



河南农业大学学报
Journal of Henan Agricultural University
ISSN 1000-2340, CN 41-1112/S

《河南农业大学学报》网络首发论文

题目: 粮食主产区农业生态环境与农业经济的耦合协调及空间关联分析
作者: 尚杰, 丛殿勤
DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20220824.002
收稿日期: 2022-02-16
网络首发日期: 2022-08-25
引用格式: 尚杰, 丛殿勤. 粮食主产区农业生态环境与农业经济的耦合协调及空间关联分析[J/OL]. 河南农业大学学报.
<https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20220824.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

粮食主产区农业生态环境与农业经济的耦合协调及空间关联分析

尚杰, 丛殿勤

(东北林业大学经济管理学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 【目的】探索中国粮食主产区农业生态环境与农业经济耦合协调规律及空间关联特征, 为实现农业生态环境与农业经济协同发展提供智力支持。【方法】基于 2005—2020 年省际面板数据, 运用耦合协调度模型、空间自相关模型对粮食主产区农业生态环境与农业经济的耦合时空特征及空间关联格局进行实证分析。【结果】粮食主产区农业生态环境与农业经济间耦合协调度呈现缓慢上升趋势和“北高南低”的空间非均衡化发展。农业生态环境、农业经济均表现出全局空间正相关, 其下存在局部空间分异, 两者间为空间正相关关系, 高-高、低-低是主要空间集聚模式。【结论】应充分考虑农业生态环境与农业经济的区域关联性和空间异质性, 加强临近地区间农业生产协作与交流, 提升区域协同治理效率。

关键词: 粮食主产区; 农业生态环境; 农业经济; 耦合协调; 空间自相关

中图分类号: X322; F327 **文献标志码:** A

Coupling coordination and spatial correlation analysis of agricultural ecological environment and agricultural economy in major grain producing areas

SHANG Jie, CONG Dianqin

(School of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China)

Abstract: 【Objective】To explore the coupling and coordination law and spatial correlation characteristics of agricultural ecological environment and agricultural economy in major grain producing areas in China, so as to provide intellectual support for the coordinated development of agricultural ecological environment and agricultural economy. 【Method】Based on the inter provincial panel data from 2005 to 2020, the coupling spatial-temporal characteristics and spatial correlation pattern of agricultural ecological environment and agricultural economy in the main grain producing areas are empirically analyzed by using the coupling coordination degree model and spatial autocorrelation model. 【Result】The coupling coordination degree between agricultural ecological environment and agricultural economy in the main grain producing areas shows a slow upward trend and the spatial unbalanced development of "high in the north and low in the South". Agricultural ecological environment and agricultural economy both show a positive correlation in the overall space, under which there is local spatial differentiation. There is a positive spatial correlation

收稿日期: 2022-02-16

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目 (20FGLB059)

作者简介: 尚杰 (1962—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 从事农业经济、生态经济方面的研究

between them. High high and low are the main spatial agglomeration modes. 【Conclusion】 The regional relevance and spatial heterogeneity of agricultural ecological environment and agricultural economy should be fully considered, and the agricultural production cooperation and exchange between adjacent regions should be strengthened to improve the efficiency of regional collaborative governance.

Key words: main grain producing areas; agricultural ecological environment; agricultural economic; coupling coordination; spatial autocorrelation

中国粮食主产区承担着保障国家粮食安全的重大责任^[1],在确保粮食产量稳步提升的同时,粗放的农业经营模式却造成了生态退化、耕地质量降等、面源污染严重等一系列生态环境问题^[2]。《国家乡村振兴战略规划(2018—2022年)》明确指出,要健全生态系统保护制度,推进农业绿色发展。在此背景下,探究粮食主产区农业生态环境与农业经济的耦合协调特征和空间关联格局,将对促进农业健康发展和生态可持续演进具有重要现实意义。

农业生态环境与农业经济耦合协同问题近年引起广泛关注。在理论层面,任继周^[3]提出的大农业系统耦合理论奠定了研究的基础。农业生态环境为农业经济提供基本的物质保障和发展空间,农业经济又反过来作用于生态环境资源承载力和利用效率^[4],两者相互影响,彼此制约。在实证层面,在农业生态环境与农业经济耦合协调性评价、分布格局与演变过程、调节路径及影响因素等方面都有丰富研究。樊祖洪等^[5]、陈峰正等^[6]、郑博福等^[7]借助耦合协调度模型,对不同地域耦合协调状态及演变趋势进行分析;李慧等^[8]基于农户尺度构建结构方程模型,探讨了耦合过程中各要素的复杂关系;马世昌等^[9]和董晓佳等^[10]运用能值分析法对系统能值效率做出评价。

地理学第一定律认为:地球上一切事物都是互相联系的,离得越近的事物彼此间联系越强。由于中国幅员辽阔和农业生产的普遍性,农业相关的物质投入、产品市场、技术交流及政策调控都无法脱离空间属性而独立存在。因此,引入空间自相关分析是必要的^[11]。空间自相关是对单元属性值潜在依赖性的衡量,可分为全局和局部空间自相关^[12],通常用于疾病的空间扩散性^[13]、经济指标的空间关联性^[14]以及人口^[15,16]、资源^[17]的空间分布特征研究^[18]。

总体而言,现有研究缺乏对农业生态环境与农业经济的空间关联性考察。既有研究往往以行政边界为基础对研究区域做出独立性假设^[19],忽视了农业要素的溢出,空间自相关模型则考虑到研究区域与周边区域的相互影响,更符合农业生产现实。本文首先在驱动力—状态—响应(Driving Force—State—Response,DFSR)框架下构建起农业生态环境与农业经济综合评价指标体系,然后采用耦合协调度模型分析粮食主产区农业生态环境、农业经济耦合协调的时空变化,最后利用空间自相关模型探讨两系统间的空间关联性和区域异质性,以期为实现农业生态环境与农业经济均衡协调提供经验参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 综合评价方法

1.1.1 综合评价指标体系构建

农业生态环境与农业经济耦合协调指两系统按照固有互动模式, 在人类适当调控下逐渐有机统一的过程^[20]。本文遵循指标选取的系统性、科学性、代表性和可操作性原则, 参考陈锋正等^[6]的研究构建起尽可能准确完善的评价指标体系, 需要说明的是由于生态环境为整个农业系统提供支持, 因此这里的农业是指大农业。

本研究在 DFSR 框架下建立农业生态环境与农业经济的综合评价指标体系, 其中, 农业生态环境驱动力指人类为改变不利环境采取的一系列行动措施, 选取耕地化肥折纯施用量、农药施用量、薄膜施用量 3 个指标表征; 状态指现有资源环境条件, 选取森林覆盖率、人均水库库容量等 4 个指标表征; 响应指生态环境对人类行为措施作出的应答, 选取有效灌溉率、复种指数等 4 个指标表征。农业经济驱动力指人与人竞争时采取的行动, 选取农村人均用电量、人均农业机械总动力等 7 个指标表征; 状态指农业经济基础, 选取每百人均粮食产量、每百人均肉类产量等 4 个指标表征; 响应指人类行为举措取得的成效, 选取第一产业全员劳动生产率等 4 个指标表征, 具体见表 1、表 2。在具体计算中, 产业结构调整指数=1-(农业产值/农林牧渔总产值), 并以粮油加工企业利润总额作为产业延伸水平的代替指标, 其余指标均可在年鉴中直接获得。最后, 采用熵权法确定指标权重, 作为客观综合定权法, 其主要根据指标传递信息量大小来确定权重^[21]。

表 1 农业生态环境综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of agricultural ecological environment

一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	单位 Company	属性 Attribute	权重 Weight
驱动力指标 Driving force indicators	耕地化肥折纯施用量	kg · hm ⁻²	负向	0.060 0
	耕地农药施用量	kg · hm ⁻²	负向	0.0438
	耕地薄膜施用量	kg · hm ⁻²	负向	0.032 7
状态指标 Status indicators	森林覆盖率	%	正向	0.075 5
	人均水库库容量	万 m ³ · 人 ⁻¹	正向	0.151 6
	人均耕地面积	hm ² · 人 ⁻¹	正向	0.235 0
	农业受灾率	%	负向	0.010 9
响应指标 Response indicators	有效灌溉率	%	正向	0.070 3
	复种指数	%	正向	0.069 5
	水土流失治理度	%	正向	0.128 3
	除涝面积比例	%	正向	0.122 4

表 2 农业经济综合评价指标体系

Table 2 Comprehensive evaluation index system of agricultural economy

一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicators	单位 Company	属性 Attribute	权重 Weight
	农村人均用电量	k W · h	正向	0.129 0
	人均农业机械总动力	k W	正向	0.030 4
驱动力指标 Driving force indicators	每万人均大中型拖拉机配套农具	台	正向	0.124 5
	每万人均小型拖拉机配套农具	台	正向	0.061 7
	每万人均联合收割机	台	正向	0.059 9
	每百人农用柴油均使用量	t	正向	0.058 8
	农林水事务支出比重	%	正向	0.021 8
	每百人均粮食产量	kg · 百人 ⁻¹	正向	0.104 2
状态指标 Status indicators	每百人均肉类产量	kg · 百人 ⁻¹	正向	0.032 6
	农村居民家庭人均可支配收入	元	正向	0.039 1
	农村居民家庭人均恩格尔系数	%	负向	0.015 5
	第一产业全员劳动生产率	元 · 人 ⁻¹	正向	0.049 5
响应指标 Response indicators	产业结构调整指数	%	正向	0.016 6
	产业延伸水平	万元	正向	0.228 5
	人均固定资产投资完成额	元	正向	0.027 9

1.1.2 综合评价模型

综合评价模型采用加权法，计算公式如下：

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j * X_{ij} \quad (1)$$

$$U_i = \sum_{j=1}^n W_j * X_{ij} \quad (2)$$

式中： S_i 为农业生态环境第*i*年的综合评价指数， U_i 为农业经济第*i*年的综合评价指数， W_j 为第*j*项指标的权重， X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标的标准化值。

1.2 耦合协调度评价方法

耦合协调度模型用于判定系统间的耦合协调程度，计算公式如下：

$$C = \sqrt{\frac{S * U}{(S + U)^2}} \quad (3)$$

$$T = \alpha S + \beta U \quad (4)$$

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

式中： S 、 U 分别为农业生态环境、农业经济综合评价指数， C 为耦合指数； α 和 β 代表权重值，由于农业生态环境与农业经济同等重要，故 $\alpha = \beta = 0.5$ ， T 为综合评价值； D 为耦合协调度， $0 \leq D \leq 1$ ，数值越大表明耦合协调关系越好，耦合协调度等级借鉴罗海平等^[22]的研究成果进行判定（表3）。

表3 耦合协调度等级划分标准

Table 3 Classification standard of coupling coordination degree

耦合协调度	等级	耦合协调度	等级
Coupling factor	Ranking	Coupling factor	Ranking
0.0~0.09	极度失调	0.50~0.59	勉强协调
0.10~0.19	严重失调	0.60~0.69	初级协调
0.20~0.29	中度失调	0.70~0.79	中级协调
0.30~0.39	轻度失调	0.80~0.89	良好协调
0.40~0.49	濒临失调	0.90~1.00	优质协调

1.3 空间自相关测算方法

1.3.1 空间权重矩阵构建

空间权重矩阵的构建直接影响空间模型解释能力^[23]，由于四川与湖北、湖南间隔重庆，故借鉴宋焱等^[24]的处理方法，基于反距离标准构建空间权重矩阵。

1.3.2 单变量空间自相关

全局空间自相关用于揭示某要素属性值在区域内整体关联程度及显著性^[25]。通常用全局 *Moran's I* 表示，计算公式如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (6)$$

局部空间自相关能够探究不同地理位置的空间关联模式，从而发现局部区域空间聚集性和分异性^[26]。通常用局部 *Moran's I* 表示，计算公式如下：

$$I_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (Y_j - \bar{Y}) \quad (7)$$

式中： Y_i 、 Y_j 分别是单元 i 、单元 j 的属性值， n 为研究单元总数， $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ ；

$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ ， W_{ij} 是空间权重矩阵。

Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$ ，*Moran's I* > 0 表示空间正相关，取值越接近 1 说明正相关程度越强；*Moran's I* < 0 表示空间负相关，取值越接近 -1 说明负相关程度越强；*Moran's I* = 0 表示不存在空间相关性。

1.3.3 双变量空间自相关

双变量空间自相关用于分析两个及以上变量间的空间关联性^[27]。双变量 *Moran's I* 是用所有相邻位置的加权平均值评估一个位置变量与其他变量的相关程度^[28]。其计算公式为：

$$I_{lm}^i = z_l^i \sum_{j=1}^n W_{ij} z_m^j \quad (8)$$

式中: $z_l^i = \frac{X_l^i - \overline{X_l}}{\sigma_l}$, $z_m^j = \frac{X_m^j - \overline{X_m}}{\sigma_m}$, X_l^i 是单元 i 属性的 l 值, X_m^j 是单元 j 属性的 m 值, $\overline{X_l}$ 、

$\overline{X_m}$ 是属性 l 、 m 的平均值, σ_l 、 σ_m 是属性 l 、 m 的方差。

1.4 数据来源

研究数据包括自然环境和社会经济两方面, 主要来源于 2006—2021 年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国粮食年鉴》, 部分缺失数据通过查阅粮食主产区各省份统计年鉴或通过移动平均法计算获得。

2 实证结果与分析

2.1 综合评价分析

参照刘青利等^[29]的研究方法, 选取 2005、2010、2015、2020 年 4 个年份, 通过综合评价指数及排名分析粮食主产区农业生态环境、农业经济的时空演变规律。

表 4 农业生态环境系统综合评价指数及排名

Table 4 Comprehensive score and ranking of agricultural environment and ecosystem

省份 Province	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking
河北 Hebei	0.281 6	6	0.314 3	7	0.297 9	10	0.352 1	10
内蒙古 Inner Mongolia	0.388 9	2	0.452 9	1	0.483 6	2	0.555 3	2
辽宁 Liaoning	0.354 0	4	0.384 1	4	0.374 7	6	0.430 3	6
吉林 Jilin	0.380 3	3	0.393 3	3	0.394 7	5	0.462 6	5
黑龙江 Heilongjiang	0.389 5	1	0.435 1	2	0.515 0	1	0.576 3	1
江苏 Jiangsu	0.235 4	11	0.272 3	11	0.290 5	11	0.375 7	9
安徽 Anhui	0.257 6	9	0.289 4	9	0.311 8	9	0.350 0	11
江西 Jiangxi	0.340 0	5	0.367 8	5	0.412 4	4	0.499 3	4
山东 Shandong	0.206 6	13	0.241 4	13	0.251 3	13	0.313 8	12
河南 Henan	0.241 7	10	0.248 9	12	0.254 3	12	0.312 4	13
湖北 Hubei	0.267 8	8	0.337 1	6	0.427 7	3	0.524 4	3
湖南 Hunan	0.269 9	7	0.293 8	8	0.316 6	7	0.399 4	7
四川 Sichuan	0.230 7	12	0.281 2	10	0.313 0	8	0.398 4	8

表 5 农业经济系统综合评价指数及排名

Table 5 Comprehensive score and ranking of agricultural economic system

省份 Province	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking	评价指数 Evaluation index	排名 Ranking
河北 Hebei	0.108 2	3	0.156 0	7	0.208 3	7	0.230 9	9

内蒙古 Inner Mongolia	0.107 8	4	0.213 8	3	0.324 0	2	0.480 4	3
辽宁 Liaoning	0.083 1	5	0.172 5	5	0.245 8	5	0.250 9	7
吉林 Jilin	0.128 1	1	0.216 4	2	0.300 8	3	0.658 8	1
黑龙江 Heilongjiang	0.120 3	2	0.234 5	1	0.346 3	1	0.549 9	2
江苏 Jiangsu	0.076 1	7	0.188 3	4	0.284 9	4	0.362 1	4
安徽 Anhui	0.061 4	9	0.136 4	8	0.197 1	8	0.289 3	5
江西 Jiangxi	0.040 4	12	0.093 8	11	0.135 7	11	0.185 2	12
山东 Shandong	0.080 4	6	0.160 0	6	0.224 9	6	0.264 4	6
河南 Henan	0.063 9	8	0.135 3	9	0.185 0	9	0.235 2	8
湖北 Hubei	0.040 8	11	0.107 1	10	0.175 7	10	0.220 5	10
湖南 Hunan	0.040 9	10	0.083 4	12	0.135 5	12	0.185 9	11
四川 Sichuan	0.034 7	13	0.067 7	13	0.105 1	13	0.137 4	13

由表 4 可知，粮食主产区农业生态环境综合评价指数呈现波动上升态势，表明生态环境正处于持续改善中。内蒙古、黑龙江始终保持前 2 名，排名随时间不断变化，对比 2005 年与 2020 年，可以发现排名上升的省份包括江苏、江西、山东、湖北、四川；下降的包括河北、辽宁、吉林、安徽、河南；内蒙古、黑龙江、湖南排名没有发生变动。由表 5 可知，农业经济综合评价指数表现出“起点低、增速慢”特征。吉林、黑龙江、内蒙古长期位居前 3 名，从排名变动看，上升省份包括内蒙古、江苏、安徽、湖北；下降的省份包括河北、辽宁、湖南；吉林、黑龙江等 6 个省份排名无变化。

2.2 耦合协调度时空演变分析

依据公式（3）—（5），测度 2005、2010、2015、2020 年粮食主产区各省域农业生态环境与农业经济耦合协调度并判定等级（依据表 3），并用 ArcGIS 进行可视化呈现，结果见表 6、图 1。

表 6 农业生态环境与农业经济耦合协调度及等级

Table 6 The coupling coordination degree and grade of agricultural ecological environment and agricultural economy

省份 Province	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	耦合 协调度 Coupled co scheduling	等级 Grade	耦合 协调度 Coupled co scheduling	等级 Grade	耦合 协调度 Coupled co scheduling	等级 Grade	耦合 协调度 Coupled co scheduling	等级 Grade
河北 Hebei	0.295 4	中度失调	0.332 7	轻度失调	0.352 9	轻度失调	0.377 6	轻度失调
内蒙古 Inner Mongolia	0.320 0	轻度失调	0.394 4	轻度失调	0.444 9	濒临失调	0.508 2	勉强协调
辽宁 Liaoning	0.292 8	中度失调	0.358 8	轻度失调	0.389 5	轻度失调	0.405 3	濒临失调
吉林 Jilin	0.332 2	轻度失调	0.381 9	轻度失调	0.415 1	濒临失调	0.525 4	勉强协调
黑龙江 Heilongjiang	0.329 0	轻度失调	0.399 6	轻度失调	0.459 5	濒临失调	0.530 5	勉强协调
江苏 Jiangsu	0.258 7	中度失调	0.336 5	轻度失调	0.379 3	轻度失调	0.429 5	濒临失调
安徽 Anhui	0.250 8	中度失调	0.315 2	轻度失调	0.352 1	轻度失调	0.398 9	轻度失调
江西 Jiangxi	0.242 0	中度失调	0.304 8	轻度失调	0.343 9	轻度失调	0.389 9	轻度失调
山东 Shandong	0.253 9	中度失调	0.313 5	轻度失调	0.344 8	轻度失调	0.379 5	轻度失调
河南 Henan	0.249 3	中度失调	0.302 9	轻度失调	0.329 3	轻度失调	0.368 1	轻度失调
湖北 Hubei	0.228 7	中度失调	0.308 2	轻度失调	0.370 2	轻度失调	0.412 3	濒临失调
湖南 Hunan	0.229 2	中度失调	0.279 7	中度失调	0.321 8	轻度失调	0.369 1	轻度失调
四川 Sichuan	0.211 5	中度失调	0.262 6	中度失调	0.301 2	轻度失调	0.342 0	轻度失调

2.2.1 耦合协调度时序变化分析

粮食主产区农业生态环境与农业经济耦合协调度介于 0.211 5~0.530 5，呈现“缓慢上升”的发展态势。展开而言，2005 年耦合协调度处在 0.211 5~0.332 2，中度失调与轻度失调省份比例为 10: 3，说明此时生态环境还未引起足够重视，农业经济高产仍是各省份普遍目标；2010 年耦合协调度介于 0.262 6~0.399 6，中度失调与轻度失调省份比例为 2: 11，河北、辽宁等 8 个省份实现等级跃升；2015 年耦合协调度处于 0.301 2~0.459 5，轻度失调与濒临失调省份比例为 10: 3，耦合协调等级略有提升；2020 年耦合协调度介于 0.342 0~0.530 5，轻度失调、濒临失调与勉强协调省份比例为 7: 3: 3，内蒙古、吉林、黑龙江进入勉强协调等级。对比 2005 年与 2020 年，10 个中度失调省份全部实现等级提升，且有 3 个省份进入勉强协调等级，说明粮食主产区农业生态环境与农业经济耦合协同程度加深，10 个省份还处在失调阶段，农业生态环境与农业经济耦合协调道路任重道远。

2.2.2 耦合协调度的区域差异分析

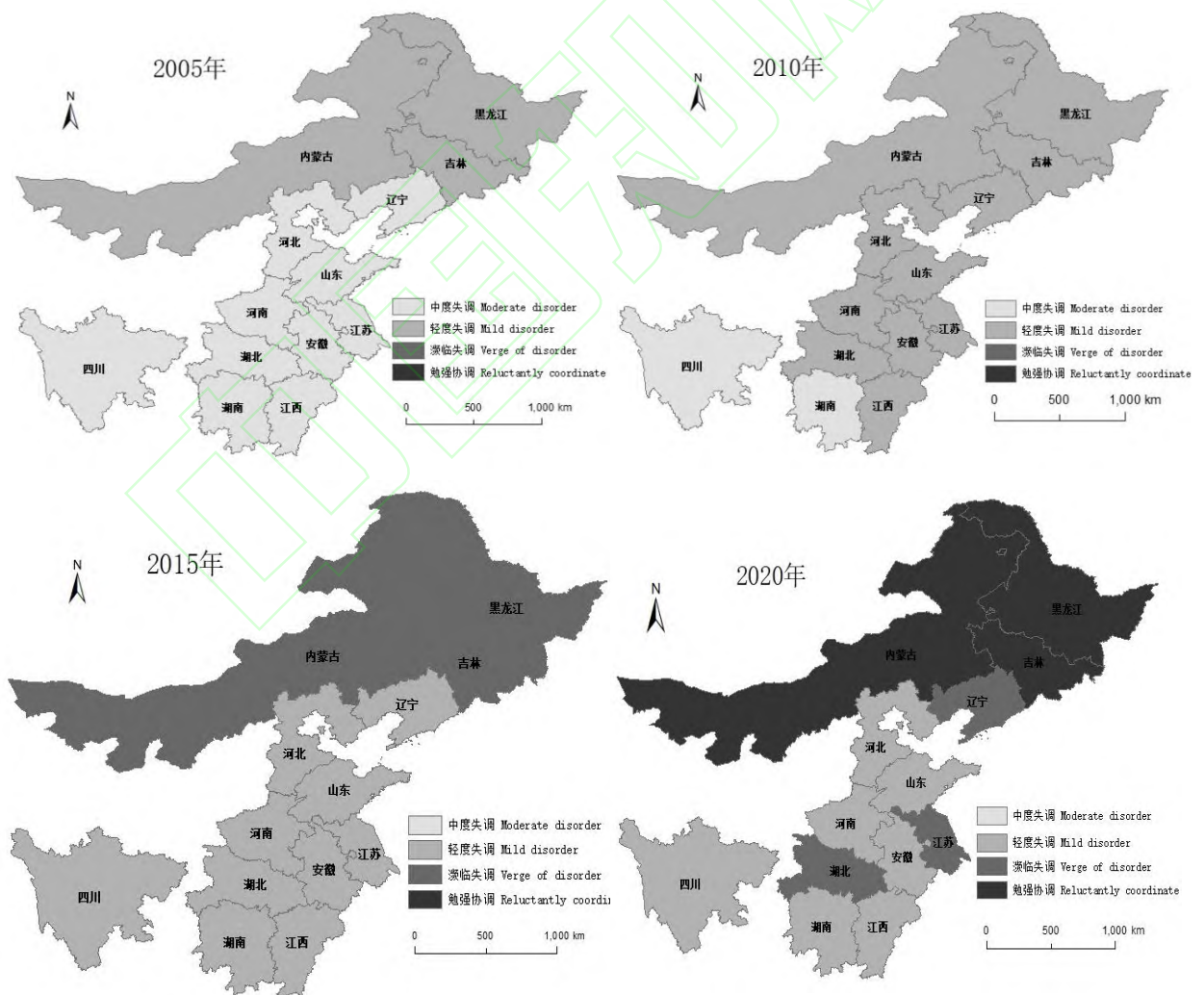


图 1 农业生态环境与农业经济耦合协调度 LISA 聚集区

Fig.1 LISA aggregation area of coupling coordination degree of agricultural ecological environment and agricultural economy

粮食主产区农业生态环境与农业经济耦合协调度整体上呈现“北高南低”的空间分布特征。具体而言，2005年，内蒙古、黑龙江、吉林为轻度失调，中度失调区分布广泛，覆盖辽宁以南全部主产区省份；2010年，绝大多数主产区省份演进为轻度失调；2015年，空间集聚特征显著，耦合协调度以北部3省（内蒙古、黑龙江、吉林）为核心向南逐渐递减，北部3省为濒临失调其余则为轻度失调；2020年，空间集聚进一步凸显，北部3省率先迈入勉强协调等级，辽宁、江苏、湖北也跃升至濒临失调。

总体而言，耦合协调度呈现由东北向东南、西南递减的空间格局，北部3省表现出良好协同趋势。北部3省拥有得天独厚的自然条件，土壤肥沃且耕地面积广，通过土地流转与科技研发的密切配合充分发挥出农业生产的规模优势，生态保护理念的传播也促使农民在生产经营中更加注重长远效益，客观上促进了农业生产与生态环境的良性发展。

2.3 空间自相关分析

从综合评价分析可知，粮食主产区农业生态环境、农业经济存在着一定程度的空间集聚，为此引入空间自相关模型探讨各区域属性值可能存在的关联性和规律性。

2.3.1 单变量全局空间自相关分析

依据公式（6），利用 Geoda 计算得到 2005、2010、2015、2020 年的全局 Moran's I，从整体考察粮食主产区农业生态环境、农业经济的空间关联度，结果见表 7。

表 7 全局空间自相关结果

Table 7 Global spatial autocorrelation results

年份 Year	实证结果 Empirical results	生态环境 Ecological environment	农业经济 Agricultural economy	年份 Year	实证结果 Empirical results	生态环境 Ecological environment	农业经济 Agricultural economy
2005	Moran's I	0.353 0	0.5270	2010	Moran's I	0.274 0	0.5180
	P- Value	0.014 0	0.0020		P- Value	0.025 0	0.0010
	Z-score	2.740 1	3.9389		Z-score	2.278 8	3.9169
2015	Moran's I	0.060 0	0.4350	2020	Moran's I	-0.016 0	0.3210
	P- Value	0.164 0	0.0010		P- Value	0.314 0	0.0140
	Z-score	0.919 4	3.3783		Z-score	0.421 1	2.7584

注：p 为概率，z 为检验值，当 $z > 1.96$ 或 $z < -1.96$ ， $p < 0.05$ 时，有 95%把握认为存在全局空间自相关。

Note: p is the probability and z is the test value. When $z > 1.96$ or $z < -1.96$, $p < 0.05$, 95% are sure that there is global spatial

autocorrelation.

由表 7 可知, 2005、2010 年农业生态环境 Moran's I 为正, 表现为全局空间正相关, 且 $z > 1.96$, 在 95% 显著水平下通过检验; 2015、2020 年未能通过检验, 数据呈现随机分布特征; 2005、2010、2015、2020 年 4 个研究年份农业经济 Moran's I 均为正, $z > 1.96$ 且 $p < 0.05$, 有 95% 把握认为粮食主产区农业经济存在显著全局空间正相关, Moran's I 值逐渐变小说明空间正相关程度越来越弱。

2.3.2 单变量局部空间自相关分析

依据公式 (7) 计算局部 Moran's I 指数, 在存有全局空间关联性前提之下进一步探测局部空间集聚位置或异常值^[30]。依据农业生态环境局部空间自相关结果, 得到 2 条结论: 第一, 当 2005、2010 年存在全局空间正相关时, 寻找到具体集聚位置及局部空间负相关异常位置。2005 年, 农业生态环境不仅有黑龙江、吉林的高—高集聚, 河南、江苏、安徽、湖北、湖南的低—低集聚, 还存在江西高一低集聚的异常格局; 2010 年, 农业生态环境不仅包括河南、江苏、安徽、湖南的低—低集聚, 还存在江西、湖北高一低集聚的局部分异现象。第二, 当 2015、2020 年并无显著全局空间自相关时, 发现了被掩盖的局部空间自相关关系。2015 年, 河南、江苏、安徽呈现低—低集聚; 湖北、江西呈现高—低集聚; 2020 年也得出类似结论, 江苏、安徽呈现低—低集聚, 湖北呈现高一低集聚, 证明全局空间自相关确实会在一定程度上掩盖具体的局部空间自相关关系。

农业经济局部空间自相关分析与全局空间自相关结论基本一致, 同时发现了局部空间异常。4 个研究年份均存在显著全局空间正相关, 黑龙江、吉林、辽宁呈现高—高集聚, 河南、安徽、湖北、湖南、江西呈现低—低集聚, 局部空间异常体现在江苏持续表现为高一低集聚。

2.3.3 双变量全局空间自相关分析

为探究粮食主产区农业生态环境与农业经济之间的空间关联性, 依据公式 (8) 测算两者双变量 Moran's I 指数, 结果见表 8。

表 8 双变量空间自相关结果

Table 8 Bivariate spatial autocorrelation results

实证结果 Empirical results	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran's I	0.487 0	0.423 0	0.270 0	0.199 0
P - Value	0.001 0	0.002 0	0.020 0	0.046 0
Z-score	3.931 5	3.516 0	2.417 1	1.794 4

由表 8 可知, 2005、2010、2015、2020 年农业生态环境与农业经济的双变量 Moran's I 指数分别为 0.487 0、0.423 0、0.270 0、0.199 0, 且通过 95% 显著性水平检验, 表明两者间存在显著的空间正相关, Moran's I 指数持续下降, 证明这种正相关性在减弱。可能的原因是, 随着农村劳动力的转移, 机械、化学物品等物化劳动产生了大量的碳排放和面源污染, 这些负向环境效应影响了农业经济与

生态环境的正向耦合。

2.3.4 双变量局部空间自相关分析

在 z 检验 ($p=0.05$) 的基础上绘制双变量局部空间自相关 *LISA* 聚类图, 用于清晰展现农业生态环境与农业经济发展之间的局部空间关系, 结果见图 2。

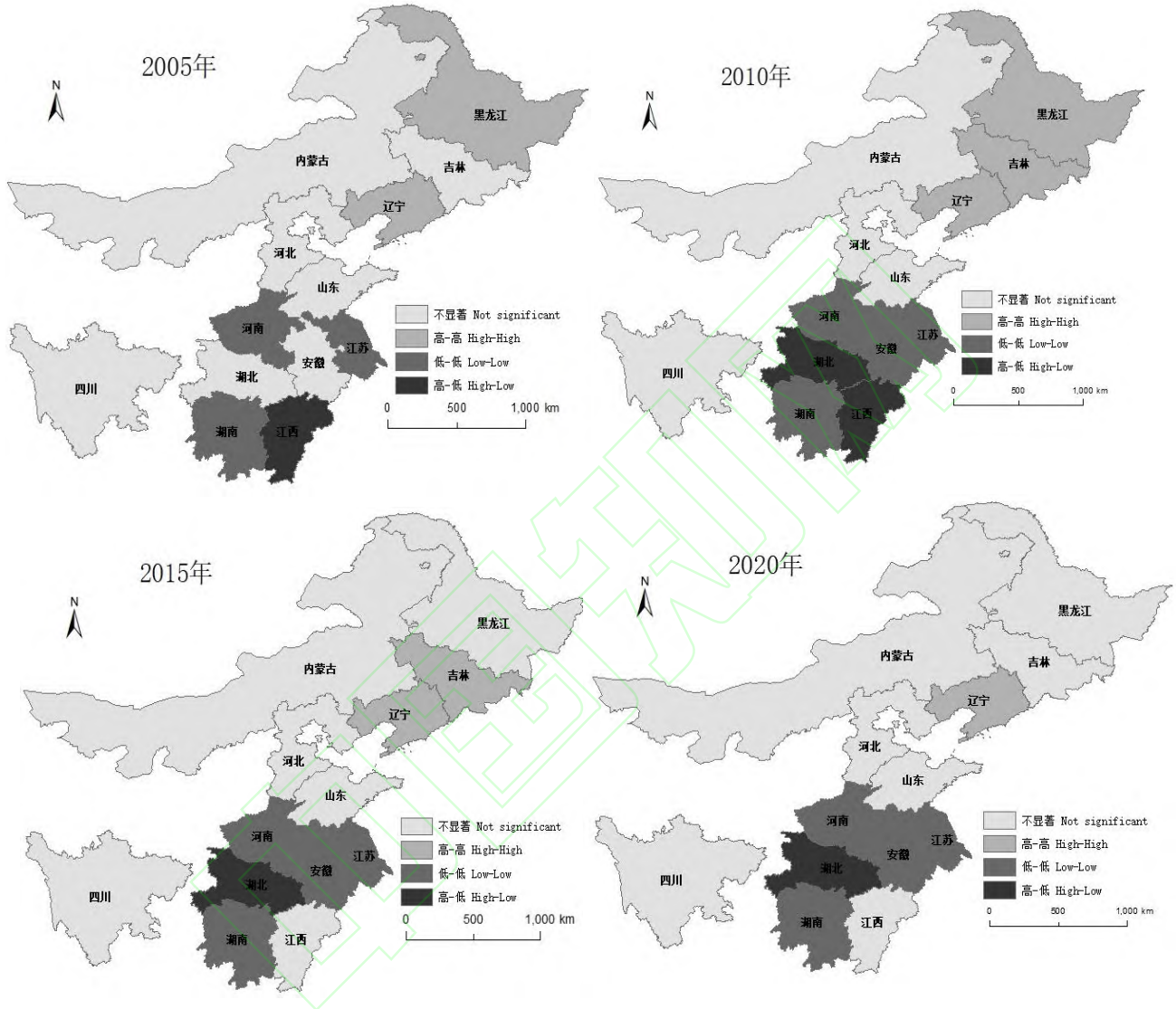


图 2 双变量空间自相关 *LISA* 集聚区

Fig2 Bivariate spatial autocorrelation *LISA* aggregation area

研究年份农业生态环境与农业经济 *LISA* 聚类图空间分布大致类似, 可划分为 3 类区域: 一类是农业生态环境高值—农业经济高值区, 包括黑龙江、吉林、辽宁, 这些省份农业生态环境与农业经济实现了良好耦合, 生态环境为农业经济发展提供有效支撑, 同时农业经济为环境的保护修复提供资金和技术保障; 二是农业生态环境高值—农业经济低值区, 包括江西、湖北, 两省份生态条件优越但未发挥出全部优势, 未来发展潜力大; 三是农业生态环境低值—农业经济低值集聚区, 集中在河南、安徽、江苏、湖南, 这是亟需调整的省份, 其他地区则不显著。总体而言, 双变量局部空间自

相关与双变量全局空间自相关结论大致吻合。

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 粮食主产区农业生态环境、农业经济综合评价指数表现出“起点低，增速慢”特征，农业生态环境与农业经济间耦合协调度呈现缓慢上升态势和“北高南低”的空间非均衡化发展，北部3省（内蒙古、黑龙江、吉林）耦合协调度相对较高且呈现集聚状态，其余省份分布不均衡。

(2) 农业生态环境、农业经济均呈现全局空间正相关，但相关性正在减弱，局部空间自相关分析与全局空间自相关结论大体一致，同时发现了局部区域的具体集聚位置和空间分异位置。

(3) 农业生态环境与农业经济间存在空间正相关，表现为生态环境高值—农业经济高值区、生态环境高值—农业经济低值区、生态环境低值—农业经济低值区3种集聚形态。

3.2 建议

(1) 摒弃传统粗放型农业经济增长方式，以创新科技驱动生态环境与经济增长的良性互动。要以科技力量加速两系统间物质循环、能量传递、信息流动和价值转换，发挥科技在连接生态环境与农业经济的桥梁和纽带作用。

(2) 注重发挥农业生态环境与农业经济的全局和局部空间正相关作用，优化空间关联格局。政府在进行资源配置和综合规划时，应鼓励省份间展开多维合作，通过要素流动、技术渗透、政策蔓延等溢出机制逐步实现区域的均衡化发展。

(3) 尊重农业生态环境与农业经济空间关联的现实差异，因地制宜规划布局。生态环境高值—农业经济高值区，要在原有良好势头基础上积极探索耦合发展新模式，辐射带动落后地区实现战略性转变；生态环境高值—农业经济低值区需找准着力点释放生态环境优势潜能；生态环境低值—农业经济低值区要坚持“内发力”与“外借力”相结合，逐步缩小差距完成追赶。

参考文献

-
- [1] 赵惠敏. 新时期粮食主产区利益补偿机制研究[J]. 社会科学战线, 2021(12):50-55.
ZHAO H M. Study on benefit compensation mechanism of main grain producing areas in the new era[J]. Social Sciences Front, 2021(12):50-55.
 - [2] 李周. 粮食主产区生态安全研究[J]. 学习与探索, 2020(08):88-94.
LI Z. Study on ecological security in main grain producing areas[J]. Study & Exploration, 2020(08):88-94.
 - [3] 任继周. 系统耦合在大农业中的战略意义[J]. 科学, 1999, 51(06):12-14+2.
REN J Z. Strategic significance of system coupling in big agriculture[J]. Science, 1999, 51(06):12-14+2.
 - [4] 王晶, 胡一, 白清俊. 治沟造地背景下延安市农业生态经济系统耦合发展分析[J]. 应用生态学

- 报, 2020, 31(09):3154-3162.
WANG J, HU Y, BAI Q J. Analysis on the coupling development of agricultural eco economic system in Yan'an City under the background of Gully Control and land reclamation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(09):3154-3162.
- [5] 樊祖洪, 熊康宁, 李亮, 等. 喀斯特生态脆弱区农业生态经济系统耦合协调发展研究: 以贵州省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(02):482-491.
FAN Z H, XIONG K N, LI L, et al. Study on the coupling and coordinated development of agricultural eco economic system in Karst Ecological Fragile Area -- a case study of Guizhou Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(02):482-491.
- [6] 陈锋正, 刘新平, 吴大付, 等. 河南省农业生态经济系统的耦合关系及协同发展的战略选择[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(05):688-695.
CHEN F Z, LIU X P, WU D F, et al. Coupling relationship and strategic choice of coordinated development of agricultural eco economic system in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(05):688-695.
- [7] 郑博福, 谢泽阳, 陶林, 等. 赣南地区农业生态经济系统耦合态势的时空演变[J]. 生态学报, 2021, 41(16):6466-6475.
ZHENG B F, XIE Z Y, TAO L, et al. Temporal and spatial evolution of coupling situation of agricultural eco economic system in southern Jiangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16):6466-6475.
- [8] 李慧, 王继军, 郭满才. 基于结构方程模型的黄土丘陵区商品型生态农业系统耦合关系分析[J]. 经济地理, 2010, 30(06):1005-1010.
LI H, WANG J J, GUO M C. Coupling relationship analysis of commercial eco agricultural system in Loess Hilly Region Based on structural equation model[J]. Economic Geography, 2010, 30(06):1005-1010.
- [9] 马世昌, 吴晓磊. 安徽省农业生态经济系统能值分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(12):101-107.
MA S C, WU X L. Emergy analysis of agricultural eco economic system in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(12):101-107.
- [10] 董晓佳, 张仁陟, 张军, 等. 定西市农业生态经济系统能值分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(05):106-113.
DONG X J, ZHANG R Z, ZHANG J, et al. Emergy analysis of agricultural eco economic system in Dingxi City[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(05):106-113.
- [11] 鲁庆尧, 张旭青, 孟祥海. 我国粮食种植生态效率的空间相关性及其影响因素研究[J]. 经济问题, 2021(08):82-88+94.
LU Q Y, ZHANG X Q, MENG X H. Study on spatial correlation and influencing factors of grain planting ecological efficiency in China[J]. On Economic Problems, 2021(08):82-88+94.
- [12] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(02):119-129.
REN B P, DU X Y. The coupling and synergistic relationship between economic growth, industrial development and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(02):119-129.
- [13] Shi J M, Zhao J Q, Li J G. Spatial autocorrelation and its application in public health field[J]. Chinese journal of industrial hygiene and occupational diseases, 2020, 38(5):395-400.
- [14] 安欣, 徐硕, 张萌萌, 等. 黄河流域高质量发展水平测度及空间关联分析[J]. 统计与决策, 2021(23):111-115.
AN X, XU S, ZHANG M M, et al. Measurement and spatial correlation analysis of high-quality development level in the Yellow River Basin[J]. Statistics & Decision, 2021(23):111-115.
- [15] 王新贤, 高向东. 中国穆斯林人口空间分布及演变特征[J]. 世界地理研究, 2021, 30(06):1297-1307.
WANG X X, GAO X D. Spatial distribution and evolution characteristics of Muslim population in China[J]. World Regional Studies, 2021, 30(06):1297-1307.
- [16] Sławomir K, Mirosław W, Jadwiga G. Using spatial autocorrelation for identification of demographic patterns of functional urban areas in Poland[J]. Bulletin of Geography. Socio-economic Series, 2021, 52(52):123-144.
- [17] 朱丽娟, 张扬, 张改清. 我国城市土地与水资源利用效率的耦合协调及其时空特征研究[J]. 经济经纬, 2021, 38(05):22-30.
ZHU L J, ZHANG Y, ZHANG G Q. Study on the coupling coordination and temporal and spatial characteristics of urban land and water resources utilization efficiency in China[J]. Economic Survey, 2021, 38(05):22-30.
- [18] Miri S H, Miri S B. Investigating commuting time in a metropolitan statistical area using spatial autocorrelation analysis[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2020, 13(1):27-

- [19] 高凯,周志翔,杨玉萍.长江流域土地利用结构及其空间自相关分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(S1):13-20.
GAO K,ZHOU Z X,YANG Y P.Land use structure and its spatial autocorrelation analysis in the Yangtze River Basin[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2010,19(S1):13-20.
- [20] 王继军.黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合过程分析[J].应用生态学报,2009,20(11):2723-2729.
WANG J J.Analysis on coupling process of agricultural eco economic system in Zhifangou Watershed of Loess Hilly Region[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(11):2723-2729.
- [21] 周利军,张淑花.基于熵权法的农业可持续发展评价:以绥化市为例[J].资源开发与市场,2008(11):982-984.
ZHOU L J,ZHANG S H.Evaluation of agricultural sustainable development based on entropy weight method -- a case study of Suihua City[J].Resource Development & Market,2008(11):982-984.
- [22] 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 H P,YU Z P,ZOU N.Analysis on the coupling and coordination of ecology and food security in China's main grain producing areas -- Based on the panel data from 1995 to 2015[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2020,41(10):32-39.
- [23] 姬溶婧.河南省经济发展与环境质量耦合协调的时空演变分析[D].郑州:河南财经政法大学,2020.
JI R Q.Temporal and spatial evolution analysis of coupling and coordination between economic development and environmental quality in Henan Province[D].Henan University of economics and law,2020.
- [24] 宋焱.我国粮食主产区粮食生产与生态环境的协调性研究[D].南昌:南昌大学,2018.
SONG Y.Study on the coordination between grain production and ecological environment in China's main grain producing areas[D].Nanchang University,2018.
- [25] 张玉娟,曲建光,王强,等.结合均匀度理论和Moran's I指数、广义G指数的景观格局全局自相关分析[J].测绘通报,2018(11):36-39.
ZHANG Y J,QU J G,WANG Q,etal.Global autocorrelation analysis of landscape pattern based on evenness theory, Moran's I index and generalized G index[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2018(11):36-39.
- [26] 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(02):124-129.
ZHENG K Q,JIN E T,SONG Y,etal.Study on the spatial inclusiveness of food security and ecological security in China -- Taking the main grain producing areas as an example[J].Shandong Social Sciences,2019(02):124-129.
- [27] Anselin L,Smirnov O.Efficient algorithms for constructing proper higher order spatial lag operators[J].Journal of Regional Science,1996,36(1):67-89.
- [28] 孙才志,阎晓东.中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J].水资源保护,2018,34(05):1-8.
SUN C Z,YAN X D.Security evaluation and spatial correlation analysis of water energy grain coupling system in China[J].Water Resources Protection,2018,34(05):1-8.
- [29] 刘青利,杜晓静,岳晨宇,等.河南省绿色发展空间演化及障碍因子分析[J].河南农业大学报,2020,54(05):895-904.
LIU Q L,DU X J,YUE Y C,etal.Spatial evolution and obstacle factor analysis of green development in Henan Province[J].Journal of Henan Agricultural University,2020,54(05):895-904.
- [30] 薛选登,高佳琳.粮食主产区耕地生态足迹与粮食安全空间相关性分析[J].生态经济,2021,37(08):93-99.
XUE X D,GAO J L.Spatial correlation analysis between cultivated land ecological footprint and food security in main grain producing areas[J].Ecological Economy,2021,37(08):93-99.