



江西农业大学学报
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis
ISSN 1000-2286, CN 36-1028/S

《江西农业大学学报》网络首发论文

题目： 基于过程评价的土地生态系统耦合协调特征研究
作者： 张成，陈文波
收稿日期： 2022-03-26
网络首发日期： 2022-11-04
引用格式： 张成，陈文波. 基于过程评价的土地生态系统耦合协调特征研究[J/OL]. 江西农业大学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1028.S.20221103.1712.036.html>



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。

基于过程评价的土地生态系统耦合协调特征研究

张成^{1,2}, 陈文波^{2,3*}

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045; 2.东华理工大学 测绘工程学院, 江西 南昌 330013; 3.江西农业大学 南昌市景观与环境重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】探究土地生态系统耦合协调的机制及时空特征, 为提高土地生态系统的整体功能和效益提供参考。【方法】以河北省为例, 基于“机制—评价体系—方法”的研究范式, 立足于过程评价的视角, 在剖析土地生态系统耦合协调作用机制的基础上, 构建综合考虑压力、状态和响应 3 个过程的评价指标体系, 采用土地综合评价模型和容量耦合协调模型对土地生态系统的安全状况以及耦合协调时空格局特征进行分析。【结果】(1) 2010—2020 年, 河北省土地生态安全指数呈不断增长态势, 由 0.300 上升到 0.699, 年均增长率为 13.30%, 土地生态系统安全等级由恶化级转变为敏感级, 土地生态系统安全状况得到改善。但土地生态安全指数的均值为 0.509, 平均安全等级尚处于风险级, 土地生态系统总体安全水平仍然较低。(2) 时间尺度上, 2010—2020 年, 河北省土地生态系统耦合度和协调度均呈现稳步增长态势, 且耦合作用的强度大于协调性, 但协调度的增长速率大于耦合度。其中, 耦合状态由低度耦合过渡到基本耦合, 协调状态由低度协调过渡到基本协调, 土地生态系统内部三个子系统之间相互作用程度和相互协同程度不断加强。但平均耦合状态刚达到基本耦合, 平均协调状态尚处于低度协调, 耦合协调性的提升空间还很大。(3) 空间尺度上, 从空间格局来看, 11 个地级市在 2010 年、2015 年和 2020 年 3 个典型年份耦合度出现了低度耦合、基本耦合和中度耦合 3 种状态, 协调度出现了低度协调、基本协调和中度协调 3 种状态; 耦合度和协调度的分布特征基本相似, 高、低值区大致呈“中间低, 两翼高”的分布格局。从空间组合来看, 11 个地级市耦合和协调状态既出现了同级叠合, 又出现了异级交错, 产生了低耦合低协调区、基本耦合低协调区、基本耦合基本协调区、中耦合基本协调区和中耦合中协调区 5 种空间组合类型。从空间分异来看, 各市之间耦合度和协调度的区域差异性均逐年缩小, 但近年趋于平稳且维持在较高水平, 至 2020 年, 空间差异系数分别为 33.91%、43.01%, 区域差异性仍然不容忽视。【结论】应根据土地生态系统的时空耦合协调特征制定差异化的调控策略, 以促进土地生态系统的健康稳定发展。

关键词: 过程评价; 土地生态系统; 容量耦合协调模型; 耦合协调度; 河北省

中图分类号: X826

文献标识码: A

Study on the Coupling and Coordination Characteristics of Land Ecosystem based on Process Evaluation

ZHANG Cheng^{1,2}, CHEN Wenbo^{2,3*}

(1. College of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013,

收稿日期: 2022-03-26 **修回日期:** 2022-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41961036)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (41961036)

作者简介: 张成, orcid.org/0000-0003-3666-5154, zhangchengstudy@126.com; *通信作者: 陈文波, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地利用与景观生态研究, orcid.org/0000-0001-7539-8410, cwb1974@126.com.

China; 3. Key Laboratory of Landscape and Environment, Jiangxi Agricultural University,
Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this paper is to explore the mechanism and spatio-temporal characteristics of coupling coordination of land ecosystem, and to provide a reference for improving the overall function and benefit of land ecosystem. [Method] Taking Hebei Province as a case and based on the research paradigm of “mechanism-evaluation system-method”, this paper firstly studied the coupling coordination development interactive mechanism of land ecosystem and constructed an evaluation index system of coupling coordination from the perspective of process evaluation by comprehensively considering the process of pressure, status and response. Then, we analyzed the security status and the spatio-temporal characteristics of coupling coordination of land ecosystem by using the land comprehensive evaluation model and coupling coordination degree model. [Result] (1) From 2010 to 2020, the value of land ecological security of Hebei showed an overall increasing trend, shifting from 0.300 to 0.699, with an average annual growth rate of 13.30%. The security level of land ecosystem was upgraded from the deteriorate grade to the sensitive grade, meaning the security status of land ecosystem has been improved. However, the average value of land ecological security was 0.509, and the average security level was still at the risk level, meaning the overall security status of land ecosystem was still low. (2) On the temporal scale, from 2010 to 2020, the coupling and coordination of land ecosystem in Hebei Province showed a steady growth trend, and the strength of coupling effect was greater than coordination, but the growth rate of coordination was greater than that of coupling. The coupling state shifted from the low coupling to the basic coupling, and the coordination state shifted from the low coordination to the basic coordination, indicating that the degree of interaction and synergy among the three subsystems of land ecosystem has been strengthened continuously. However, the average coupling state has just reached the basic coupling, and the average coordination state is still at the low coordination, so there is still a large space for the improvement of the coupling and coordination. (3) On the spatial scale, from the perspective of spatial pattern, the coupling degree of eleven cities in 2010, 2015 and 2020 showed three states of low coupling, basic coupling and moderate coupling, and the coordination degree appeared three states of low coordination, basic coordination and moderate coordination. The spatial pattern characteristics of coupling degree and coordination degree were basically similar, and the high and low value areas were roughly in the distribution pattern of “low in the middle and high in the two wings”. From the perspective of spatial combination, the states of coupling and coordination of eleven cities not only overlapped at the same level, but also staggered at different levels. There were five kinds of spatial combination types, which were low coupling-low coordination zone, basic coupling-low coordination zone, basic coupling-basic coordination zone, medium coupling-basic coordination zone and medium coupling-medium coordination zone. From the perspective of spatial variation, the regional differences of coupling degree and coordination degree among cities were reduced year by year, but tended to be stable and maintained at a high level in recent years. By 2020, the values of spatial difference were 33.91% and 43.01%, respectively, indicating that the regional differences could not be ignored. [Conclusion] According to the spatio-temporal characteristics of coupling and coordination of land ecosystem, differentiated regulation strategies should be introduced to promote the healthy and stable development of land ecosystem.

Keywords: process evaluation; land ecological system; capacity coupling coordination model;

【研究意义】土地生态系统是地球陆地表面上不同自然要素与人类活动之间相互依存、相互作用而形成的复杂动态系统^[1]。随着城市化、工业化的加速推进,建设用地面积的不断拓展,土地利用强度的不断提高,土地生态系统呈现出结构性失衡和功能弱化的态势,表现为系统内部各子系统、各要素之间的相互冲抵、相互胁迫日益激烈,严重影响着土地资源的合理利用以及社会经济的可持续发展^[2-3]。了解土地生态系统的安全状况,揭示系统内部的耦合协调发展特征,对土地生态系统健康稳定发展具有重要意义,也是土地资源可持续利用的题中之意^[4]。【前人研究进展】早期的土地生态系统安全评价研究主要基于人地关系、可持续发展和景观生态学等相关理论对区域土地生态安全状况进行时点评价^[5-7],只能了解土地生态系统在某一时刻的安全状况,但无法掌握其演变过程中的真实安全水平^[8]。随着研究深入,PSR(压力、状态、响应)^[9]、EES(经济、环境、社会)^[10]和DPSIR(驱动力、压力、状态、影响、响应)^[11]等基于过程评价的概念模型被应用到土地生态系统安全评价领域,促使土地生态系统安全评价研究由定性、静态时点评价向定量、动态过程评价发展,基于过程的动态评价成为当下研究热点。如,王同达等^[12]基于PSR模型和熵值法对陕西省2009—2017年土地生态系统的安全状况及其驱动因素进行了研究。孔雪松等^[13]耦合生态斑块空间格局变化、生境面积增减和生态破碎化过程,定量评价了长三角地区土地利用变化过程中的生态干扰。【本研究切入点】科学合理的评价指标体系是土地生态系统安全评价的前提与基础^[14]。在指标选取时未能事先对土地生态系统内在的耦合协调机制进行分析,使得构建的指标体系缺乏与评价过程和机制的联系,评价结果也易受到质疑,这是当前研究存在的普遍问题。【拟解决的关键问题】以河北省为例,基于对PSR概念模型的理解,将土地生态系统划分为由压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间相互影响、彼此制约所组成的耦合共生系统,剖析系统的耦合协调作用机制。立足于过程评价的视角,从压力、状态和响应3个过程构建评价指标体系。通过土地综合评价和容量耦合协调模型分析土地生态系统的安全状况以及耦合协调时空格局特征。旨在为土地生态系统安全评价提供新思路和方法,为研究区通过提升土地生态系统耦合协调度来提高系统整体功能和效益提供一定参考。

1 研究区概况

河北省位于华北平原,地理位置界于东经113°04'至119°53',北纬36°01'至42°37'之间,漳河以北,东傍渤海,环抱京津,下辖11个地级市。地势由西北向东南倾斜降低,地貌类型多样,高原、山地、丘陵、平原等类型齐全,属温带大陆性季风气候。截止2020年末,常住人口7461.02万人,全年全省生产总值36206.9亿元。全省面积18.88万km²,土地资源丰富且土地利用类型多样,是我国重要棉粮生产区。近年来,随着城市化的加速推进,经济结构的转型发展,土地利用结构和质量水平发生深刻变化,对土地生态系统产生重要影响。

2 研究思路与方法

本研究的总体思路为:首先,剖析土地生态系统耦合协调作用机制,并在此基础上构建基于“压力—状态—响应”过程的耦合协调度评价指标体系;其次,以河北省11个地级市为评价单元,通过综合评价模型计算出2010—2020年河北省土地生态系统的压力、状态、响应和综合指数,分析土地生态系统的安全状况;最后,采用耦合协调度模型分析各市2010年、2015年和2020年3个典型年份土地生态系统耦合协调的时空演变特征。

2.1 指标赋权

利用投影寻踪模型计算指标权重。投影寻踪模型是基于降维的思想,将高维指标投影为一维指标,求得的最佳投影向量作为指标权重^[15]。计算过程如下:

1)原始数据标准化

考虑到各指标数量级、正负性质不同,采用极差标准化对其进行处理^[16]。

对于正向指标:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

对于负向指标:

$$x_{ij}' = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

2)构造投影函数

$\{x(i, j) \mid j=1,2,3,\dots,n\}$ 为 n 维标准化后的指标值,利用一维单位投影向量 $u = [u(1), u(2), \dots, u(n)]$, 得到一维投影值 $Z(i)$:

$$Z(i) = \sum_{j=1}^n u(j) \times x'(i, j) \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (3)$$

此时,可构造投影函数 $Q(u)$:

$$Q(u) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [Z(i) - \bar{Z}]^2} \quad (4)$$

3)投影指标函数优化

基于遗传算法求解最佳的投影向量 $u = [u(1), u(2), \dots, u(n)]$, 使得:

$$\max f = Q(u) \quad (5)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n u(j)^2 = 1 \\ u(j) \in (0,1), j=1,2,3,\dots,n \end{cases} \quad (6)$$

4)计算指标权重

求得的最佳投影向量 $u = [u(1), u(2), \dots, u(n)]$ 即为各指标的权重。各子系统的权重为:

$$e = \sqrt{\sum_{j=1}^p u(j)^2}, \quad f = \sqrt{\sum_{j=1}^s u(j)^2}, \quad g = \sqrt{\sum_{j=1}^r u(j)^2} \quad (7)$$

式中, e 、 f 、 g 分别表示压力、状态、响应子系统的权重, p 、 s 、 r 分别表示压力、状态、响应三个子系统指标的个数。

2.2 综合评价模型

利用综合指数法将土地生态系统及其各子系统的综合评价函数表示为:

$$P(x) = \sum_{j=1}^p u_j x_{ij}', \quad S(x) = \sum_{j=1}^s u_j x_{ij}', \quad R(x) = \sum_{j=1}^r u_j x_{ij}', \quad T(x) = \sum_{j=1}^n u_j x_{ij}' \quad (8)$$

式中, $P(x)$ 、 $S(x)$ 、 $R(x)$ 分别表示土地生态系统的压力指数、状态指数、响应指数; $T(x)$ 表示土地生态系统的综合指数。

目前,国内外相关研究尚未建立土地生态系统安全等级划分的统一标准。根据已有研究^[17-19],综合考虑区域生态环境特征和专家知识,采用自然断点法构建河北省土地生态系统安全等级体系(表1)。

表 1 土地生态系统安全等级划分

Tab.1 Classification and gradation criteria of land ecosystem development

序号 Order	综合指数 Comprehensive index	安全等级 Security level	特征 Characteristic
1	(0.90, 1.00]	安全级	土地生态系统处于理想状态, 结构完整, 功能完善; 生态环境基本未受干扰, 没有生态灾害; 生态自我恢复能力强, 人地关系和谐。
2	(0.80, 0.90]	较安全级	土地生态系统破坏较小, 结构基本完整, 功能较为完善; 生态环境良好, 生态灾害较少; 生态可以自我恢复, 人地关系较为和谐。
3	(0.60, 0.80]	敏感级	土地生态系统中度破坏, 结构相对不完整, 尚能维持基本功能; 生态环境受到一定破坏, 生态灾害偶有发生; 生态恢复较为困难, 人地关系受到一定影响。
4	(0.40, 0.60]	风险级	土地生态系统破坏明显, 结构破损, 功能退化; 生态环境脆弱, 生态灾害经常发生; 生态恢复难度大, 人地关系受到威胁。
5	(0.00, 0.40]	恶化级	土地生态系统破坏严重, 结构破碎, 功能丧失; 生态环境很脆弱, 生态灾害频发; 生态极难恢复, 人地关系失衡。

2.3 耦合度模型

借鉴容量耦合系数模型构建土地生态系统压力、状态、响应 3 个子系统之间的耦合度模型, 表达式为:

$$C = \{ [P(x) \times S(x) \times R(x)] / [P(x) + S(x) + R(x)]^3 \}^{1/3} \quad (9)$$

式中, C 为耦合度, 其值介于[0,1], 其值越高, 表明土地生态系统各子系统之间相互作用程度越大。

目前学界关于耦合协调度等级划分尚没有统一的标准。为对河北省土地生态系统的耦合协调状况做出更加清晰判定和认识, 以便研究结果有更好的实用性和操作性, 本文以有效揭示河北省土地生态系统耦合协调度时空分异特征为目标, 结合耦合度和协调度的测算结果及河北省自然、经济和社会的实际情况, 借鉴已有研究成果^[20-22], 采用中值分段法, 对耦合度和协调度进行等级划分 (表 2)。

表 2 土地生态系统耦合协调度等级划分

Tab.2 Classification and gradation criteria of coupling and coordination in land ecosystem

序号 Order	值域 Range	耦合等级 Coupling level	协调等级 Coordination level	耦合协调组合状态 Combined state of coupling and coordination	特征 Characteristic
1	(0.90, 1.00]	高度耦合	高度协调	和谐	压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互作用程度高, 相互协同程度高, 土地生态系统内部达到和谐期。
2	(0.80, 0.90]	良好耦合	良好协调	契合	压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互作用程度较好, 相互协同程度较好, 土地生态系统内部达到契合期。
3	(0.60, 0.80]	中度耦合	中度协调	磨合	压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互作用程度中等, 相互协同程度中等, 土地生态系统内部处于磨合期。
4	(0.30, 0.60]	基本耦合	基本协调	拮抗	压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互作用程度一般, 相互协同程度一般, 土地生态系统内部处于拮抗期。
5	(0.00, 0.30]	低度耦合	低度协调	离散	压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互作用程度低, 相互协同程度低, 土地生态系统内部处于离散期。

2.4 协调度模型

为了反映土地生态系统 3 个子系统之间协调发展水平的高低, 构建压力、状态、响应 3 个子系统之间的协调度模型, 表达式为:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中， D 为协调度，其值越高，表明土地生态系统各子系统之间协同程度越大。同样地，采用中值分段法，将协调度划分为5个等级（表2）。

2.5 空间分异模型

采用空间差异系数对耦合度进行区域差异性分析，耦合度空间差异系数 CVC 为：

$$CVC = \frac{S(C)}{\bar{C}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [C(i) - \bar{C}]^2}}{\bar{C}} \times 100\% \quad (11)$$

同理可得协调度空间差异系数 CVD 为：

$$CVD = \frac{S(D)}{\bar{D}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [D(i) - \bar{D}]^2}}{\bar{D}} \times 100\% \quad (12)$$

3 结果与分析

3.1 土地生态系统耦合协调机制分析

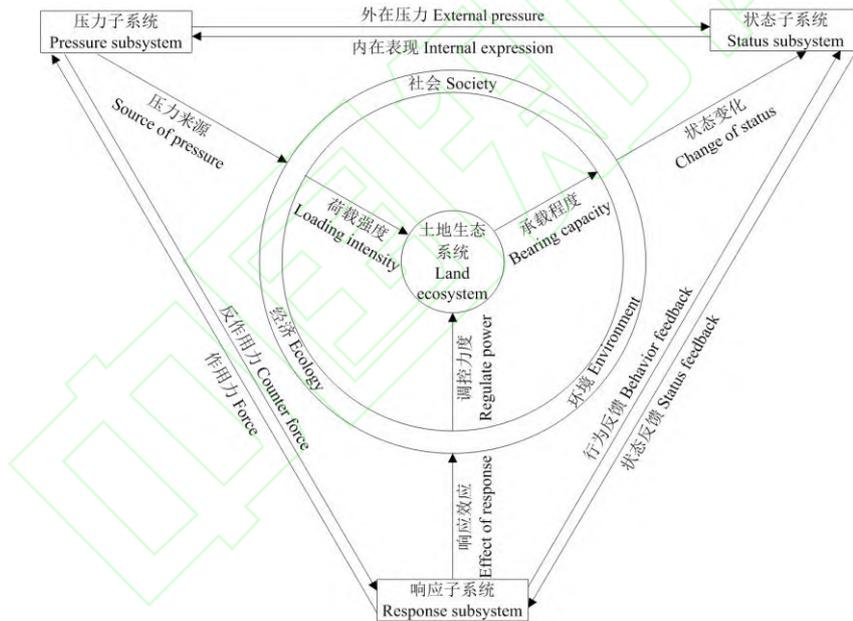


图1 土地生态系统耦合协调作用机制

Fig.1 The interactive mechanism of coupling coordination in land ecosystem

压力—状态—响应（PSR）模型从系统论的视角将研究对象视为一个完整的系统，从过程评价的角度全面揭示系统的压力来源、状态变化以及响应效应，目前已得到较为普遍的认可和应用^[23]。本研究基于对PSR概念模型的理解，可将土地生态系统划分为压力子系统、状态子系统和响应子系统，将土地生态系统看作是由压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间相互影响、彼此制约所组成的耦合共生系统，同时在内容上涉及到社会、经济和环境3个要素（图1）。其中，压力子系统表征土地生态系统的压力来源，体现为来源于社会、经济和环境方面的压力对土地生态系统的荷载强度。状态子系统表征土地生态系统的状态变化，体现为土地生态系统应对压力，在社会、经济和环境方面所表现的承载程度。响应子系统表征土地生态系统的响应效应，体现为人类应对土地生态系统的状态变化，从社会、经济

和环境方面所做出的调控力度。

从系统论的角度,可将土地生态系统的耦合度定义为压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互影响程度,将土地生态系统的协调度定义为压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间的相互协同程度。土地生态系统耦合协调的最终目的在于实现压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间在时间、空间上的耦合,在结构、层次上的协调。土地生态系统的健康稳定发展是压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间相互作用、彼此共生的结果,取决于系统中社会、经济和环境要素的相互作用方式和程度。

3.2 基于过程评价的指标体系构建

表 3 土地生态系统耦合协调度评价指标体系

Tab.3 Evaluation index system of coupling coordination degree of land ecosystem

系统层 System	准则层 Criterion	指标层 Index	含义 Implication	性质 Property	权重 Weight
压力子系统 Press subsystem (0.567)	社会压力	人口密度 (人 km ⁻²)	区域总人口数/土地总面积, 表征单位土地人口压力	逆	0.230
		人口自然增长率 (%)	人口出生率/人口死亡率, 表征人口增长压力	逆	0.105
		城镇化水平 (%)	城镇人口/总人口, 表征城镇化扩展压力	逆	0.149
	经济压力	农业经济比重 (%)	第一产业增加值/农用地面积×100%, 表征农业经济结构压力	逆	0.195
		工业化率 (%)	工业产业增加值/GDP×100%, 表征工业化发展压力	逆	0.147
		GDP 增长率 (%)	本年 GDP 增加值/上年 GDP 总量×100%, 表征经济增长压力	逆	0.177
	环境压力	单位播种面积农药使用量 (kg hm ⁻²)	农药使用量/播种地面积, 表征农业土地污染方面的压力	逆	0.205
		单位播种面积化肥施用量 (kg hm ⁻²)	化肥施用量/播种地面积, 表征农业土地污染方面的压力	逆	0.211
		单位土地工业三废负荷(t km ⁻²)	工业三废排放量/城市土地面积, 表征工业土地污染压力	逆	0.162
		自然灾害面积比重 (%)	自然灾害面积/土地总面积×100%, 表征自然灾害的压力	逆	0.179
状态子系统 State subsystem (0.607)	社会状态	人均耕地面积 (hm ² ·人 ⁻¹)	耕地面积/总人口, 表征耕地资源状况	正	0.202
		城乡建设用地比重 (%)	城乡建设用地面积/土地总面积×100%, 表征建设用地开发状况	逆	0.230
		工业用地比重 (%)	工业用地面积/土地总面积×100%, 表征工业用地使用状况	逆	0.128
	经济状态	单位播种面积粮食产量 (kg hm ⁻²)	粮食总产量/播种地面积, 表征耕地产出状况	正	0.196
		经济密度 (10 ⁴ km ⁻²)	GDP 总量/土地总面积, 表征土地集约利用状况	正	0.181
		万元 GDP 能耗(吨标准煤 10 ⁻⁴ 元)	GDP 能耗/GDP 总量, 表征经济结构状况	逆	0.282
	环境状态	森林覆盖率 (%)	森林面积/土地总面积×100%, 表征水土保持状况	正	0.154
		城镇绿化水平 (%)	城镇绿化面积/城镇总面积×100%, 表征城市土地生态建设状况	正	0.183
		水土协调度 (%)	水资源总量/耕地面积×100%, 表征水土协调状况	正	0.120
		水土流失面积比例 (%)	水土流失面积/土地总面积×100%, 表征土地保持状况	逆	0.188
社会响应	耕地有效灌溉面积比例 (%)	有效灌溉面积/耕地面积×100%, 表征耕地水资源保障水平	正	0.227	
	单位土地社会固定资产投资额 (10 ⁴ 元·km ⁻²)	社会固定资产投资额/区域土地总面积, 表征单位土地社会投入水平	正	0.077	
	环保治理投资占 GDP 比重 (%)	环保治理投资额/GDP×100%, 表征土地生态维护力度	正	0.127	
	人均 GDP (元·人 ⁻¹)	GDP 总量/总人口数, 表征经济发展水平	正	0.225	
	第三产业比重 (%)	第三产业增加值/GDP×100%, 表征产业结构优化水平	正	0.168	
响应子系统 Response subsystem (0.557)	绿色农业生产用地比重 (%)	绿色农业生产地面积/土地总面积×100%, 表征产业结构优化水平	正	0.148	
	生活垃圾无害化处理率 (%)	生活垃圾处理量/生活垃圾产生量×100%, 表征土地生态维护水平	正	0.159	
	工业固废处理比例 (%)	工业固废处理量/工业固废产生量×100%, 表征工业土地生态保护水平	正	0.110	
	造林面积比重 (%)	造林面积/土地总面积, 表征土地生态加强水平	正	0.236	
	水土流失治理率 (%)	水土流失治理面积/水土流失面积×100%, 表征土地生态治理水平	正	0.207	

在以上所阐述的土地生态系统运行机制的基础上,立足于系统论和过程评价的视角,以压力、状态和响应 3 个子系统为整体框架,以社会、经济、环境 3 个要素为准则层,遵循指标选取的系统性、多维性、差异性原则,结合区域土地利用及社会经济发展特征,构建耦

合协调度评价指标体系（表 3）。该指标体系共包含 30 项指标，其中正向指标表示对土地生态系统安全状况具有正向功效，逆向指标表示对土地生态系统安全状况具有负向功效。

所需的各种土地利用类型数据主要是利用 ERDAS 和 ArcGIS 对遥感影像解译和信息提取；社会经济和其他地理要素的数据主要来源于各类统计年鉴以及发改委、工业、农业、林业、环保等相关部门提供的数据。

3.3 评价结果分析

3.3.1 土地生态系统安全状况分析 通过综合评价模型分别计算出 2010—2020 年河北省土地生态安全压力、状态、响应和综合指数（图 2），根据表 1 所划分的土地生态安全等级体系对土地生态系统的安全状况进行评价。

从总体来看，2010—2020 年河北省土地生态安全压力指数呈波动性增长趋势，且整体水平较高，介于 0.420 和 0.563 之间。状态和响应指数逐年上升，增长迅速。土地生态安全综合指数由 2010 年的 0.300 持续上升到 2020 年的 0.699，年均增长率为 13.30%，土地生态系统安全等级由“恶化级”经“风险级”升格至“敏感级”，土地生态安全状况日益改善。但是，土地生态安全综合指数的均值为 0.509，土地生态系统平均安全等级尚处于“风险级”，另外，至 2020 年，土地生态系统安全等级尚处于“敏感级”，土地生态系统总体安全水平仍然较低。

从变化过程来看，2010—2012 年河北省土地生态系统安全等级处于“恶化级”，但期间土地生态安全综合指数处于良好的上升态势，状态指数和响应指数的大幅度提升对此有较大贡献。2013—2016 年河北省土地生态系统安全等级由“恶化级”转变为“风险级”，土地生态安全形势有所好转，在此期间，土地生态安全综合指数仍保持平稳增长，压力指数呈“U”型变化，状态指数大幅度增长，响应指数在 2014 年出现折点后趋于平缓。2017—2020 年河北省土地生态系统安全等级由“风险级”升格为“敏感级”，这主要得益于期间压力指数的下降和响应指数的大幅度增长。

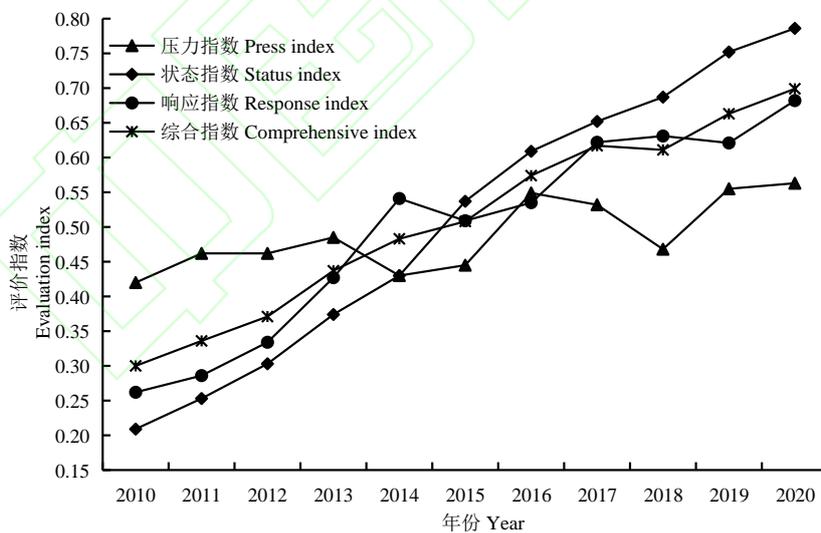


图 2 2010—2020 年河北省土地生态系统安全状况

Fig.2 Land ecosystem security in Hebei Province from 2010 to 2020

3.3.2 耦合协调度时序变化 在土地生态系统现状评价结果的基础上，利用耦合度和协调度模型分别计算出 2010—2020 年河北省土地生态系统耦合度和协调度（图 3），同时，对照表 2 中所划分的耦合协调度等级体系确定土地生态系统耦合协调等级。

从总体来看，2010—2020 年河北省土地生态系统耦合度和协调度均呈现稳步增长态势，耦合作用的强度大于协调性，但协调度的增长速率大于耦合度。其中，耦合度由 2010 年的

0.289 上升到 2020 年的 0.481，年均增长率为 6.64%，耦合状态由“低度耦合”过渡到“基本耦合”，表明土地生态系统内部三大子系统之间相互作用程度不断加强。耦合度均值为 0.377，平均状态刚达到“基本耦合”阶段，表明土地生态系统内部三大子系统之间相互作用程度一般，提升空间还很大。协调度由 2010 年的 0.149 上升到 2020 年的 0.455，年均增长率为 20.53%，协调状态由“低度协调”过渡到“基本协调”，表明土地生态系统内部三大子系统之间相互协同程度越来越大。协调度均值为 0.299，平均状态处于“低度协调”阶段，表明土地生态系统内部三大子系统之间相互协同程度仍然较低，但已接近“基本协调”阶段，土地生态系统整体向良性协调转变。

从变化过程来看，2010—2011 年耦合度状态处于“低度耦合”阶段，2012—2020 年过渡到“基本耦合”阶段，土地生态系统内部各子系统之间相互作用程度有所提高。协调度状态也分为两个阶段，即 2010—2015 年处于“低度协调”阶段，2016—2020 年过渡到“基本协调”阶段。

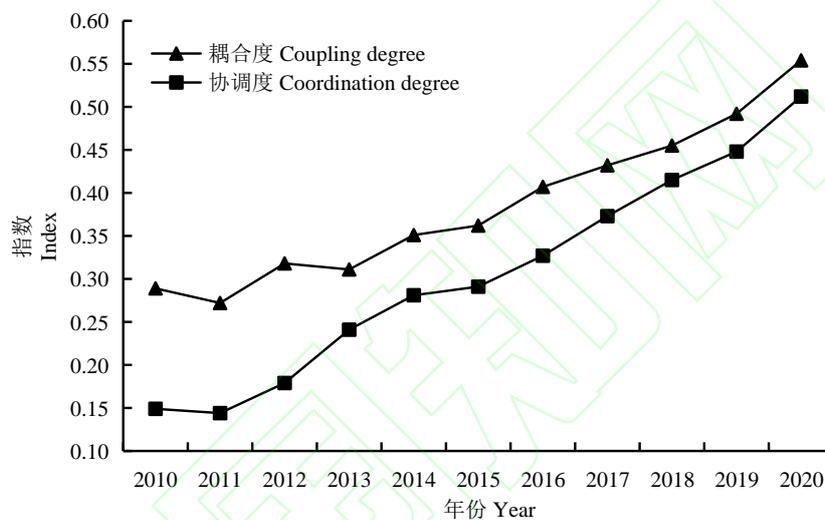


图 3 2010—2020 年河北省土地生态系统耦合度和协调度

Fig.3 Coupling degree and coordination degree of land ecosystem in Hebei Province from 2010 to 2020

3.3.3 耦合度空间格局 通过耦合度模型计算得到河北省 11 个地级市 2010 年、2015 年和 2020 年 3 个典型年份的耦合度，利用 ArcGIS 绘制出耦合度的空间格局图（图 4）。

结果显示，11 个地级市 3 个典型年份耦合度均出现了低度耦合、基本耦合和中度耦合三种状态。其中，处于低度耦合的区域个数依次为 5 个、3 个和 2 个，处于基本耦合的区域个数依次为 4 个、5 个和 4 个，处于中度耦合的区域个数依次为 2 个、3 个和 5 个，可以看出，低耦合状态的区域个数在减少，高耦合状态的区域个数在增加，这表明 3 个不同时段各区域土地生态系统内部三大子系统的耦合度逐年提高，11 个地级市土地生态系统相互作用程度明显增强，反映出来源于社会、经济、环境方面的压力对土地生态系统的作用强度越来越大，导致土地生态系统在社会、经济、环境方面的状态变化也越来越显著，促使人们应对土地生态系统的状态变化所做出的响应措施也越来越多。

3 个典型年份中同时处于低度耦合阶段的有邯郸市和衡水市，处于基本耦合阶段的有廊坊市，处于中度耦合阶段的有张家口市和秦皇岛市。其他 6 个市均出现了耦合区间的跨越，其中，承德市、保定市和沧州市由低度耦合过渡到基本耦合阶段，石家庄市、唐山市和邢台市由基本耦合过渡到中度耦合阶段。

从空间分布来看，耦合度高、低值大致呈“中间低，两翼高”的格局特征。低值区以衡水市和邯郸市为典型，衡水市耕地非农化占用面积较大，人均耕地面积小，工农业生产对土地的污染严重，土地生态压力大，而积极响效应低。邯郸市作为河北省传统工业城市，以

煤炭为主要能源的第二产业比重大，工业生产对土地生态的污染严重，对土地生态系统造成极大压力。高值区以张家口市、秦皇岛市为代表，这两个城市人口密度较小，人均资源占有量较大，同时积极发展第三产业，环保投入力度大，土地生态环境良好。张家口、承德以及秦皇岛和唐山北部和西部区域是京津冀生态屏障区，预计未来生态环境将持续改善。

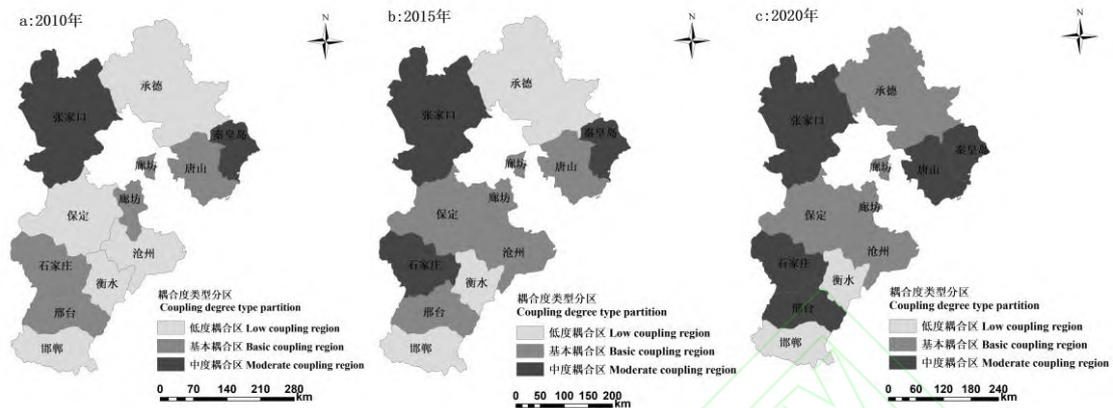


图 4 河北省土地生态系统耦合度空间格局

Fig.4 Spatial pattern of coupling degree of land ecosystem in Hebei Province

3.3.4 协调度空间格局 通过协调度模型计算得到河北省 11 个地级市 2010 年、2015 年和 2020 年 3 个典型年份的协调度，利用 ArcGIS 绘制出协调度的空间格局图（图 5）。

结果显示，11 个地级市 3 个典型年份协调度均出现了低度协调、基本协调和中度协调三种状态。其中，处于低度协调的区域个数依次为 6 个、4 个和 3 个，处于基本协调的区域个数依次为 4 个、5 个和 5 个，处于中度协调的区域个数依次为 1 个、2 个和 3 个，可以看出，3 个不同时段各区域土地生态系统内部三大子系统的协调度逐年增长，11 个地级市土地生态系统相互协同程度增强。对比耦合度的空间变化，协调度的空间变化稍滞后于耦合度的变化，反映出耦合度和协调度的空间分异特征。

3 个典型年份中同时处于低度协调阶段的有邯郸市、衡水市和承德市，处于基本协调阶段的有唐山市和邢台市，处于中度协调阶段的是秦皇岛市。其他 5 个市均出现了协调区间的跨越，其中，保定市、沧州市和廊坊市由低度协调过渡到基本协调阶段，张家口市和石家庄市由基本协调过渡到中度协调阶段。

从空间分布来看，协调度高、低值区的空间格局特征和耦合度基本相似，低值区主要分布在南北两侧，以邯郸市、衡水市和承德市为代表，高值区主要分布在东西两侧，以张家口市和秦皇岛市为代表，由低值向高值跨越的区域主要分布在中部地区，以保定市、廊坊市和沧州市为代表。

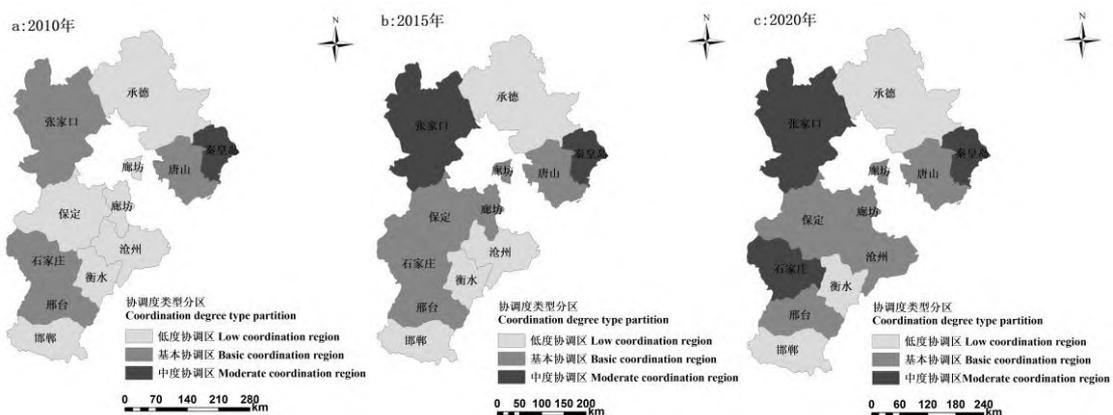


图5 河北省土地生态系统协调度空间格局

Fig.5 Spatial pattern of coordination degree of land ecosystem in Hebei Province

3.3.5 耦合度和协调度空间组合 为了更加全面的了解土地生态系统耦合协调发展的综合特征,对河北省 11 个地级市 3 个典型年份的耦合度和协调度进行空间叠加分析,并利用 ArcGIS 绘制耦合协调类型空间组合分区图(图 6)。

11 个地级市 3 个典型年份出现了低耦合低协调区 ($0 < C \leq 0.3$ 、 $0 < D \leq 0.3$)、基本耦合低协调区 ($0.3 < C \leq 0.6$ 、 $0 < D \leq 0.3$)、基本耦合基本协调区 ($0.3 < C \leq 0.6$ 、 $0.3 < D \leq 0.6$)、中耦合基本协调区 ($0.6 < C \leq 0.8$ 、 $0.3 < D \leq 0.6$)和中耦合中协调区 ($0.6 < C \leq 0.8$ 、 $0.6 < D \leq 0.8$)五种空间组合类型。其中,处于低耦合低协调区的区域个数依次为 5 个、3 个和 2 个,处于基本耦合低协调区的区域个数均为 1 个,处于基本耦合基本协调区的区域个数依次为 3 个、4 个和 3 个,处于中耦合基本协调区的区域个数依次为 1 个、1 个和 2 个,处于中耦合中协调区的区域个数依次为 1 个、2 个和 3 个。可以看出,3 个不同时段耦合和协调状态既出现了同级叠合,又出现了异级交错,进一步反映出耦合度和协调度并非完全保持一致的空间分异特征,不同区域,社会、经济发展等方面的压力不同以及所采取的响应机制差异是造成土地生态系统耦合协调类型分异的主要原因。

3 个典型年份中同时处于低耦合低协调阶段的有邯郸市和衡水市,处于中耦合中协调阶段的是秦皇岛市。其他 8 个市的耦合协调类型出现了由低级类型向高级类型过渡的不同组合。

从空间分布来看,低耦合低协调区集中分布在河北省南北两侧,以邯郸市、衡水市为代表,中耦合中协调区主要分布在东西两侧,以张家口市和秦皇岛市为代表,其他不同组合类型主要分布在中部地区,以保定市、廊坊市和沧州市为代表。

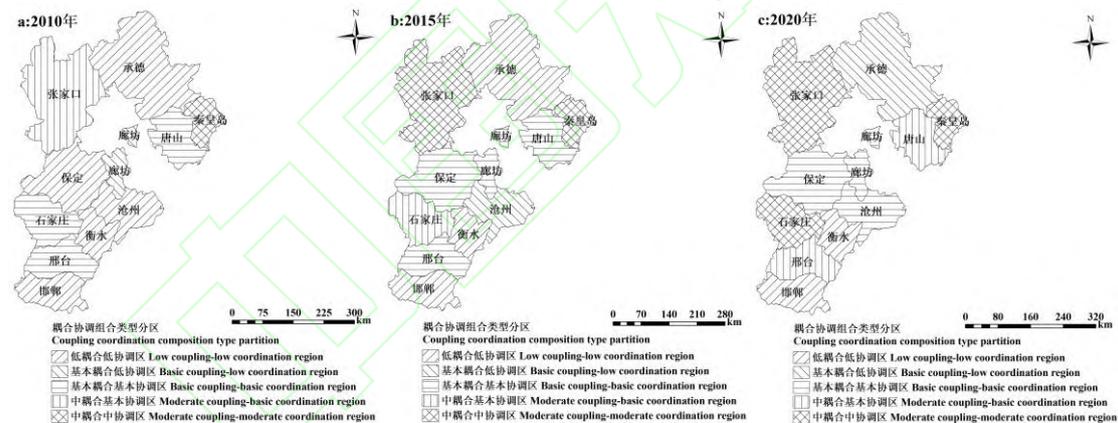


图6 河北省土地生态系统耦合协调类型空间组合

Fig.6 Spatial combination of coupling coordination type of land ecosystem in Hebei Province

3.3.6 耦合协调度空间分异 利用空间差异系数模型分别计算出 2010—2020 年河北省 11 个地级市土地生态系统耦合度和协调度的空间差异系数(图 7)。

可以看出,2010—2020 年,河北省各市之间土地生态系统耦合度和协调度的空间差异系数整体呈降低趋势,且两者都在 2015 年后趋于平稳,说明各市之间土地生态系统耦合性和协调性的空间差异在不断缩小,近年来相对平稳。各市历年耦合度的空间差异系数均小于协调度的空间差异系数,各市之间土地生态系统内部相互作用强度的差异性弱于相互协同强度的差异性。耦合度和协调度空间差异系数的均值分别为 37.14%、44.99%,两者均处于较高水平,各市之间土地生态系统的耦合性和协调性的区域差异仍然不容忽视。河北省一方面需从全局着眼,加强区域之间土地生态系统耦合性和协调性的统筹,尤其是协调性的增强,以促进土地生态系统耦合协调性全域水平的提升。另一方面要根据各市土地生态系统的时空

耦合特征及其差异性，制定差异化的调控策略，以提高各市域土地生态系统的功能和效益。

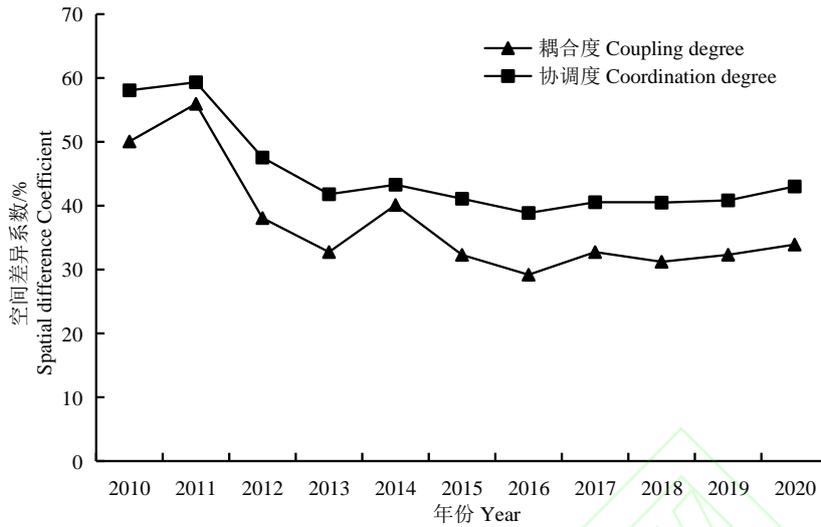


图7 河北省土地生态系统耦合度和协调度空间差异性

Fig.7 Space difference of coupling degree and coordination degree of land ecosystem in Hebei Province

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究以土地生态系统内在的耦合协调机制为基础，构建基于“压力—状态—响应”过程的耦合协调度评价指标体系，融合多源数据，在对河北省土地生态系统安全状况进行评价的基础上，通过容量耦合协调模型对土地生态压力子系统、状态子系统和响应子系统三者之间耦合协调发展的时空特征进行了分析。得出以下主要结论：

(1) 2010—2020年，河北省土地生态安全综合指数由2010年的0.300持续上升到2020年的0.699，年均增长率为13.30%，土地生态系统安全等级由“恶化级”经“风险级”升格至“敏感级”，土地生态安全状况逐渐改善。但土地生态安全综合指数的均值为0.509，土地生态系统平均安全等级尚处于“风险级”，土地生态系统总体安全水平仍然较低。

(2) 不同的时空尺度下，土地生态系统的耦合协调性呈现不同的时空特征。时间尺度上，2010—2020年，河北省土地生态系统耦合度和协调度均呈现稳步增长态势，且耦合作用的强度大于协调性，但协调度的增长速率大于耦合度。其中，耦合度状态由低度耦合过渡到基本耦合，协调度状态由低度协调过渡到基本协调，表明土地生态系统内部三个子系统之间相互作用程度和相互协同程度不断加强；但平均耦合状态刚达到基本耦合，平均协调状态尚处于低度协调，耦合协调性的提升空间还很大。

(3) 空间尺度上，从空间格局来看，河北省11个地级市在2010年、2015年和2020年3个典型年份耦合度出现了低度耦合、基本耦合和中度耦合3种状态，协调度出现了低度协调、基本协调和中度协调3种状态，11市土地生态系统的耦合度和协调度均有所增强，其中6个市出现了耦合区间的跨越，5个市出现了协调区间的跨越，协调度的空间变化稍滞后于耦合度的变化。耦合度和协调度的空间分布特征基本相似，高、低值区大致呈“中间低，两翼高”的分布格局。从空间组合来看，河北省11个地级市3个典型年份耦合和协调状态既出现了同级叠合，又出现了异级交错，产生了低耦合低协调区、基本耦合低协调区、基本耦合基本协调区、中耦合基本协调区和中耦合中协调区5种空间组合类型，其中，低耦合低协调区集中分布在河北省南北两侧，以邯郸市、衡水市为代表，中耦合中协调区主要分布在东西两侧，以张家口市和秦皇岛市为代表，其他不同组合类型主要分布在中部地区，以保定市、廊坊市和沧州市为代表。耦合度和协调度的异级交错反映出耦合度和协调度并非完全保

持一致的空间分异特征。从空间分异来看, 2010—2020年, 河北省各市之间土地生态系统耦合度和协调度的区域差异性均呈降低趋势, 近年相对平稳, 耦合度的空间差异性低于协调度的空间差异性。耦合度和协调度空间差异系数的均值分别为 37.14%、44.99%, 两者均处于较高水平, 各市之间的差异性仍然不容忽视。

4.2 讨论

土地生态系统是由自然要素与人类活动所主导的社会经济要素之间相互依存、相互作用而形成的复合系统, 其具有显著的动态性、过程性和系统性^[24]。土地生态系统健康稳定发展取决于系统内部各要素之间的耦合协调。本研究提出的基于过程评价的土地生态系统耦合协调发展的研究思路, 有效的揭示了土地生态系统内在的耦合协调机制及时空分异特征。与传统的静态时点评价相比, 动态过程评价方法充分体现了土地生态系统各组成要素的相互作用过程。在有效揭示土地生态系统内在耦合协调机制基础上所构建的评价指标体系, 不仅全面反映了土地生态系统的要素、属性、结构和功能, 更揭示了各子系统之间的相互作用关系, 得出的评价结果更客观、合理。

系统学中的耦合是指系统之间或系统内部各子系统之间、各要素之间的相互作用和影响关系^[25], 耦合度用以测度彼此之间相互作用和影响的程度^[26], 效果不分利弊。协调是指系统之间或系统内部各子系统之间、各要素之间的良性互动关系^[27], 协调度用以测度彼此之间相互协同的程度, 体现了系统由无序走向有序的趋势^[28]。从研究结果来看, 在不同的时空尺度下, 河北省土地生态系统的耦合度和协调度呈现不同的时空分异特征。时间尺度上, 同时期的耦合度大于协调度, 但协调度的增长速率大于耦合度。空间尺度上, 同区域的耦合度和协调度既出现了同级叠合, 又出现了异级交错, 形成了多种空间组合类型。不同组合类型反映了耦合协调度变化的基本规律, 即耦合度与协调度并非保持一致, 土地生态系统耦合度高的区域其协调度不一定高。人类社会经济活动对土地资源利用方式程度以及对土地生态环境干扰力度是导致耦合协调类型变化的直接驱动力, 经济社会发展水平、城市发展历史和基础、区域发展战略与政策等是推动耦合协调度时空格局演化的主要影响因素。因此, 在土地生态系统的调控和管理中, 应充分尊重系统各组成要素的相互作用过程, 充分考虑系统耦合协调的时空分异特征, 践行“资源节约型和环境友好型”发展道路, 因地制宜调整土地利用类型, 彻底改变“粗放式、掠夺式”社会经济发展模式, 注重内涵发展和集约水平, 优化产业结构, 持续推进“退田还湖、退耕还林”等生态修复和治理措施; 通过科技创新、循环经济和低碳模式, 提高土地资源利用率, 降低土地生态环境压力, 增强土地生态系统内在协调性, 促进土地生态系统的良性互动和相互协同。

需要指出的是, 受数据可获取性的限制, 本文构建的土地生态系统耦合协调发展测度指标体系没有考虑城乡在生态环境基础、土地利用结构以及社会经济活动等方面的细微差异。以市域为单元的耦合协调发展研究仍属于宏观区域尺度, 不能反映出单元内部差异, 没有考虑到土地利用类型的空间连续性, 更为微观的尺度研究还不够。这就需要突破行政界线, 加强部门间基础数据的共享和对接, 创新数据整合方式和方法, 进一步细化评估单元到土地景观单元水平, 从各土地景观类型空间博弈过程的视角分析土地生态系统的连续性变化, 为土地生态系统安全预警、生态红线划分以及土地用途管制提供参考, 这是本研究下一步深入的方向。

参考文献 References:

- [1] 吴次芳, 陈美球. 土地生态系统的复杂性研究[J]. 应用生态学报, 2002(6): 753-756.
WU C F, CHEN M Q. Complexity of land ecosystem[J]. Chinese journal of applied ecology, 2002(6): 753-756.
- [2] MARTINEZ M L, PEREZ-MAQUEO O, VAZQUEZ G, et al. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico[J]. Forest ecology and management, 2009,

- 258(9): 1856-1863.
- [3] FENG Y X, LUO G P, HAN Q F, et al. Evaluation of land use change degree and ecological security in the Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. *Pussian journal of ecology*, 2014, 45(1): 46-53.
- [4] AI J H, FENG L, DONG X W, et al. Exploring coupling coordination between urbanization and ecosystem quality(1985-2010): a case study from Lianyungang City, China[J]. *Frontiers of earth science*, 2016, 10(3): 527-545.
- [5] 叶岱夫. 人地关系地域系统与可持续发展的相互作用机理初探[J]. *地理研究*, 2001, 20(3): 307-314.
- YE D F. The interactive mechanism of man-earth areal system and the sustainable development[J]. *Geographical research*, 2001, 20(3): 307-314.
- [6] 陈百明, 张凤荣. 中国土地可持续利用指标体系的理论与方法[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(3): 197-203.
- CHEN B M, ZHANG F R. Theory and methodology for sustainable land use indicator system in China[J]. *Journal of natural resources*, 2001, 16(3): 197-203.
- [7] 邱扬, 傅伯杰. 土地持续利用评价的景观生态学基础[J]. *资源科学*, 2000, 22(6): 1-8.
- QIU Y, FU B J. Land evaluation for sustainable use based on landscape ecologic theory[J]. *Resources science*, 2000, 22(6): 1-8.
- [8] 李昊, 李世平, 银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 50-56.
- LI H, LI S P, YIN M H. Research progress and prospect of land ecological security in China[J]. *Journal of arid land resources and environment*, 2016, 30(9): 50-56.
- [9] LAI S H, SHA J M, ELADAWY, A, et al. Evaluation of ecological security and ecological maintenance based on pressure-state-response (PSR) model, case study: Fuzhou city, China[J]. *Human and ecological risk assessment*, 2022, 28(7): 734-761.
- [10] 李子君, 王硕, 马良, 等. 基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J]. *土壤通报*, 2021, 52(2): 425-433.
- LI Z J, WANG S, MA L, et al. Evaluation of land ecological security and influencing factors in Yimeng Mountain Area based on entropy weight matter element model[J]. *Chinese journal of soil science*, 2021, 52(2): 425-433.
- [11] SU Y B. Dynamic security assessment and the countermeasures analysis of land ecology in Henan province from 2007 to 2017[J]. *RSC advances*, 2019, 9(56), 32414-32424.
- [12] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 等. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1563-1572.
- WANG T D, CAO J X, ZHAO Y H, et al. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi Province, Northwest China based on PSR[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2021, 32(5): 1563-1572.
- [13] 孔雪松, 陈俊励, 王静, 等. 耦合土地利用格局与过程变化的生态干扰评价——以长三角地区为例[J]. *地理科学*, 2021, 41(11): 2031-2041.
- KONG X S, CHEN J L, WANG J, et al. Evaluation of ecological disturbance coupling land use pattern and process change: taking the Yangtze River Delta as an example[J]. *Scientia geographica sinica*, 2021, 41(11): 2031-2041.
- [14] 李春燕, 南灵. 陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]. *中国土地科学*, 2015, 29(4): 72-81.
- LI C Y, NAN L. Dynamic evaluation and diagnosis of obstacle factors on land eco-security in Shaanxi Province[J]. *China land science*, 2015, 29(4):72-81.
- [15] 张成, 黄芳芳, 尚国珩. 土地生态安全预警系统设计与实现[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(6): 931-944.
- ZHANG C, HUANG F F, SHANG G B. Design and implementation of the land ecological security warning system[J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2020, 28(6): 931-944.
- [16] 吴景全, 吴铭婉, 臧传富. 西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J]. *干旱区地理*, 2021,

44(5): 1471-1482.

WU J Q, WU M W, ZHANG C F. Land use change and land ecological security assessment in the river basins of northwestern China[J]. *Arid land geography*, 2021, 44(5): 1471-1482.

[17] HE W, WEN Y L, XIONG Z Q. Spatial-temporal dynamics and scenario simulation of land ecological security: a case study of Deyang, Sichuan Province, China[J]. *Environmental science and pollution research*, 2021, 28(16): 20209-20221.

[18] 周迎雪, 李贻学, 孙仪阳, 等. 基于不同评价模型的土地生态安全评价——以山东半岛蓝色经济区为例[J]. *中国人口 资源与环境*, 2016, 195(S2): 207-210.

ZHOU Y X, LI Y X, SUN Y Y, et al. Evaluation of land eco-security based on different evaluation model: a case in Shandong Peninsula Blue Economic Zone[J]. *China population, resources and environment*, 2016, 195(S2): 207-210.

[19] 郑岚, 张志斌, 笪晓军, 等. 嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 289-298.

ZENG L, ZHANG Z B, DA X J, et al. Dynamic evaluation and influencing factors of land ecological security in Jiayuguan City[J]. *Arid land geography*, 2017, 25(5): 778-786.

[20] HE D, HOU K, WEN J F, et al. A coupled study of ecological security and land use change based on GIS and entropy method—a typical region in Northwest China, Lanzhou[J]. *Environmental science and pollution research*, 2022, 29(4): 6347-6359.

[21] 张路路, 郑新奇, 孟超, 等. 湖南省土地多功能耦合协调度时空分异[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(3): 85-94.

ZHANG L L, ZENG X Q, MENG C, et al. Spatio-temporal difference of coupling coordination degree of land use functions in Hunan Province[J]. *China land science*, 2019, 33(3): 85-94.

[22] 张焱文, 王枫. 2000-2018 年广东省土地生态安全与经济发展耦合协调分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 242-249.

ZHANG Y W, WANG F. Coupling and coordination of land ecological security and economic development in Guangdong Province from 2000 to 2018[J]. *Research of soil and water conservation*, 2021, 28(1): 242-249.

[23] LI S. Evaluation on urban land ecological security based on the PSR model and matter-element analysis: A case study of Zhuhai, Guangdong, China[J]. *Journal of landscape research*, 2019, 11(3): 82-88, 92.

[24] 张传华, 张凤太, 王钟书, 等. 生态敏感区村域尺度土地生态经济系统的耦合协调发展研究——以重庆市江津区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1547-1558.

ZHANG C H, ZHANG F T, WANG Z S, et al. Study on the Coupling and Coordinated Development of Land Eco-economic System in Village Scale in the Ecologically Sensitive Area: A Case of Jiangjin District, Chongqing, China[J]. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1547-1558.

[25] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. *地理学报*, 2012, 67(10): 1299-1307.

MA L, JIN FF J, LIU Y. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China[J]. *Acta geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1299-1307.

[26] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析——兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 788-799.

JIANG L, BAI L, WU Y M. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China[J]. *Journal of natural resources*, 2017, 32(5): 788-799.

[27] 孔伟, 任亮, 王淑佳, 等. 河北省生态环境与经济协调发展的时空演变[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2941-2949.

- KONG W, REN L, WANG S J, et al. Spatial and temporal evolution of the ecological environment and economy coordinated development in Hebei Province, China[J]. Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(9): 2941-2949.
- [28] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1108-1116.
- XIONG J X, CHEN D L, PENG B F, et al. Spatio-temporal of coupling coordinative degree of ecological carrying capacity in the Dongting Lake Region[J]. Scientia geographica Sinica, 2014, 34(9): 1108-1116.

