

长江经济带省域农业生态安全与粮食安全耦合协调

甘黎黎

(华东交通大学 人文社会科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要: [目的] 探究长江经济带农业生态安全和粮食安全耦合协调状况, 为提升长江经济带农业生态安全、粮食安全及二者协调发展提供决策参考。[方法] 以长江经济带 11 个省(市)为研究尺度, 采用熵权法、综合指数模型、耦合度模型、耦合协调度模型、灰色关联度模型、灰色预测模型和指数平滑模型定量分析农业生态安全和粮食安全的耦合协调水平、耦合协调发展等级、影响因素及未来趋势。[结果] ①2002—2022 年, 长江经济带省域农业生态安全与粮食安全综合指数大多呈现较大波动态势, 省域间农业生态安全与粮食安全综合指数水平差距先缩小再扩大, 样本间的差距整体不大。②从时间维度来看, 长江经济带各省耦合协调度在 2002—2022 年期间变动较大, 总体呈上升趋势, 耦合协调等级大多升至更优一级水平。在空间维度上, 整体呈现出“上游低、中游高、下游相对较低”的分布特征, 区域差异比较显著。③农业生态安全与粮食安全是一个耦合交互的系统, 农业生态安全子系统与粮食安全子系统均对耦合协调度具有影响。长江经济带省域粮食安全子系统对耦合协调度的影响更高一些。④用指数平滑法预测长江经济带未来五年省域耦合协调度值, 不同省份呈不同趋势, 既有上升趋势, 也有小幅下降趋势。[结论] 长江经济带各省应因地制宜, 在弥补子系统短板弱项的基础上进一步增强系统内外要素的协同联动, 最终实现二者良性协同发展。

关键词: 长江经济带; 省域; 农业生态安全; 粮食安全; 耦合协调

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0223-11

中图分类号: F327

文献参数: 甘黎黎. 长江经济带省域农业生态安全与粮食安全耦合协调[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 223-233. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.024; Gan Lili. Coupling and coordination of agricultural ecological security and food security in provinces of Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 223-233.

Coupling and Coordination of Agricultural Ecological Security and Food Security in Provinces of Yangtze River Economic Belt

Gan Lili

(School of Humanities and Social Science, East China Jiao-tong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: [Objective] The coupling and coordination status of agricultural ecological security and food security was explored in order to provide decision-making reference for improving both, individually, and their coordinated development in the Yangtze River economic belt. [Methods] Taking 11 provinces (cities) in the Yangtze River economic belt as the research areas, the entropy weight method, comprehensive index model, coupling degree model, coupling coordination degree model, grey correlation degree model, grey prediction model, and exponential smoothing model were used to quantitatively analyze the coupling coordination level, coupling coordination development level, influencing factors, and future trends of agricultural ecological security and food security. [Results] ① From 2002 to 2022, the comprehensive index of agricultural ecological security and food security in most provinces of the Yangtze River economic belt showed a significant fluctuation trend. The gap in the level of comprehensive index of agricultural ecological

收稿日期: 2024-02-24

修回日期: 2024-06-04

资助项目: 国家社科资助项目“农业面源污染协同治理中的政农互动机理及政策优化研究”(20BGL227); 江西省高校人文项目“长江经济带农业生态安全与粮食安全耦合协调评价及协同路径研究”(JC23106)

第一作者: 甘黎黎(1981—), 女(汉族), 湖北省宜昌市人, 博士, 副教授, 主要从事公共政策与管理方面的研究。Email: orange.gll@163.com。

security and food security between provinces first narrowed and then expanded, and the overall gap between samples was not significant. ② From a temporal perspective, the coupling coordination degree of various provinces in the Yangtze River economic belt fluctuated significantly from 2002 to 2022, showing an overall upward trend, with most coupling coordination levels rising to a more optimal level. Regarding spatial dimension, the overall distribution characteristics show relatively low upstream, low midstream, and high downstream trends, as well as significant regional differences. ③ Agricultural ecological security and food security are a coupled and interactive system, and both the subsystems of them influence the degree of coupling coordination. The impact of the provincial grain security subsystem in the Yangtze River economic belt on the coupling coordination degree is higher. ④ Using the exponential smoothing method to predict the coupling coordination degree of provinces in the Yangtze River economic belt for the next five years, different provinces show different trends, with both upward and slightly downward trends. [Conclusion] Provinces in the Yangtze River economic belt should adapt to local conditions, further enhance the synergy and linkage of internal and external factors on the basis of filling in the shortcomings and weaknesses of the subsystems, and ultimately achieve the benign coordinated development of the two.

Keywords: Yangtze River economic belt; provincial level; agricultural ecological security; food security; coupling coordination

人口的快速增长、社会经济的飞速发展、环境污染和资源的急剧消耗给生态环境和粮食安全带来了巨大的压力。在正确分析中国国情的基础上,党和政府作出建设生态文明的战略抉择,提出确保粮食安全的战略决策,将生态安全和粮食安全纳入国家安全的重要领域,为新时代农业生态安全和粮食安全治理体系和机制创新提供了方向和指引。区域和分省粮食安全是国家粮食安全的组成部分,因此,实现长江经济带农业生态安全与粮食安全耦合协调,能维护长江经济带农业生态系统与社会经济系统的和谐统一,也能为国家粮食安全贡献力量。

学界关于生态安全和粮食安全耦合协调的研究起步较晚,文献较少,如果仅就此进行文献述评,就显得单薄而无说服力。据此,将其放在生态安全和粮食安全关系的研究中进行全面、系统的述评,则更能清晰地展现其发展脉络,呈现其研究价值。

关于生态安全和粮食安全关系的研究有:

(1) 认为生态因素影响粮食安全。杨贵羽等^[1]认为粮食生产的两大刚性约束是水资源和耕地资源。刘英基^[2]认为生态环境保障是粮食安全的基础,能够从粮食产量和质量方面对粮食安全产生重要影响。Hurni H 等^[3]认为健康的土壤对农业至关重要,两者都对实现粮食安全至关重要。Bommarco R 等^[4]认为应开发农业生态系统服务功能,提高粮食安全。Marco M 等^[5]认为农用化学品的使用增加会带来污染和水体富营养化等环境和生态风险,有毒金属在粮食中的积累,则引发健康问题。Kerrie P 等^[6]认为需要努力保护和加强地方生态系统,同时更多地关注粮

食储存,以避免破坏粮食安全的临界点。罗海平等^[7]认为生态代价是影响长江经济带粮食生产的重要因素。Anagha K 等^[8]认为为了保护农作物健康和确保粮食安全,必须减少空气污染。

(2) 将生态安全视为粮食安全的重要构成。崔明明等^[9]构建包含数量、质量、生态环境、经济和资源安全 5 个维度的粮食安全。Kopteva L 等^[10]专门探讨了世界粮食安全的生态特征。何可等^[11]认为新时代的粮食安全不仅包括产量、质量和结构安全,还包括供应的可持续性和多功能性。仇焕广等^[12]认为从长期看生态安全很大程度上决定了粮食安全的可持续发展能力,是其重要构成。

(3) 视生态安全和粮食安全同等重要且相互影响。马彩虹等^[13]以人口、耕地、粮食之间的互动关系为切入层面,对陕西省的可持续发展进行定量分析。刘渝等^[14]认为水资源生态安全和粮食安全是对立统一的概念。Richardson R B^[15]认为粮食安全通常从 3 个方面进行审查,即粮食的供应、获取和利用。生态系统通过提供促进农业生产、创造创收机会和提供烹饪能源的关键生态系统服务,直接和间接地支持这些方面。郑克强等^[16]将粮食生产和生态环境置于同等地位,进行粮食安全与生态安全空间包容性研究。薛选登等^[17]认为粮食安全水平与人均耕地生态足迹存在显著的空间正相关。

关于生态安全与粮食安全耦合的研究有:

(1) 较少学者从总体上进行了生态安全与粮食安全的耦合研究。如韩建军等^[18]进行了粮食安全和生态可持续研究。罗海平等^[19]基于生态农业协调度

EAH 模型对中国粮食主产区粮食生产与生态环境的协调性进行实证研究和预警预测。Stéphane C 等^[20]研究了墨西哥生态区域农业与农村粮食安全之间的联系。Linqi L 等^[21]在构建粮食生产和农业生态保护两系统耦合协调评价指标体系的基础上,分析了中国粮食主产区的时空分异特征及其影响因素。

(2) 较多学者进行了关于某生态要素与粮食安全的耦合研究。其中,关于水资源与粮食安全耦合研究最多。Kundhavi 等^[22]认为灌溉对未来粮食安全的重要性日益增加。主张采取多层次的水管理方法,提高生态系统服务和水生产力,促进水资源保护,保持农业、渔业和畜牧业的水质。Yaogeng T 等^[23]通过耦合系统动态(SD)模型和多目标优化模型,更好地识别可持续用水背景下 WSEF 系统之间关系的动态相互作用和协同进化过程。刘显等^[24]通过分析黄河上中游水资源自然属性以及配置、粮食消费对水资源的需求等维度,系统分析了该区域水资源与粮食安全的耦合特征。刘苗苗等^[25]研究了京津冀粮食安全与农业用水安全耦合协调。关于土地生态与粮食安全的耦合研究次之。Mwambo M F 等^[26]采用能值—数据包络分析、环境成本—效益分析、价值链分析和可持续平衡计分卡等综合方法,以支持多标准决策分析战略农业土地利用规划,这有助于提高加纳北部的粮食安全。阴柯欣等^[27]采用耕地压力指数、要素转移重心模型、灰色预测等方法,研究了 2009—2017 年宁夏回族自治区县域耕地生产力与粮食安全的时空演化特征。

总体而言,国内外相关研究起步均相对较晚,仍有较大可扩展的空间。①在深入剖析生态安全与粮食安全关系的理论研究时,现有研究往往侧重于单方面探讨生态环境对粮食生产能力的潜在影响及其内在机制,或是孤立地分析粮食种植活动对生态环境的反作用,而鲜少将两者置于同等重要的地位,共同探索其互耦与协调机制。②在实证研究领域,生态因素常被视作外生变量,导致对农业生态安全与粮食安全发展水平及两者间耦合协调发展度时空演化的实证分析不足。此外,研究模型多移植自国外研究成果,虽然具有一定的借鉴意义,但缺乏针对我国实际情况的本土化模型开发,这在一定程度上限制了研究的深度和广度。③在研究尺度的把握上,现有研究或是聚焦于某一具体省区或县域的微观层面,或是从宏观角度对全国范围进行整体性探讨。这种单一尺度的研究方法虽然有助于深入剖析局部问题或整体趋势,但难以全面揭示生态安全与粮食安全关系在不同地域、

不同层次间的复杂性和多样性。因此,研究处于长江经济带的农业生态安全与粮食安全耦合协调发展,具有极强的理论和现实意义。

1 研究区概况、数据来源与方法

1.1 研究区概况

长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 个省市。面积约 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国的 21.4%。2022 年,长江经济带总人口约 6.08×10^8 人,占全国的 43.07%; 国内生产总值 3.31×10^{13} 元,占全国的 27.34%。

1.2 数据来源

本研究所需数据通过查阅 2002—2022 年《中国统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国环境统计年鉴》,上海、江苏等 11 个省市《统计年鉴》获得相关数据并计算。

1.3 构建评价指标体系

农业生态安全一级指标根据 PSR 模型构建, Pressure-State-Response 分别表示压力—状态—响应。借鉴相关研究成果^[28],确定二级指标。农业生态压力指威胁生态平衡状态的外力因素,包括总人口、城镇化率、农业用水比例;农业生态状态决定了粮食生产条件,包括人均耕地面积、森林覆盖率、人均水资源量;农业生态响应指人类为消除农业生态系统面临的潜在威胁所做的补救措施,包括财政支农林水支出、有效灌溉率、水土流失治理面积(表 1)。

联合国粮农组织将粮食安全定义为:“保证任何人在任何时候都能够获得生存和健康所必须的食物”。基于粮食安全概念,借鉴相关研究成果^[29],从产量安全、质量安全、消费安全和资源安全 4 个方面构建评价指标。产量安全包括粮食总产量、粮食播种面积、粮食作物受灾率,质量安全包括化肥施用强度、农膜施用强度和农药施用强度,消费安全包括人口自然增长率、粮食人均占有量、粮食价格消费指数,资源安全包括单位粮食水资源消耗量和单位粮食耕地资源消耗量。

1.4 研究方法

1.4.1 熵值法 利用熵值法求出各指标权重。步骤包括:①对原始数据处理进行标准化处理,详见公式(1)—(2)。②计算第 j 项指标下第 i 个方案中占该指标的比重 P_{ij} ,见公式(3)。③计算第 j 项指标的信息熵值,见公式(4)。④对评价指标进行权重计算,见公式(5)。

表 1 农业生态安全与粮食安全耦合协调评价的指标体系及权重

Table 1 Index system and weights for coupling and coordinated evaluation of agricultural ecological security and food security

系统	1 级指标	2 级指标	指标解释	属性	权重
农业生态安全	农业生态压力(P)	总人口/人	反映总人口的变化情况	负	0.146 6
		城镇化率/%	城镇人口/总人口	负	0.167 3
		农业用水比例/%	农业用水总量/用水总量	负	0.048 5
	农业生态状态(S)	人均耕地面积(hm ² /人)	耕地面积/总人口	正	0.092 8
		森林覆盖率/%	森林面积/农业总面积	正	0.081 7
		人均水资源量(m ³ /人)	水资源总量/耕地面积	正	0.070 6
	农业生态响应(R)	财政农林水支出/亿元	财政农林水支出	正	0.169 4
		有效灌溉率/%	有效灌溉面积/农作物播种面积	正	0.111 0
		水土流失治理面积/hm ²	水土流失治理面积	正	0.112 0
		粮食安全	粮食总产量/kg	反映粮食总产量的变化情况	正
粮食安全	粮食安全	粮食播种面积/hm ²	反映粮食播种面积的变化情况	正	0.114 3
		粮食作物受灾率/%	受灾面积/农作物播种面积	负	0.099 9
		化肥施用强度/(t·hm ⁻²)	化肥施用量/耕地面积	负	0.163 8
	质量安全	农膜施用强度/(t·hm ⁻²)	农膜施用量/耕地面积	负	0.130 8
		农药施用强度/(t·hm ⁻²)	农药施用量/耕地面积	负	0.096 1
		人口自然增长率/%	人口出生率与死亡率的差值	负	0.185 0
	消费安全	粮食人均占有量(kg/人)	粮食产量/总人口	正	0.040 2
		粮食价格消费指数/%	反映粮食价格水平的变化情况	负	0.022 2
	资源安全	单位粮食水资源消耗量/(m ³ ·t ⁻¹)	农业用水总量/粮食总量	负	0.021 0
		单位粮食耕地资源消耗量/(hm ² ·t ⁻¹)	耕地总面积/粮食总量	负	0.073 5

第一步,数据标准化处理。

对于正向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (1)$$

对于负向指标:

$$X_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

第二步,计算第 i 年第 j 项指标的比重,见公式(3)。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (3)$$

第三步,计算第 j 项指标的信息熵值,见公式(4)。

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

第四步,对评价指标进行权重计算,见公式(5)。

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (5)$$

1.4.2 综合发展指数模型(T) 第一步是计算每个子系统的综合发展指数,见公式(6)。

$$U_{(z)} = \sum_{j=1}^i W_j X_{ij} \quad (6)$$

式中: $U_{(z)}$ 为各子系统的综合评价指标; W_j 是系统中每个评估指标的各自权重; x_{ij} 是每个指数各自的无量纲值; i 是对系统进行评估的年数。

第二步是计算系统的综合发展状况,见公式(7)。

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (7)$$

式中: T 为农业生态安全与粮食安全综合发展指数,取值范围为 $[0, 1]$; U_1 为农业生态安全综合指数; U_2 为粮食安全综合指数; α, β 为待定参数,本研究认为农业生态安全与粮食安全同等重要,因此 $\alpha = \beta = 0.5$,且 $\alpha + \beta = 1$ 。

1.4.3 耦合度模型(C)

$$C = \left\{ \frac{U_1 \cdot U_2}{\left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: C 为农业生态安全与粮食安全两系统耦合度,其取值范围为 $[0, 1]$,越接近 0 时,表示耦合度越弱,反之,表示耦合度越强。

1.4.4 耦合协调度模型(D)

$$D = (C \cdot T)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: D 为农业生态安全与粮食安全两系统协调度,其取值范围为 $[0, 1]$,当 D 越趋向于 0 时,表明两系统间的相互作用越消极,失调情况下的耦合导致整体未能朝着更好方向发展。参照唐启飞等^[30]研究,将耦合协调度划分为 10 个等级,便于直接反映两个系统的耦合协调程度(表 2)。

表 2 农业生态安全与粮食安全耦合协调度等级分类

Table 2 Classification of coupling coordination degree between agricultural ecological security and food security

耦合协调度	等级	耦合协调度	协调等级
0~0.09	极度失调	0.5~0.59	勉强协调
0.1~0.19	严重失调	0.6~0.69	初级协调
0.2~0.29	中度失调	0.7~0.79	中级协调
0.3~0.39	轻度失调	0.8~0.89	良好协调
0.4~0.49	濒临失调	0.9~1.00	优质协调

1.4.5 灰色关联度模型 灰色关联度分析通过计算

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (12)$$

根据关联系数进一步计算灰色关联度,计算公式为:

$$G_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_{0i}(k) \quad (13)$$

1.4.6 灰色预测模型 灰色预测模型中 GM(1,1) 的详细步骤和公式如下:

在时间序列下,GM(1,1)模型的微分方程假设:

$$\frac{dX_1}{dt} + aX_1 = \mu \quad (14)$$

基于假设的时间序列预测模型为:

$$x_1^T \hat{X}_1(k+1) = \left[x_0(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\mu}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

1.4.7 指数平滑模型 首先建立二次平滑预测模型,见公式(16)~(18):

$$D_{t+k} = a_t + b_t K \quad (16)$$

$$a_t = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)} \quad (17)$$

$$b_t = \frac{a}{1-a} \cdot [S_t^{(1)} - S_t^{(2)}] \quad (18)$$

式中: D_{t+k} 代表协调度预测值; k 表示预测的年份; a_t, b_t 为该模型参数; $S_t^{(1)}, S_t^{(2)}$ 分别为第 T 期一次指数、二次指数的平滑值,分别为公式(19)和(20):

$$S_t^{(1)} = aD_T + (1-a)S_{t-1}^{(1)} \quad (19)$$

$$S_t^{(2)} = aS_t^{(1)} + (1-a)S_{t-1}^{(2)} \quad (20)$$

式中: a 为平滑系数,取值范围(0,1); D_t 为实际耦合协调度值;初始值根据样本大小选取前 1 项—前 5 项,见式(21)。

$$S_1 = (D_1 + \dots + D_n) / n \quad (21)$$

最终求得参数 a_t, b_t , 便能够得到二次平滑预测公式。

2 结果与分析

2.1 省域农业生态安全与粮食安全综合指数分析

2002—2022 年长江经济带省域农业生态安全与

系统内两个因素变化趋势的一致性来判断二者之间的关联程度,从而判断影响因素对系统耦合协调度的影响程度。

进行灰色关联度分析的参考数列和比较数列为:

$$x_0(k) = \{x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^m\} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

$$x_i(k) = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n\} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: $x_0(k)$ 表示参考数列; $x_i(k)$ 为比较数列;计算灰色关联系数时, $\{x_0(t)\}$ 为无量纲化处理后数列,其子数列为 $\{x_i(t)\}$, 当 $k=t$ 时,计算 $\{x_0(t)\}$ 与 $\{x_i(t)\}$ 的灰色关联系数,具体公式为:

粮食安全综合指数如图 1 和表 3 所示。从图 1 可知,2002—2022 年,长江经济带省域农业生态安全与粮食安全综合指数大多呈现较大波动态势,其中,江苏、浙江、安徽、湖南、四川、云南等省呈波动式上升趋势,上海、江西、湖北、重庆、贵州等省市呈波动式微弱下降态势。从表 3 可知,2002—2022 年,长江经济带农业生态安全与粮食安全综合指数极差由 2002 年的 0.201 波动上升至 2022 年的 0.348,说明省域间农业生态安全与粮食安全综合指数水平差距先缩小再扩大。平均值为 0.433~0.521,表现波动变化特征,表明长江经济带农业生态安全与粮食安全综合指数水平时有波动,同时,还有待提高。标准差呈现波动状态,最大值为 0.103,表明长江经济带省域尺度上农业生态安全与粮食安全综合指数平均值的离散程度较小且处于波动变化趋势,样本间的差距整体不大。

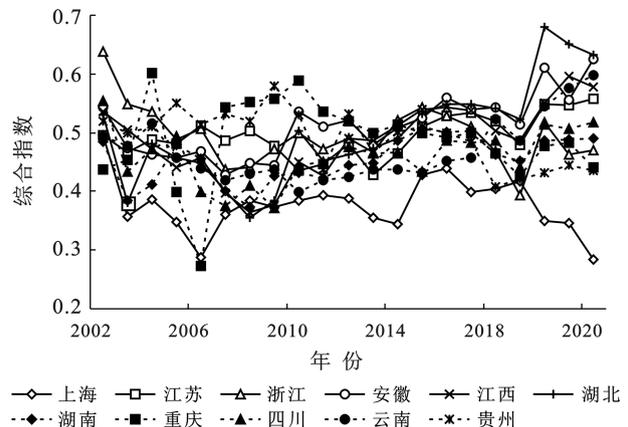


图 1 长江经济带省域农业生态安全与粮食安全综合指数变化
Fig.1 Changes in comprehensive index of agricultural ecological security and food security in province of Yangtze River economic belt

2.2 省域农业生态安全与粮食安全耦合协调度分析

2.2.1 时序特征 从时间维度来看,长江经济带各省耦合协调度在 2002—2022 年期间变动较大

(图 2), 总体呈上升后下降再上升的波动发展趋势, 耦合协调等级大多升至更优一级水平。① 2002—2011 年期间, 长江经济带省域处于失调状态的年份占 36.37%, 其中, 处于濒临失调的年份占 10%、处于轻度失调的年份占 12.73%, 处于中度失调的年份占 10.91%, 处于严重失调的年份占 2.73%。长江经济带省域处于协调状态的年份占 63.64%, 其中, 处于勉强协调的年份占 18.18%, 处于初级协调的年份占 19.09%, 处于中级协调的年份占 13.63%, 处于良好协调的年份占 11.82%, 处于优质协调的年份占 0.9%。② 2012—2022 年期间, 耦合协调度有了较大上升幅度。长江经济带省域处于失调状态的年份仅占 8.27%, 其中, 处于濒临失调的年份占 5.79%、处于轻度失调的年份占 0.8%、处于中度失调的年份占 1.65%。长江经济带省域处于协调状态的年份占 91.73%, 其中, 处于勉强协调的年份占 9.09%, 处于初级协调的年份占 25.62%, 处于中级协调的年份占 33.88%, 处于良好协调的年份占 19.01%, 处于优质协调的年份占 4.13%。

表 3 长江经济带省域农业生态安全与粮食安全综合指数数据分析

Table 3 Comprehensive index data on agricultural ecological security and food security in provinces of Yangtze River economic belt

年份	农业生态安全与粮食安全综合指数				
	最大值	最小值	极差	平均值	标准差
2002	0.638	0.438	0.201	0.521	0.051
2003	0.549	0.357	0.192	0.453	0.059
2004	0.601	0.386	0.215	0.485	0.058
2005	0.551	0.348	0.203	0.459	0.053
2006	0.514	0.274	0.24	0.433	0.083
2007	0.544	0.361	0.183	0.435	0.061
2008	0.551	0.355	0.196	0.434	0.066
2009	0.579	0.371	0.208	0.446	0.072
2010	0.588	0.384	0.204	0.473	0.063
2011	0.536	0.393	0.143	0.451	0.041
2012	0.533	0.389	0.144	0.476	0.044
2013	0.5	0.355	0.145	0.455	0.039
2014	0.522	0.345	0.177	0.477	0.051
2015	0.543	0.428	0.116	0.496	0.044
2016	0.56	0.439	0.122	0.507	0.039
2017	0.549	0.398	0.15	0.5	0.044
2018	0.543	0.405	0.138	0.484	0.048
2019	0.523	0.393	0.129	0.458	0.043
2020	0.68	0.349	0.331	0.519	0.087
2021	0.651	0.347	0.304	0.514	0.083
2022	0.633	0.285	0.348	0.512	0.103

2.2.2 空间特征 从总体上看, 长江经济带农业生态安全与粮食安全耦合协调度空间维度上呈现出“上游低中游高下游相对较低”的分布特征(图 3), 区域差异比较显著。① 长江经济带下游地区耦合协调度处于协调状态的年份占 78.57%, 其中, 占比排名前 3

且超过 10% 的有 3 个等级, 包括初级协调、中级协调和勉强协调, 共占 70.24%。② 长江经济带中游地区耦合协调度处于协调状态的年份占 79.37%, 其中, 占比排名前三且超过 10% 的有 3 个等级, 包括良好协调、初级协调和中级协调, 共占 66.67%。③ 长江经济带上游地区耦合协调度处于协调状态的年份占 77.378%, 其中, 所占比例排名前三且超过 10% 的有 3 个等级, 包括中级协调、初级协调和良好协调, 共占 59.52%。

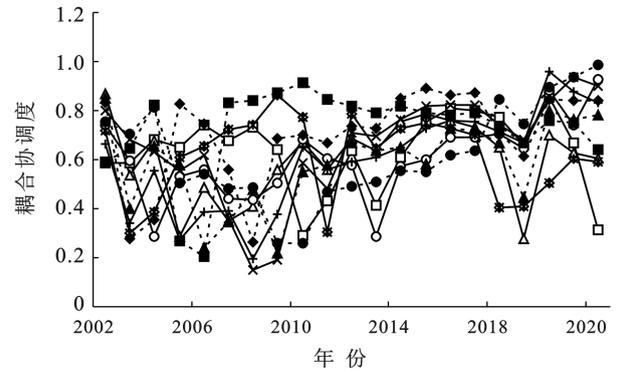


图 2 2002—2022 年长江经济带分省耦合协调度变化

Fig.2 Coupling coordination degree changes in province of Yangtze River economic belt from 2002 to 2022

截取 2002, 2012, 2022 年耦合协调度(图 3), 从横向省域对比分析长江经济带农业生态安全与粮食安全耦合协调度的空间分布特征。2002 年, 长江经济带所有省份耦合协调度均处于协调水平, 其中, 处于勉强协调等级的包括江苏、重庆, 处于初级协调等级的包括湖北, 处于中级协调的包括上海、安徽、云南和贵州, 处于良好协调等级的包括浙江、江西、湖南。2012 年, 长江经济带大多数省份耦合协调度均处于协调水平, 其中, 处于勉强协调等级的包括安徽、湖北, 处于初级协调等级的包括江苏、浙江、四川省, 处于中级协调的包括上海、江西、湖南和贵州省, 处于良好协调等级的包括重庆市; 云南省处于濒临失调水平。2022 年, 长江经济带大多数省份耦合协调度均处于协调水平, 且协调水平较高, 其中, 处于勉强协调等级的包括上海、贵州地区, 处于初级协调等级的包括浙江、重庆地区, 处于中级协调的包括四川, 处于良好协调等级的包括江西、湖北、湖南省; 处于优质协调等级的包括安徽和云南; 江苏省处于轻度失调水平。

2.3 省域农业生态安全与粮食安全耦合协调度影响因素分析

从表 4 可知, 各省农业生态安全子系统和粮食安全子系统二级指标对耦合协调度的影响各不相同。

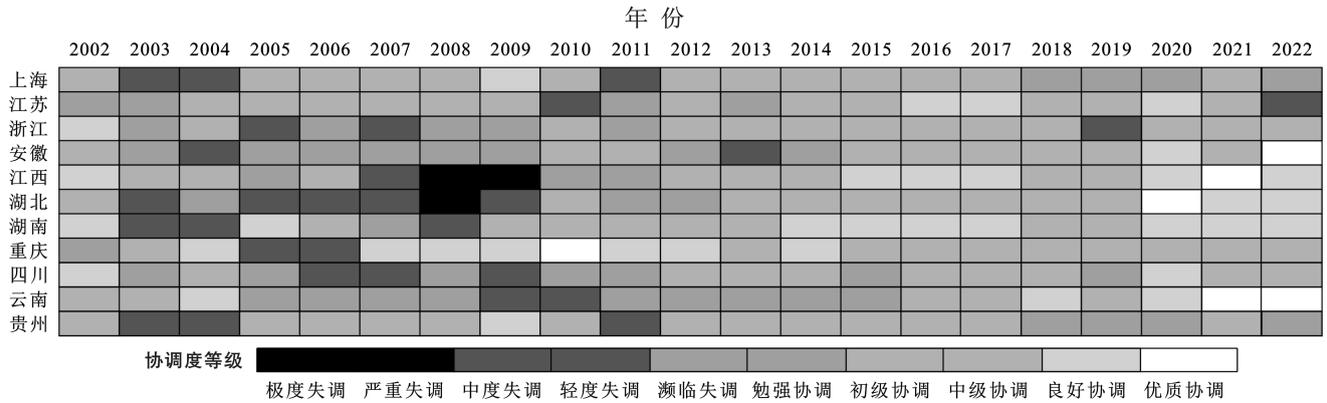


图 3 2002—2022 年长江经济带各省耦合协调度等级变化

Fig.3 Changes in coupling coordination levels among provinces of Yangtze River economic belt from 2002 to 2022

表 4 长江经济带系统耦合协调度与各子系统指标的关联度

Table 4 Correlation degree between system coupling coordination degree and various subsystem indicators of Yangtze River economic belt

评价项二级指标	上海		江苏		浙江		安徽		江西		湖北		湖南		重庆		四川		云南		贵州	
	关联度	排名																				
总人口	0.515	6	0.612	5	0.590	7	0.677	5	0.554	9	0.559	8	0.501	9	0.551	8	0.599	9	0.642	9	0.631	3
城镇化率	0.434	8	0.602	6	0.565	9	0.623	9	0.589	8	0.536	9	0.509	8	0.475	9	0.627	6	0.650	8	0.563	6
农业用水占比	0.644	2	0.670	1	0.660	3	0.704	4	0.728	3	0.642	7	0.660	2	0.628	5	0.616	8	0.656	7	0.714	1
人均耕地面积	0.5	7	0.629	3	0.635	5	0.634	7	0.670	6	0.655	6	0.644	4	0.729	2	0.624	7	0.676	6	0.676	2
森林覆盖率	0.602	3	0.593	7	0.677	2	0.718	2	0.768	1	0.676	4	0.661	1	0.639	4	0.767	1	0.711	4	0.590	4
人均水资源量	0.653	1	0.643	2	0.650	4	0.666	6	0.653	7	0.665	5	0.631	5	0.663	3	0.715	2	0.708	5	0.513	9
财政农林水支出	0.547	5	0.613	4	0.625	6	0.706	3	0.721	4	0.741	3	0.600	7	0.615	6	0.668	4	0.740	2	0.536	8
有效灌溉率	0.58	4	0.574	8	0.714	1	0.633	8	0.673	5	0.773	1	0.645	3	0.745	1	0.666	5	0.724	3	0.562	7
水土流失治理面积	0.4	9	0.570	9	0.567	8	0.726	1	0.737	2	0.761	2	0.607	6	0.579	7	0.675	3	0.779	1	0.569	5
粮食总产量	0.674	3	0.677	6	0.584	9	0.674	4	0.693	7	0.781	4	0.740	5	0.804	1	0.742	1	0.749	4	0.701	1
粮食播种面积	0.721	1	0.656	8	0.431	11	0.699	3	0.697	6	0.788	1	0.679	7	0.457	11	0.591	7	0.671	8	0.497	11
粮食作物受灾率	0.514	9	0.681	5	0.690	2	0.732	1	0.759	2	0.773	5	0.770	1	0.671	4	0.688	4	0.768	2	0.620	6
化肥施用强度	0.662	4	0.663	7	0.726	1	0.597	7	0.651	8	0.697	7	0.512	11	0.776	2	0.553	11	0.583	11	0.528	9
农膜施用强度	0.477	10	0.586	10	0.608	7	0.603	6	0.602	9	0.612	10	0.545	9	0.634	6	0.577	9	0.609	10	0.526	10
农药施用强度	0.613	5	0.610	9	0.638	4	0.589	9	0.589	10	0.530	11	0.562	8	0.674	3	0.612	6	0.747	5	0.566	8
人口自然增长率	0.714	2	0.476	11	0.584	8	0.596	8	0.561	11	0.634	9	0.526	10	0.501	9	0.579	8	0.712	6	0.700	2
粮食人均占有量	0.591	6	0.698	2	0.566	10	0.719	2	0.701	5	0.787	2	0.766	2	0.632	7	0.704	2	0.750	3	0.636	5
粮食价格消费指数	0.468	11	0.692	3	0.622	6	0.643	5	0.763	1	0.663	8	0.763	3	0.655	5	0.616	5	0.710	7	0.664	4
单位粮食水资源消耗量	0.570	7	0.699	1	0.647	3	0.565	11	0.721	4	0.781	3	0.747	4	0.580	8	0.560	10	0.657	9	0.695	3
单位粮食耕地消耗量	0.515	8	0.686	4	0.623	5	0.572	10	0.748	3	0.755	6	0.684	6	0.491	10	0.693	3	0.789	1	0.612	7

2.3.1 下游省份农业生态安全与粮食安全耦合协调度影响因素分析 在上海市的农业生态安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 3 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 5 个。在江苏省的农业生态安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 6 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 9 个。在浙江省的农业生态安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 6 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 7 个。在安徽省农业生态安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 9 个,且排名前 3 的二级指标的关

联度均超过 70%;在粮食安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 6 个。由此可见,上海市、江苏省、浙江省粮食安全的二级指标比农业生态安全的二级指标对耦合协调度的影响更大,这意味着下游多数省份应重点加强农业生态安全。

2.3.2 中游省份农业生态安全与粮食安全耦合协调度影响因素分析 在江西省农业生态安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 7 个,其中,排名前 3 的二级指标关联度均超过 70%;在粮食安全子系统中,关联度超过 60%的二级指标有 9 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%。在湖北省的农业

生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 10 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%。在湖南省的农业生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%。由此可见,江西省、湖北省、湖南省粮食安全的二级指标比农业生态安全的二级指标对耦合协调度的影响更大,这意味着中游所有省份应重点加强农业生态安全。

2.3.3 上游省份农业生态安全与粮食安全耦合协调度影响因素分析 在重庆市的农业生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 6 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个。在四川省农业生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 8 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 6 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%。在云南省的农业生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 10 个,且排名前 3 的二级指标的关联度均超过 70%。在贵州省的农业生态安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 3 个;在粮食安全子系统中,关联度超过 60% 的二级指标有 7 个。由此可见,重庆市、云南省、贵州省粮食安全的二级指标比农业生态安全的二级指标对耦合协调度的影响更大,这意味着上游多数省份应重点加强农业生态安全。

总之,长江经济带省域粮食安全子系统比农业生态安全子系统对二者耦合协调度的影响更大一些。

2.4 省域农业生态安全与粮食安全耦合协调度预测分析

为了更直观地反映出长江经济带农业生态安全与粮食安全复合系统在 2023—2027 年的协调发展趋势,分别用灰色预测模型和指数平滑模型对未来 5 a 协调发展趋势进行预测。用灰色预测模型进行预测时,上海、江苏、浙江、重庆、云南、贵州地区的后验差比 C 值大于 0.65,未通过检验;通过检验的安徽、江西、湖北、湖南、四川 5 省预测结果均为持续上升状态。而指数平滑模型预测的耦合协调度值在不同省份呈不同趋势,既有上升趋势,也有呈小幅下降趋势;且指数平滑法预测对农业生态安全与粮食安全复合系统的预测更为客观和平稳,平均相对误差也明显低于灰色预测模型结果。因此,本研究选取指数平滑模型进行预测。

由图 4 可知,呈上升趋势的省份包括安徽、湖北、湖南、四川,湖南省和安徽省的耦合协调度将会超过湖北省;呈持平趋势的省份包括云南和江苏,云南省的耦合协调度明显优于江苏省;呈较明显下降趋势的省份包括江西、重庆、浙江地区,呈略微下降趋势的省份包括上海和贵州。结果充分显示,江西、重庆、浙江、上海和贵州地区还有较大进步空间。

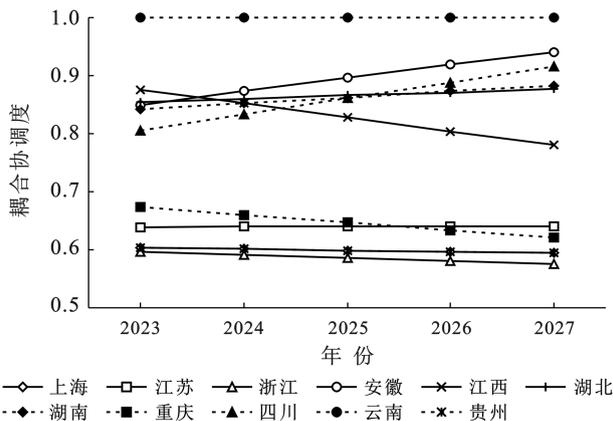


图 4 2023—2027 年长江经济带指数平滑模型预测
Fig. 4 Prediction of exponential smoothing model of Yangtze River economic belt from 2023 to 2027

3 结论

基于 2002—2022 年长江经济带农业生态安全与粮食安全统计数据,多方面构建两者评价指标体系,并利用熵值法、综合发展指数模型、耦合度模型、耦合协调模型、灰色关联度模型、指数平滑模型,分析 2002—2022 年长江经济带农业生态安全与粮食安全耦合协调关系及关联度,得出如下结论:

(1) 2002—2022 年,长江经济带省域农业生态安全与粮食安全综合指数大多呈现较大波动态势,其中,江苏、浙江、安徽、湖南、四川、云南省呈波动式上升趋势,上海、江西、湖北、重庆、贵州等省市呈波动式缓慢下降态势。省域间农业生态安全与粮食安全综合指数水平差距先缩小再扩大,综合指数平均值离散程度较小且呈波动变化趋势,样本间的差距整体不大。

(2) 农业生态安全与粮食安全的耦合协调发展过程具有一定波动性,空间上具有差异性。从时间维度来看,长江经济带各省耦合协调度在 2002—2022 年期间变动较大,总体呈上升发展趋势,耦合协调等级大多升至更优一级水平。在空间维度上,长江经济带省域农业生态安全与粮食安全耦合协调度整体呈现出“上游低中游高下游相对较低”的分布特征,区域差异比较显著。

(3) 农业生态安全与粮食安全是一个耦合交互的

系统,农业生态安全子系统与粮食安全子系统均对耦合协调度具有影响,粮食安全子系统比农业生态安全子系统对二者耦合协调度的影响略高。在粮食安全子系统中,影响更显著的因素为粮食人均占有量、粮食作物受灾率、单位粮食水资源消耗量、粮食总产量;在农业生态安全子系统中,影响更显著的因素为农业用水比例、森林覆盖率、有效灌溉率、水土流失治理面积。各省农业生态安全子系统和粮食安全子系统中的二级指标对耦合协调度的影响则各不相同,但是大多数省份粮食安全子系统比农业生态安全子系统对二者耦合协调度的影响高一些。

(4) 利用指数平滑法预测长江经济带农业生态安全与粮食安全未来5a的耦合协调度,预测结果在不同省份呈不同趋势,既有上升趋势,也有呈小幅下降趋势。江西、重庆、浙江、上海和贵州等省市还有较大进步空间。

总之,上述结论不仅可以较为合理地呈现长江经济带各省市农业生态安全与粮食安全与周围邻域的空间集聚层次及耦合协调差异状况,也可为其他地区同类型研究提供一定参考。

4 建议

(1) 因地制宜,推进长江经济带各省农业生态安全和粮食安全耦合协调发展。上海、江西、湖北、重庆、贵州需要综合提升农业生态安全和粮食安全。上海、江苏、安徽、湖南、云南、贵州等省市的农业生态安全指数相对较低,需要更加重视农业生态安全。浙江、四川和重庆3省(市)的粮食安全指数相对较低,应更加重视发展粮食安全。

优化农业生态安全的措施包括:①提升农业水资源利用效率。一方面,应利用科技手段,提高农业用水灌溉水平,提高有效灌溉率;另一方面,采用免耕技术,打破犁底层,利于农田保墒,进而达到减少农业用水的目的。②继续植树造林,增加森林覆盖率,加强水土涵养,减少水土流失。③继续推进化肥、农药、农膜施用量减量行动,从源头上进一步降低农业面源污染。

优化粮食安全的措施包括:①应当增强农民的粮食安全保障意识,严格遵守耕地保护红线,确保耕地数量不减、质量不降。②继续推进兴修水利,进行土地平整、灌排水渠、农田电网等综合设施建设工作,进一步改善区域粮食种植条件,减少农作物受灾情况,驱动传统农业生产向绿色农业生产转变。③强化农业科技支撑,提高粮食综合生产能力,确保“藏粮于技”。④建立严格的惩戒机制。惩戒耕地等生态因素破坏行为,确保耕地等生态要素的生产、生活、生态功能。

(2) 整体推进,促进长江经济带农业生态安全和粮食安全耦合协调发展。①加强制度保障。在战略层面,在长江经济带落实“藏粮于地”“藏粮于技”战略,加强政府对土地利用的宏观调控与全面监管,实现农业生态安全与粮食综合生产能力的耦合协调发展。在政策层面,充分考虑农业生态政策和粮食安全政策产生的外部影响以及与其他行业政策的交互影响,制定科学合理的农业生态安全规划,减少农业面源污染,提升农业生态安全,制定科学的粮食安全政策,确保粮食生产、质量、消费和资源安全。②加强多部门协同治理。农业生态安全、粮食安全不仅相互独立,还相互关联。应注重农业农村部门、水利部门、生态环境部门、自然资源部门、粮食和物资储备的跨部门协调合作,建立起合作共赢新的发展机制。③因地制宜、梯次推进。由于长江经济带各省(市)间资源禀赋差距较大,且自身发展水平也存在差异,因此,区域间存在较显著差异,因此应按照因地制宜、梯次推进等原则,确定研究区各省(市)农业生态安全与粮食安全协调发展的方向和重点。④需要加强区域间资源共享。应促进长江经济带农业生态安全与粮食安全的耦合协调发展,缩小区域发展差异,实现农业生态环境、粮食安全利益最大化,提高长江经济带农业生态安全和粮食安全的整体水平。

由于数据的制约和各子系统内部组成要素关系的复杂性,且本研究在省域层面上展开,分析可能不够全面和完善。未来,将从多尺度视角探讨农业生态安全与粮食安全的耦合协调关系,并积极探索两个子系统内部多要素影响机制,以及与其他系统之间的内在联系。

参考文献(References)

- [1] 杨贵羽,汪林,王浩.基于水土资源状况的中国粮食安全思考[J].农业工程学报,2010,26(12):1-5.
Yang Guiyu, Wang Lin, Wang Hao. Thinking of food security in China based on regional water resources and land cultivation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(12):1-5.
- [2] 刘英基.农业生态环境对粮食安全的作用机理及对策[J].农机化研究,2012,34(4):232-235.
Liu Yingji. The agro-ecological environment protection mechanisms and countermeasures to food security [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(4):232-235.
- [3] Hurni H, Giger M, Liniger H, et al. Soils, agriculture and food security: The interplay between ecosystem functioning and human well-being [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2015,15:25-34.

- [4] Bommarco R, Vico G, Hallin S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security [J]. *Global Food Security*, 2018, 17:57-63.
- [5] Mng'ong'o M, Munishi L K, Ndakidemi P A, et al. Toxic metals in East African agro-ecosystems: Key risks for sustainable food production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294:112973.
- [6] Pickering K, Pearce T, Manuel L, et al. Socio-ecological challenges and food security in the 'salad bowl' of Fiji, Sigatoka Valley [J]. *Regional Environmental Change*, 2023, 23(2):61.
- [7] 罗海平, 王佳铖, 胡学英, 等. 粮食主产区粮食安全与生态安全脆弱性耦合研究[J]. *统计与信息论坛*, 2023, 38(7): 117-128.
Luo Haiping, Wang Jiacheng, Hu Xueying, et al. Study on coupling of vulnerability of food security and ecological security in major grain producing areas [J]. *Journal of Statistics and Information*, 2023, 38(7):117-128.
- [8] Anagha K S, Kuttippurath J, Sharma M, et al. A comprehensive assessment of yield loss in rice due to surface ozone pollution in India during 2005—2020: A great concern for food security [J]. *Agricultural Systems*, 2024, 215:103849.
- [9] 崔明明, 聂常虹. 基于指标评价体系的我国粮食安全演变研究[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(8):910-919.
Cui Mingming, Nie Changhong. Study on food security in China based on evaluation index system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(8):910-919.
- [10] Kopteva L, Shabalina L, Kashirina E. Ecological aspects of the world food security [J]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 91:06011.
- [11] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2021, 21(3):45-57.
He Ke, Song Hongyuan. China's food security under the constraints of resources and environment: Connotation, challenges and policy orientation [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2021, 21(3):45-57.
- [12] 仇焕广, 雷馨圆, 冷淦潇, 等. 新时期中国粮食安全的理论辨析[J]. *中国农村经济*, 2022(7):2-17.
Qiu Huanguang, Lei Xinyuan, Leng Ganxiao, et al. A comprehensive theoretical analysis of grain security in the new era [J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(7): 2-17.
- [13] 马彩虹, 赵先贵. 人口—耕地—粮食互动关系与区域可持续发展: 以陕西省为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(2):50-54.
Ma Caihong, Zhao Xiangui. The Pop-farmland-grain system relationship and the district sustainable development: A case study of Shaanxi Province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(2): 50-54.
- [14] 刘渝, 张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. *资源科学*, 2010, 32(12):2292-2297.
Liu Yu, Zhang Junbiao. Analysis on temporal differences in water resources security and grain security in China [J]. *Resources Science*, 2010, 32(12):2292-2297.
- [15] Richardson R B. Ecosystem services and food security: Economic perspectives on environmental sustainability [J]. *Sustainability*, 2010, 2(11):3520-3548.
- [16] 郑克强, 金恩焘, 宋焱, 等. 我国粮食安全与生态安全空间包容性研究: 以粮食主产区为例[J]. *山东社会科学*, 2019(2):124-129.
Zheng Keqiang, Jin Entao, Song Yan, et al. A positive study of the spatial inclusion of China's food security and ecological security: Taking the main grain producing areas for instances [J]. *Shandong Social Sciences*, 2019(2):124-129.
- [17] 薛选登, 冯誉萱. 农业高质量发展与农业水足迹的脱钩关系研究: 基于黄河流域 9 省的实证分析[J]. *节水灌溉*, 2023(6):83-90.
Xue Xuandeng, Feng Yuxuan. Study on the decoupling relationship between agricultural high quality development and agricultural water footprint: An empirical analysis based on 9 provinces in the Yellow River basin [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(6):83-90.
- [18] 韩建军, 杨雅冰. 粮食安全与生态可持续耦合协调研究: 以长江经济带为例[J]. *生态经济*, 2024, 40(07):196-202.
Han Jianjun, Yang Yabing. Study on coupling coordination between food security and ecological sustainability: A case study of the Yangtze River economic belt [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(07):196-202.
- [19] 罗海平, 潘柳欣, 宋焱, 等. 基于生态系统服务价值的中国粮食主产区农业—生态协调性实证测算与预警[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(3):760-768.
Luo Haiping, Pan Liuxin, Song Yan, et al. Measurement and warning of agro-ecological coordination in China's major grain-producing areas based on ecosystem service value [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(3):760-768.
- [20] Couturier S, Galeana-Pizaña J M, Figueroa D, et al. The link between agriculture and rural food security in the ecoregions of Mexico: Path diagrams and underlying dataset [J]. *Data in Brief*, 2022, 44:108543.
- [21] Liu Linqi, Wang Xinyue, Meng Xuanzhu, et al. The coupling and coordination between food production security and agricultural ecological protection in main food-

- producing areas of China [J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110785.
- [22] Kadiresan K, Khanal P R. Rethinking irrigation for global food security [J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(1):8-11.
- [23] Tan Yaogeng, Dong Zengchuan, Guzman S M, et al. Identifying the dynamic evolution and feedback process of water resources nexus system considering socioeconomic development, ecological protection, and food security: A practical tool for sustainable water use [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021,25(12):6495-6522.
- [24] 刘显,徐悦悦,孙从建,等.黄河上中游水资源与粮食安全耦合关系特征分析:以陕甘宁青为例[J].*地球环境学报*,2022,13(4):369-379.
Liu Xian, Xu Yueyue, Sun Congjian, et al. Analysis of the coupling characteristics between water resources and food security in the upper and middle reaches of the Yellow River: A case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region, Northwest China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2022,13(4):369-379.
- [25] 刘苗苗,潘佩佩,任佳璇,等.京津冀粮食安全与农业用水安全耦合协调研究[J].*中国农业资源与区划*,2023,44(2):170-182.
Liu Miaomiao, Pan Peipei, Ren Jiakuan, et al. Coupling coordination of food security and agricultural water security in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(2):170-182.
- [26] Mwambo F M, Fürst C, Nyarko B K, et al. Maize production and environmental costs: Resource evaluation and strategic land use planning for food security in northern Ghana by means of coupled energy and data envelopment analysis [J]. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104490.
- [27] 阴柯欣,商庆凯,米文宝.宁夏耕地生产力与粮食安全耦合关系及趋势预测[J].*干旱区资源与环境*,2020,34(7):37-45.
Yin Kexin, Shang Qingkai, Mi Wenbao. Analysis and forecast of coupling relationship between cultivated land productivity and food security in Ningxia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7): 37-45.
- [28] 罗海平,余兆鹏,邹楠.我国粮食主产区生态与粮食安全耦合协调分析:基于1995—2015年面板数据[J].*中国农业资源与区划*,2020,41(10):32-39.
Luo Haiping, Yu Zhaopeng, Zou Nan. The empirical study on the spatial coupling of ecology and food security in major grain-producing areas in China: Based on 1995—2015 panel data [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020,41(10): 32-39.
- [29] 薛选登,马路.粮食主产区土地生态与粮食安全耦合协调性分析[J].*中国农业资源与区划*,2022,43(9):1-11.
Xue Xuandeng, Ma Lu. Analysis on the coupling and coordination of land ecological and food security in main grain producing areas [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(9): 1-11.
- [30] 唐启飞,何蒲明.农业生态环境:粮食生产:农业补贴耦合协调发展研究:以湖北省为例[J].*生态经济*,2019,35(9):116-120.
Tang Qifei, He Puming. Analysis of coupling coordination development among the agricultural Environment Grain production-agricultural subsidy: A case study of Hubei Province [J]. *Ecological Economy*, 2019,35(9): 116-120.
- Wu Lan, Wu Quan, Aodeng Gaowa, et al. Evaluation of environmental carrying capacity of land and space resources in Liangcheng County [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 100-107.
- [34] 吴浩,江志猛,林安琪,等.基于隐性—韧性—显性的武汉城市资源环境承载力空间特征[J].*地理学报*,2021, 76(10):2439-2457.
Wu Hao, Jiang Zhimeng, Lin Anqi, et al. Analyzing spatial characteristics of urban resource and environment carrying capacity based on Covert-Resilient-Overt: A case study of Wuhan City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021,76(10):2439-2457.

(上接第 161 页)

- [32] 潘昱奇,李满春,姜朋辉,等.基于多源国土空间数据的资源环境综合承载力及人口承载力评价:以江苏省常州市为例[J].*水土保持通报*,2021,41(4):350-356.
Pan Yuqi, Li Manchun, Jiang Penghui, et al. Evaluation on comprehensive carrying capacity of resources and environment, and population carrying capacity based on multi-source land spatial data: Taking Changzhou City of Jiangsu Province as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(4):350-356.
- [33] 乌兰,吴全,敖登高娃,等.凉城县国土空间资源环境承载力评价研究[J].*干旱区资源与环境*,2022,36(7): 100-107.