仅为 0.329，中游为 0.393，而下游的均值达到了 0.621（见表 4），即农业高质量发展状况在各省之间尤其是中上游差距较大（见图 5）；另一方面，黄河流域各地土地资源、水资源等自然条件差异较大，上、中、下游生态保护指数平均 U2 分别为 0.565、0.532、0.724，生态环境存在的问题也不尽相同。

表 4 2019 年黄河流域上、中、下游地区耦合协调度对比

地区	特征值	U1	U2	D
上游	最大	0.437	0.652	0.730
	最小	0.271	0.501	0.615
	均值	0.329	0.565	0.655
中游	最大	0.444	0.554	0.704
	最小	0.362	0.518	0.658
	均值	0.393	0.532	0.676
下游	最大	0.746	0.827	0.887
	最小	0.495	0.620	0.744
	均值	0.621	0.724	0.816

注：U1 指农业高质量发展指数；U2 指生态保护指数；D 指耦合协调度指数

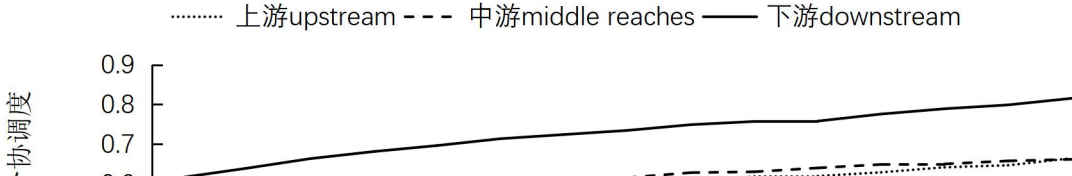


图 5 2005-2019 年上、中、下游地区耦合协调度对比

黄河流域农业高质量发展-生态保护的耦合协调程度在空间维度呈现出西低东高的特征，存在着明显的区域性差异：一方面，从各区域整体来看，中游、下游的耦合协调度均在 0.5-0.6 之间，下游地区的协调度略滞后于中游，基本位于勉强协调阶段；而上游的耦合协调度在 0.6-0.9 之间，从初级协调阶段逐步上升到良好协调阶段（见表 5）。另一方面，农业高质量发展-生态保护耦合协调度空间差异可在省域得以体现，2005 年中上游省份基本上都处于濒临失调状态，而下游省份呈现勉强协调或初级协调状态，2019 年中上游省份基本上都处于初级协调状态，而下游省份呈现中等协调或良好协调状态（见图 5）。

表 5 黄河流域省域农林经济—生态环境协调度对比

区域	省区	U1		U2		D	
		2005 年	2019 年	2005 年	2019 年	2005 年	2019 年
上游	青海省	0.205	0.286	0.287	0.501	0.493	0.615
	四川省	0.238	0.437	0.291	0.652	0.513	0.730
	甘肃省	0.194	0.271	0.254	0.527	0.471	0.615
	宁夏回族自治区	0.261	0.322	0.306	0.580	0.532	0.657
中游	山西省	0.253	0.362	0.215	0.518	0.483	0.658
	内蒙古自治区	0.270	0.444	0.229	0.554	0.499	0.704
	陕西省	0.237	0.374	0.228	0.525	0.482	0.665
下游	河南省	0.309	0.495	0.298	0.620	0.551	0.744
	山东省	0.488	0.746	0.445	0.827	0.682	0.887

注：U1 指农业高质量发展指数；U2 指生态保护指数；D 指耦合协调度指数



图6 黄河流域典型年份农业经济高质量发展-生态保护协调度分布情况

总体上看，黄河流域农业高质量发展-生态保护协调度均值由2005年的0.405提高到0.867；具体而言，在黄河中上游集中了协调度随时间推移而变化较大的主要区域。2005年，黄河流域中上游基本处于濒临失调期，川蒙地区的不协调随着时间的变化而有所好转，协调水平向上游靠拢，但陕西、甘肃、青海等地仍处于初级协调状态。

（四）黄河流域农业高质量发展滞后性分析

由图1可知：从黄河流域整体看，在2005-2009年，农业高质量发展处于发展停滞状态，分值在0.4上下波动，而生态保护发展迅速，从2005年的0.069快速上升到2009年0.395，在2009年已赶超农业高质量发展；在2010-2019十年中，农业高质量发展指数均小于生态保护指数，即农业高质量发展滞后。

由表5可知：从黄河流域上、中、下游来看，在2005年，上游和中游地区省份的农业高质量发展指数较低，耦合协调指数同样较低，各省份位于濒临失调、勉强失调两个等级内；而河南、山东处于下游地区，两省农业发展质量指数较高，且领先于生态保护指数，耦合协调指数较高，分别位于勉强协调和初级协调等级之内。2019年度黄河流域9省区农业高质量发展指数全部小于生态包会指数；对比2019年农业高质量发展指数和耦合协调指数两列数据来看，农业高质量发展指数的排名

与耦合协调度指数的排名一致；农业高质量发展指数相对较大的省份，如山东省、河南省、内蒙古，其耦合协调度也相对较高。农业发展的滞后性引起了不协调，进而造成了区域性的差异。

研究表明：目前在农业高质量发展过程中对自然资源的利用效率较低，流域内农业高质量发展的潜力还没有被充分激发出来。

究其原因，社会阶段和流域特殊地理环境决定了黄河流域农业高质量发展的滞后性：黄河流域中，恰当的地理环境和丰富的生态资源构成了农业高质量发展的基石。然而，流域内频发的洪涝灾害和持续的旱情等生态脆弱问题，成为制约农业高质量发展的重要因素。这些自然灾害不仅对农作物产量和品质造成直接影响，还引发土地退化和生态平衡失调等连锁反应，进而限制了农业高质量发展的前景。因此，针对这些问题的应对策略和综合保护措施，成为推动黄河流域农业与生态协同发展的紧迫任务。

（五）农业高质量发展与生态保护交互胁迫关系验证

表 6 黄河流域各省份交互关系的双指数关系方程式

地区	交互胁迫函数关系式	m	n	p	a	b
青海	$Z = 0.4749 - 0.5234(10^{\frac{y-0.2989}{0.0897}} - 0.6192)^2$	0.4749	0.5234	0.6192	0.0897	0.2989
四川	$Z = 0.6576 - 2.0958(10^{\frac{y-0.444}{0.7773}} - 0.9551)^2$	0.6576	2.0958	0.9551	0.7773	0.444
甘肃	$Z = 0.5397 - 0.709(10^{\frac{y-0.277}{0.0881}} - 0.7216)^2$	0.5397	0.7090	0.7216	0.0881	0.277
宁夏	$Z = 0.5763 - 0.8259(10^{\frac{y-0.3445}{0.156}} - 0.7653)^2$	0.5763	0.8259	0.7653	0.156	0.3445
内蒙古	$Z = 0.5776 - 1.176(10^{\frac{y-0.2744}{0.7534}} - 1.48)^2$	0.5776	1.176	1.48	0.7534	0.2744
山西	$Z = 0.5124 - 0.8892(10^{\frac{y-0.2634}{0.7437}} - 1.435)^2$	0.5124	0.8892	1.435	0.7437	0.2634
陕西	$Z = 0.5653 - 0.9461(10^{\frac{y-0.3656}{0.2109}} - 0.8493)^2$	0.5653	0.9461	0.8493	0.2109	0.3656
河南	$Z = 0.6396 - 0.9387(10^{\frac{y-0.4968}{0.3496}} - 0.8775)^2$	0.6396	0.9387	0.8775	0.3496	0.4968
山东	$Z = 0.8647 - 0.9821(10^{\frac{y-0.7434}{0.3727}} - 0.8414)^2$	0.8647	0.9821	0.8414	0.3727	0.7434

注：m 值代表双指数曲线拐点出现时生态保护水平；b 值反应双指数曲线拐点出现的时机；n 值表示生态保护与农业高质量发展的速率有关。

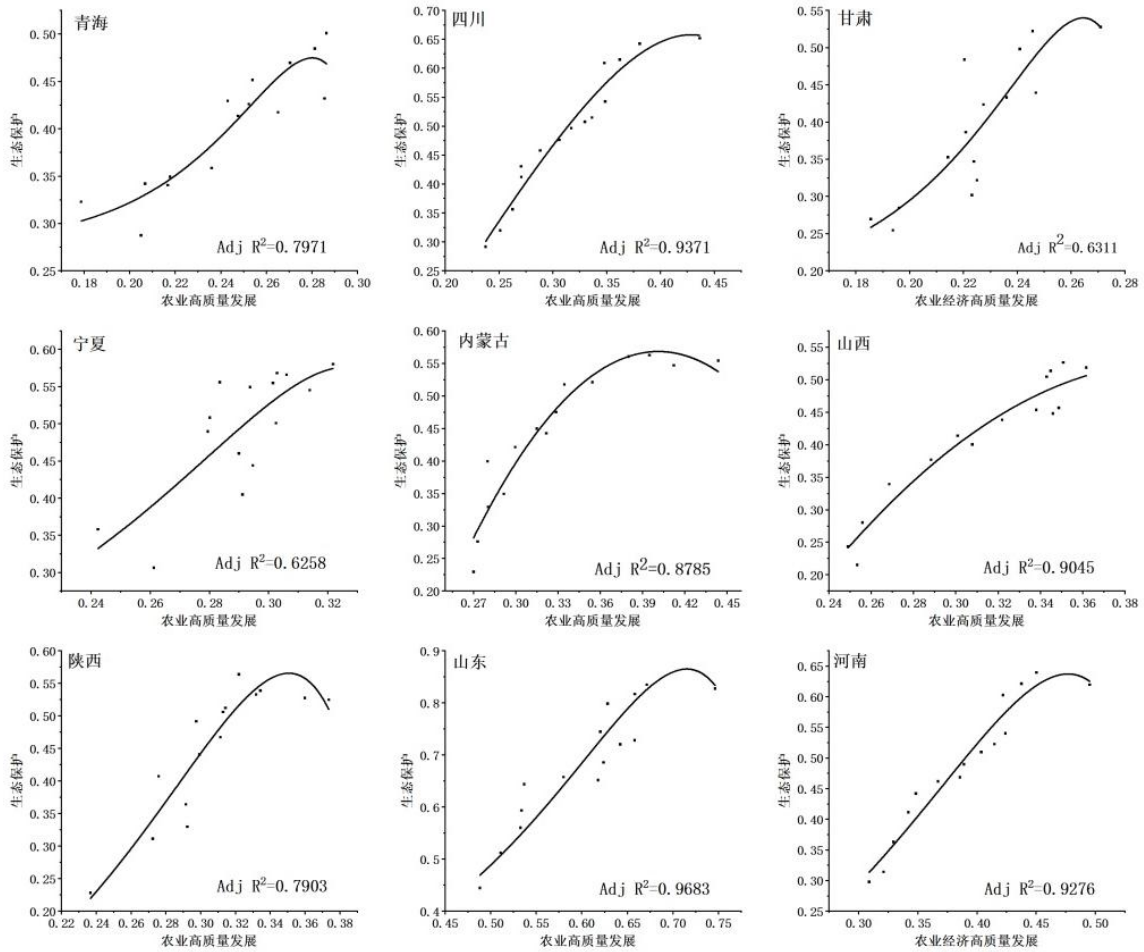


图7 黄河流域各省份农业高质量发展与生态保护交互关系双指数曲线

(1) 农业高质量发展与生态保护交互胁迫关系拟合

研究采用 MATLAB 和 ORIGINPRO2021 软件，针对 2005 至 2019 年黄河流域整体以及九个省区，开展农业高质量发展与生态保护两个子系统的双指数曲线拟合求解（见表 6）。在此基础上，推导并绘制出黄河流域整体和各省区的双指数函数拟合图（见图 7）。通过方差、标准差、决定系数 R^2 以及校正后的决定系数（Adj. R^2 ）等指标，对拟合方程的效果进行综合评估，结果显示拟合效果良好，验证了黄河流域整体及各省区的双指数曲线方程拟合效果较为优越，为深入理解农业高质量发展与生态保护的关系提供了有力支持。

(2) 农业高质量发展与生态保护交互胁迫结果分析

根据图 7 可明，黄河流域整体和 9 个省区的农业高质量发展与生态保护的互动关系演变轨迹呈现出阶段性和空间不均衡的特点。m 值代表双指数曲线拐点出现时生态保护水平，根据 m 值排列，山东>四川>河南>内蒙古>宁夏>陕西>甘肃>山西>青海，突显黄河流域农业高质量发展较快省份的生态保护水平更高。b 值则反应双指数曲线拐点的时机。从 b 值看，山东>河南>四川>陕西>宁夏>青海>甘肃>内蒙古>山西，揭示黄河流域农业高质量发展水平较高的省份拐点晚于水平较低省份，且拐点出现时农业高质量发展水平较高，这一结论山东最为典型。n 值表示生态保护与农业高质量发展的速率有关。从 n 值来看，四川>内蒙古>山东>陕西>河南>山西>宁夏>甘肃>青海，表明黄河流域各省份农业高质量发展系统变化速率越快，生态保护恶化越迅速。

根据双指数关系函数所绘制的图形如图 7 所示。农业高质量发展较迅速的省份主要分布在黄河

中下游地区，当拐点出现时，这些省份的农业高质量发展水平较为显著。而农业高质量发展进展较慢的省份则主要位于黄河上游，相对而言其生态保护水平相对较低。从生态保护水平随农业高质量发展的演变趋势来看，在出现拐点之前，生态保护水平随着农业高质量发展水平的提高而增大，在出现拐点之后，生态保护水平反而随农业高质量发展水平的进一步提高而降低。综合以上分析可知：通过所提取的双指数关系方程和曲线拟合图，有效地呈现了黄河流域 9 个省份农业高质量发展和生态保护之间的交互胁迫的动态演变过程。这 9 个省份的复合系统交互胁迫演化基本符合非线性曲线的变化规律，即农业高质量发展在生态保护方面具有显著的胁迫效应，同时生态保护也对农业高质量发展具有较强的制约作用；随着生态保护水平的提升，再次证明了后期农业高质量发展的滞后性，从而导致生态保护与农业高质量发展的反向演变趋势，进而引起发展的不协调。

（六）影响因素分析

运用灰色关联度模型深入分析影响黄河流域生态保护与农业高质量发展耦合协调度的关键因素，通过将生态环境保护和农业高质量发展的评价指标以及耦合协调度数据纳入模型，计算得出各项评价指标的灰色关联度数值，并进一步按照关联度值的大小对这些指标进行排序，从中可以明确那些具有较高灰色关联度数值的指标对于促进黄河流域生态环境保护和农业高质量发展的耦合协调度产生着更显著的影响。结果见表 7 所示。

表 7 灰色关联度结果

评价项	关联度	排名
生活垃圾无害化处理率	0.922	1
农业电气化程度	0.918	2
人均公园绿地面积	0.899	3
建成区绿化面积	0.854	4
农业机械化程度	0.842	5
农业劳动者教育水平	0.821	6
农村医疗卫生水平	0.819	7
污水处理厂集中处理率	0.806	8
农业产业链延伸	0.772	9
建成区绿化覆盖率	0.757	10
农业中间消耗量	0.751	11
农民收入水平	0.736	12
农村社会保障水平	0.736	13
单位面积农膜使用量	0.72	14
一般工业固体废物综合利用率	0.718	15
有效灌溉率	0.714	16
单位面积农药使用量	0.706	17
粮食单产	0.706	18
单位面积化肥使用量	0.701	19
农用柴油使用强度	0.7	20
农业规模化程度	0.7	21

农业劳动生产率	0.687	22
单位 GDP 废水排放量	0.673	23
农产品产值指数	0.647	24
外贸依存度	0.644	25
农作物成灾率	0.644	26
城乡居民收入比	0.635	27
第一产业比较生产率	0.625	28
农业经济增长率	0.609	29
农村居民恩格尔系数	0.59	30
单位 GDP 二氧化硫排放量	0.586	31
单位 GDP 粉尘排放量	0.55	32

根据关联结果（见表 7），关系度范围在 0.55 至 0.922 之间，可见 32 项指标在不同程度上对耦合发展度产生影响，同时明确表明农业高质量发展和生态环境保护对整体协调度产生了显著影响，这不仅强调了在推动农业发展的同时必须关注生态环境的需求，也为区域农业可持续发展提供了重要的指导意义。

各项农业高质量发展指标中，代表创新的农业电气化程度、农业机械化程度、农业劳动者教育水平、有效灌溉率、粮食单产、农业规模化程度和农业劳动生产率分别位列 2、5、6、16、18、21、22 位，说明农业创新对其耦合协调发展水平的提升意义非凡。代表协调的农业产业链延伸、农产品产值指数、第一产业比较生产率、农业经济增长率、农村居民恩格尔系数分别位列 9、24、28、29、30 位，说明协调相较于其他指标关联程度较弱，但也对农业高质量发展水平起到推动作用。代表绿色的农业中间消耗量、单位面积农膜使用量、单位面积农药使用量、单位面积化肥使用量、农用柴油使用强度、农作物成灾率分别位列 11、14、19、20、26 位。代表开放的外贸依存度位列第 25 位。代表共享的农村医疗卫生水平、农民收入水平、农村社会保障水平、城乡居民收入比分别位列 7、12、13、25、27 位。

各项生态保护指标中，代表环境压力的单位 GDP 废水排放量、单位 GDP 二氧化碳排放量、单位 GDP 粉尘排放量分别位列 23、31、32 位，说明环境压力的影响程度较弱，近年来“三废”的排放在国家的生态保护政策下正逐年下降，环境压力持续减弱。代表环境保护的生活垃圾无害化处理率、人均公园绿地面积、建成区绿地面积、污水处理厂集中处理率、建成区绿化覆盖率、一般工业固体废物综合利用率分别位列 1、3、4、8、10、15 位，说明环境保护对黄河流域整体的耦合协调发展尤为重要。

五、结论及建议

（一）主要结论

（1）整体而言，黄河流域呈现出较好的耦合协调发展趋势，保持稳健前进，但在时空格局方面存在差异，时间维度上呈现出稳定的态势并逐步提升，而空间维度上则呈现出西部较低、东部较高的格局。

（2）从总体规模看，在 2009 年之前，农业高质量发展指数超过生态保护指数，但在 2009 年之后，二者之间的差距逐渐缩小，农业高质量发展综合指数开始超过生态保护综合指数。这表明农业

高质量发展滞后导致二者发展不协调。

(3) 黄河流域各省份的确存在农业高质量发展与生态保护之间的交互胁迫关系,其演变轨迹呈现出多个“S”型曲线的组合特征。黄河中下游农业高质量发展水平较高,黄河上游生态保护水平相对薄弱。各省份后期农业高质量发展水平与生态保护水平反向变动的趋势,印证了农业高质量发展的滞后引起了发展的不协调状况。

(4) 从关联度排名来看,前五名依次为生活垃圾无害化处理率、农业电气化程度、人均公园绿地面积、建成区绿化面积和农业机械化程度。其中有三个指标出自生态保护维度的环境保护方面,有两个指标出自农业高质量发展维度的创新方面,体现出环境保护和农业创新对促进流域农业高质量发展与生态保护的耦合协调发展的重要性。

(二) 建议

(1) 加速农业高质量发展,解决滞后性问题。农业高质量发展的滞后引起了二者的不协调,在促进生态可持续发展的前提下,生态环境建设要反哺农业高质量发展。

(2) 落实创新驱动发展战略。创新是区域发展的动力源头,也是黄河流域农业高质量发展的重要一环。黄河流域的主导产业仍以农业制造业等传统产业为主,特别是中上游省份,缺乏人工智能、大数据、互联网+等与时俱进的产业。在政府大力扶持发展创业型农业、激励各大高校农科人才、提升流域整体竞争力的同时,必须推动技术革新、优化产业结构、实现产业转型升级。

(3) 重视流域发展的时空差异,平衡协同发展格局,根据关键因子设计差异化协调路径。引领和带动黄河流域东、中、西部地区协同发展,加强各省区基础设施、技术创新和环保等领域合作。中上游地区做好生态环境保护工作的同时要注重农业高质量发展,提高研发投入,注重技术创新,培育生态友好型的创新农业发展产业体系;下游地区要加大开放力度,加强生态保护,做好水土保持和污染防治,为确保黄河防洪安全建设新的生态工程;各地区各展所长,缩小差距,形成黄河流域农业优质发展、生态环境保护分工协作、协调一致的局面。

参考文献

- 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.
- 刘琳轲,梁流涛,高攀,等.黄河流域生态保护和高质量发展的耦合关系及交互响应[J].自然资源学报,2021,36(1):176-195.
- 刘同超.黄河流域生态环境与经济发展耦合胁迫关系研究[J].人民黄河,2021,43(07):13-18+23.
- 宁朝山,李绍东.黄河流域生态保护和经济发展协同度动态评价[J].人民黄河,2020,42(12):1-6.
- 孙久文,崔雅琪,张皓.黄河流域城市群生态保护和经济发展耦合的时空格局与机制分析[J].自然资源学报,2022,37(07):1673-1690.
- 张建威,黄茂兴.黄河流域经济高质量发展与生态环境耦合协调发展研究[J].统计与决策,2021,37(16):142-145.
- 石涛.黄河流域生态保护和高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J].区域经济评论,2020(03):25-34.
- 焦念涛,郑向敏,殷杰.黄河流域旅游经济与生态环境耦合协调度评价及影响因素[J].资源开发与市场,2020,36(06):591-598.
- 赵建吉,刘岩,朱亚坤,秦胜利,王艳华,苗长虹.黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J].资源科学,2020,42(01):159-171.
- 杨晨钰婧,薛永基.黄河流域农林经济与生态环境耦合协调性研究[J].人民黄河,2022,44(04):10-14+19.
- 徐辉,师诺,武玲玲,张大伟.黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J].资源科学,2020,42(01):115-126.
- 刘海,李继霞,霍静娟.中国农业高质量发展的时空格局与影响因素[J].干旱区资源与环境,2020,34(10):1-8.
- 辛岭,安晓宁.我国农业高质量发展评价体系构建与测度分析[J].经济纵横,2019(05):109-118.
- 周一星.城市化与国民生产总值关系的规律性探讨[J].人口与经济,1982(01):28-33.
- Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. *The quarterly journal of economics*, 1995, 110(2): 353-377.
- 黄金川,方创琳.城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J].地理研究,2003(02):211-220.
- 高乐华,高强.海洋生态经济系统交互胁迫关系验证及其协调度测算[J].资源科学,2012,34(01):173-184.
- 王振波,梁龙武,褚昕阳等.青藏高原旅游经济与生态环境协调效应测度及交互胁迫关系验证[J].地球信息科学学报,2019,21(09):1352-1366.
- 王兆峰,李静怡.黄河流域旅游发展与生态环境耦合协调时空演变及交互胁迫关系验证[J].长江流域资源与环境,2022,31(02):447-460.
- 焦柳丹,罗凤莲,吴雅等.轨道交通与常规公交交互胁迫关系验证分析[J].交通信息与安全,2021,39(06):126-134.
- 刘艳艳,王少剑.珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度[J].人文地理,2015,30(03):64-71.