DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170903

卓志清, 兴安, 孙忠祥, 黄元仿, 曹梦, 李贞, 张世文. 东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 892−902
ZHUO Z Q, XING A, SUN Z X, HUANG Y F, CAO M, LI Z, ZHANG S W. Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 892−902

东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析*

卓志清[1], 兴 安[1], 孙忠祥[1], 黄元仿[1**], 曹 梦[1], 李 贞[1], 张世文[2]

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 安徽理工大学地球与环境学院 淮南 232001)

摘 要: 随着传统农业向现代农业过渡, 农业已由单一的生产功能向多功能方向转变, 全面评价农业生态系统的协同性对区域可持续发展具有指导意义。本文基于 2005—2015 年东北旱作区 85 县市的社会经济数据和土壤属性数据, 应用协同模型和统计参数均方根误差(RMSE)分析了不同时段东北旱作区农业生态系统发展的协同性及农业生产、生活和生态功能之间权衡关系的时空演变特征。结果表明: 1)2005—2015 年, 东北旱作区农业生态系统综合协同度下降 0.12, 整体处于低度协同水平; 区域农业生产功能和生态功能协同度分别下降 0.03、0.45, 而农业生活功能协同度小幅上升。除辽宁省旱作区外, 吉林、黑龙江省旱作区农业生态系统协同度均明显下降, 表明区域农业生态系统的生产功能、生活功能及生态功能之间的协同性向无序方向演变。2)研究区农业生态系统的各功能之间存在时空权衡关系。2005—2010 年, 农业生产-生态、农业生活-生态功能之间的权衡关系整体表现为收益于农业生态功能, 而 2010—2015 年则分别收益于农业生产功能和农业生活功能, 各功能之间权衡关系变化及收益方向的转变是导致东北旱作区农业生态系统整体协同度出现波动的直接原因。3)应用协同函数和统计均方根误差可以定量化描述区域农业生态系统发展的有序程度及系统内部各功能之间的关系, 能够更直接有效地识别引起东北旱作区农业系统变化的因素, 结果可为区域农业生态系统可持续发展提供参考。

关键词: 东北旱作区; 农业生态系统; 农业生产功能; 农业生态功能; 农业生活功能; 协同发展; 权衡分析
中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)06-0892-11

Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China *

ZHUO Zhiqing[1], XING An[1], SUN Zhongxiang[1], HUANG Yuanfang[1**], CAO Meng[1], LI Zhen[1], ZHANG Shiwen[2]

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In the process of transition from traditional agriculture to modern agriculture, the role of agriculture has been changing from single to multiple functions. Comprehensive evaluation of the degree of synergy of agro-ecosystems can guide sustainable regional development. The dry farming area in Northeast China is not only an important grain production base, but also a severe soil erosion area in China. Due to excessive long-term fertilizer application, unreasonable farming systems and management measures,

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)和国家自然科学基金项目(41571217)资助
** 通信作者: 黄元仿, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: yfhuang@cau.edu.cn
卓志清, 主要从事土地利用与景观生态研究。E-mail: zhiqingzhuo@cau.edu.cn
收稿日期: 2017-10-08 接受日期: 2018-01-16
* This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300801) and the National Natural Science Foundation of China (41571217).
** Corresponding author, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn
Received Oct. 8, 2017; accepted Jan. 16, 2018

agro-ecological environments in the dry farming areas have faced enormous pressure. In this research, the grain production and soil data for 85 counties in dry farming areas of Northeast China were used as basic materials, which included socio-economic data from agricultural statistics yearbooks of three northeastern provinces from 2005 to 2015 and soil physic-chemical parameters obtained from soil samples collected in the study area in May 2017. The spatial variations in synergy and trade-offs among agro-production functions, agro-living functions and agro-ecological functions of agro-ecosystem were analyzed based on the synergetic model and root mean square error (RMSE) at different time periods. The aim of this research was to reveal the temporal and spatial evolution characteristics of the three agro-ecosystem functions stated above. The results showed that the degree of the synergy of agro-ecosystem was low for the dry farming areas in Northeast China, dropping by 0.12 for the period 2005–2015. The degrees of synergy of agro-production function and agro-ecological function were dropped by 0.03 and 0.45, respectively. However, the synergy degree of agro-living function increased slightly. Except for drying farming areas in Liaoning Province, the synergy degree of agro-ecosystem decreased significantly in Jilin Province and Heilongjiang Province, indicating that the synergy among three functions of agro-ecosystem was in disorder. There were spatial and temporal trade-off relationships among various functions of agro-ecosystem. For the period 2005–2010, the trade-offs between agro-production function and agro-ecological function, and between agro-living function and agro-ecological function benefited from the ecological function. However, the trade-offs benefited from the production functions and living functions for the period 2010–2015. The main reasons were the fluctuations in the trade-off relationships among three functions of agriculture and changes in the related benefit directions. It was suggested that the synergy degree of agro-ecosystem and the relationships among agro-production function, agro-living function and agro-ecological function were quantitatively describable using the synergetic model and root mean square error. It was an effective way of identifying the structural factors that caused changes in agro-ecosystems by the two methods. The results provided critical references for sustainable development of agro-ecosystem in the dry farming areas of Northeast China.

Keywords: Dry farming areas in Northeast China; Agro-ecosystem; Agricultural production function; Agricultural ecological function; Agricultural living function; Synergetic development; Trade-off analysis

协同学理论由德国物理学家哈肯(Haken)于1989 年提出, 他认为在复杂系统中各子系统之间存在相互干扰和制约的非线性关系, 只有系统内部各子系统之间相互适应、协作、促进, 才能实现复杂系统的协同发展[1]。此外, 他还提出了用以衡量系统发展有序度的协同模型。黄成毅[2]尝试将其应用于成都平原耕地资源系统的协同性分析, 该方法给予了较强的理论支撑, 为资源环境系统研究提供了新的思路。而 Bradford 等[3]从系统内部权衡关系的角度, 提出了应用均方根误差(root mean square error, RMSE)定量化判断系统功能之间权衡关系的方法。国内学者李双成等[4]、Lu 等[5]将该方法纳入地理学的学科框架, 并采用该方法研究了黄土高原人工林生态系统服务功能之间的权衡关系, 为该方法在半自然生态系统中的应用奠定了基础。较自然生态系统而言, 农业生态系统是人类与环境相互作用而形成的复杂系统, 具有社会、经济、生态等多重功能和属性, 系统内部各服务功能类型和数量之间协同关系的时空变化, 对区域人类福祉具有重要影响[6-7]。在特定时空尺度下衡量农业生态系统的协同发展程度, 对区域农业可持续发展具有指导作用[8-10]。

我国作为农业大国, 农业生态系统的稳定性直接影响社会经济发展[11]。近年来随着农业生态文明建设的推进, 农业由单一的生产功能向多功能方向转变, 更加注重农业低碳化、生态化和可持续化, 因而农业生态系统服务功能综合评价成为了区域农业系统研究的热点[12-14]。师帅等[15]和马历等[16]学者分别从低碳、区域人地关系等视角, 结合生态补偿、区域农村经济发展等背景对农业生态系统进行了评价; 贾士靖等[17]和冯宗富等[18]通过分层次建立指标, 应用耦合模型对农业生态系统服务进行了定量分析。此外, 学者们还从全国、省域、县域等不同尺度对农业生态系统服务功能进行了评价[19-21]。胡兵辉等[22]则对不同时序农业生态系统服务功能协同度进行了测算, 结果表明, 我国农业生态系统发展协同度呈现“东高西低”的空间格局。东北旱作区是我国粮食增产规划的关键区域之一, 但农业生产功能和生态功能的结构性矛盾是该区域农业生态系统可持续发展的主要障碍, 系统内部各功能之间的时空权衡关系还不清晰[23]。如何全面评价东北旱作区农业生产、农业生活、农业生态功能之间的协同发展程度, 成为区域农业生态文明建设的重要内容之一。本文基于复杂系统理论, 运用协同学方法构建东北旱作区农业生态系统协同发展评价体系, 通过计算不同时段农业生态系统协同度和权衡程度, 分析各功能时空演变特征, 以期厘清区域农业生态系统有序发展的障碍因素, 为东北旱作区农业结构调整及农业生态系统可持续发展提供依据。

1 研究区概况

研究区包括黑龙江省的 46 个县市、吉林省的 19 个县市和辽宁省的 20 个县市。以 1 km^2 网格离散东北地区土地利用现状图，将网格内旱地占耕地面积 40%以上、地形坡度<5°的区域作为旱作区。研究区年降水量 300~600 mm、年积温 2 000~3 400 ℃。依据降水和土壤类型划分为东部半湿润易旱区和西部半干旱区，东部半湿润易旱区土壤类型以黑土、草甸土为主，有机质含量较高，西部半干旱区主要为黑钙土和碱土。研究区地貌上属于山麓冲洪积平原及台地，耕地破碎度小且耕作条件良好，主要种植玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)等粮食作物和大豆(*Glycine max*)、甜菜(*Beta vulgaris*)等经济作物，是我国北方重要旱作作物种植区及商品粮基地(图 1)。

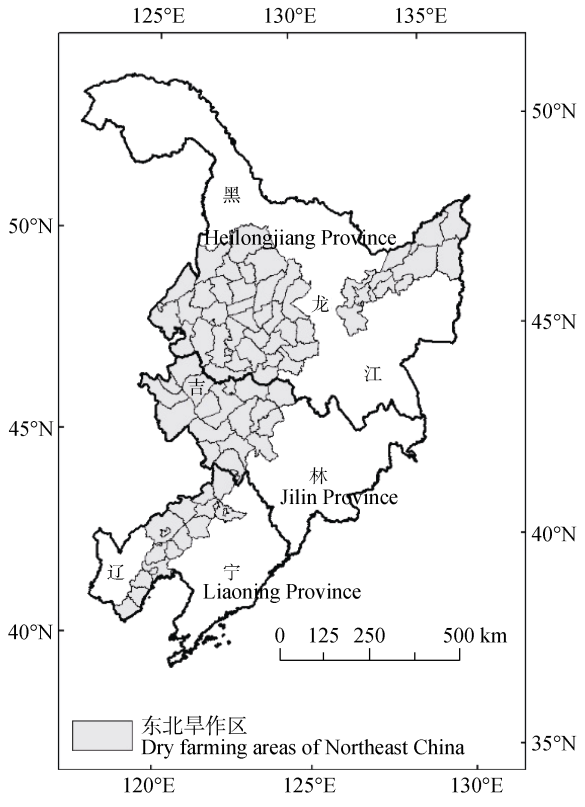

图 1 东北旱作农业区分布图

Fig. 1 Distribution of dry farming areas of Northeast China

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

研究数据包括空间数据、社会经济数据及土壤属性数据。空间数据基于区域遥感影像，依据旱作区划分方法利用 ENVI 提取旱地斑块，并利用 ArcGIS 10.3 软件对行政区划矢量数据和所提取数据进行叠置处理。社会经济数据主要源于东北各省市统计年鉴、《中国农村统计年鉴》、《中国县域统计年鉴》等资料[24-28]。研究区土壤理化性质数据来自 2017 年 5 月采集土壤样品的测试结果，以 15 km×15 km 网格布点与按土壤亚类分层抽样相结合的方法，按照 0~20 cm、20~40 cm 垂直分层取样，共采集 274 个土样。样品风干过筛后测定土壤含水量、容重、有机质含量等指标，并参考姜文来[29]和王思楚等[30]的方法，基于农田土壤各项指标测定结果计算旱作区土壤水源涵养量和有机碳含量。个别县市有效灌溉率及农药使用量数据缺失，用相邻年份的数据代替；为消除因行政区划调整对数据分析造成的影响，本文以 2015 年最新行政区划为准，进行数据统计分析。

2.2 协同评价指标体系

依据科学性、层次性和可比性等原则，在参考同类研究成果的基础上，通过频度分析建立初始指标体系。结合区域农业生态系统的特点，将东北旱作区农业生态系统划分为 3 个子系统，分别为反映区域粮食产出及农业生产投入强度的农业生产子系统、反映区域人口生活和社会经济发展水平的农业生活子系统和反映由农业生产造成区域生态环境变化的农业生态子系统[31-32]。综合考虑数据的可获得性，对不同时段数据进行冗余筛选，最终从农业生产、农业生活和农业生态 3 个方面分层次建立东北旱作农业生态系统协同评价指标体系，指标中粮食类作物主要包括小麦、玉米和大豆(表 1)。

2.3 协同函数

协同是事物间良性互动关系的描述，学者常用“协同函数”来测度复杂系统内部相互影响的强度[33]。本研究假设旱作农业生态系统发展、演变过程中的属性序参量为 $\lambda_j=(\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \lambda_{j3}, \ldots, \lambda_{ji},), j\geqslant 1; i\geqslant 1, \beta_{ji}\leqslant \lambda_{ji}\leqslant \alpha_{ji}$。旱作农业生态系统及各子系统属性序参量 λ_{ji} 的值 $\delta_{ji}(\lambda_{ji})$为:

$$\delta_{ji}(\lambda_{ji})=\begin{cases}(\lambda_{ji}-\beta_{ji})/(\alpha_{ji}-\beta_{ji}) & \text{正向}\\ (\alpha_{ji}-\lambda_{ji})/(\alpha_{ji}-\beta_{ji}) & \text{逆向}\end{cases} \quad (1)$$

式中: β_{ji} 和 α_{ji} 分别为第 j 个属性序参量在第 i 个指标上的下限值和上限值，$\delta_{ji}(\lambda_{ji})\in[0, 1]$越大，表示序参量对系统属性的贡献越大；反之，则越小。正、逆向表示不同指标趋向的标准化方法；决定系统属性特征的所有序参量 λ_{ji} 贡献率的集合就是 λ_j 对系统属性有序程度的总贡献，可将系统属性有序度值

表 1　东北旱作区农业生态系统协同评价指标体系

Table 1　The synergy valuation index system of agro-ecosystem in the dry farming areas of Northeast China

系统 System	子系统 Subsystem	功能 Function	指标 Indicator	序参量解析 Meaning of indicator	趋向 Trend
农业生态系统 Agro-ecosystem	农业生产子系统 Agricultural production subsystem	农业生产功能 Agricultural production function	人均耕地面积 Per capita cultivated area (hm^2·cap.$^{-1}$)	反映现有耕地资源状况 Reflecting the existing cultivated land	正 Positive
			劳动力平均耕地面积 Per agricultural labor cultivated area (hm^2·cap.$^{-1}$)	反映农业发展的经营规模 Reflecting the operation scale of the farming	正 Positive
			粮食单产 Grain yield per hectare (t·hm^{-2})	衡量农业土地的生产能力 Measuring the productive capacity of cultivated land	正 Positive
			单位农机总动力 Total horsepower of farm machinery (MW·hm^{-2})	反映农业机械化生产水平 Reflecting the level of farming mechanization	正 Positive
			化肥产出率 Output ratio of chemical fertilizer (%)	衡量区域化肥利用效率 Measuring the efficiency of chemical fertilizer	正 Positive
			有效灌溉率 Effective irrigated area rate (%)	反映农业生产的水利化条件 Reflecting the irrigation condition of agricultural production	正 Positive
	农业生活子系统 Agricultural living subsystem	农业生活功能 Agricultural living function	区域人均 GDP Per capita GDP (¥·cap.$^{-1}$)	反映区域经济发展水平 Reflecting the level of economic development	正 Positive
			农民人均年纯收入 Per capita annual net income of rural households (¥·cap.$^{-1}$)	衡量农民各项生产活动的收益 Measuring the income of agricultural activities	正 Positive
			人均粮食占有量 Per capita grain possession (kg·cap.$^{-1}$)	表征区域人均粮食保障能力 Reflecting the food security capability	正 Positive
			单位面积农业产值 Agricultural output value per unit area of farmland (¥·hm^{-2})	衡量农业生产的经济能力 Measuring the economic capacity of agricultural production	正 Positive
			农业产值比例 Proportion of agricultural output value (%)	表征区域农业经济的重要性 Reflecting the importance of agriculture economy	正 Positive
			农村劳动力比例 Proportion of rural labor force	反映农村劳动力转移程度 Reflecting rural labor migration	逆 Negative
	农业生态子系统 Agricultural ecological subsystem	农业生态功能 Agricultural ecological function	旱涝保收面积 Area of ensuring stable yields despite drought and flood (hm^2)	表征农业抗灾能力 Reflecting the hazard resistance ability of agriculture	正 Positive
			化肥施用量 Amount of fertilizer applied (t·hm^{-2})	反映化肥施用对土壤的影响 Reflecting the influence of fertilizer application on soil	逆 Negative
			农药施用量 Amount of pesticide applied (kg·hm^{-2})	反映农业生产带来的污染程度 Reflecting the pollution degree caused by agricultural production	逆 Negative
			农膜使用量 Amount of agricultural film (kg·hm^{-2})	反映农膜污染程度 Reflecting the pollution degree caused by agricultural film utilization	逆 Negative
			水源涵养量 Water retention capacity (m^3·hm^{-2})	反映土壤水分保持能力 Reflecting the ability of soil moisture retention	正 Positive
			土壤碳储存 Soil carbon storage (t·a^{-1})	反映农田土壤碳储存能力 Reflecting the carbon storage capacity of farmland soil	正 Positive

$\eta_j(\eta_j)$表示为:

$$\eta_j(\lambda_j)=\sqrt[m]{\prod_{i=1}^{m}\eta_j(\lambda_{ji})}\quad j\geqslant 1;\ i\geqslant 1 \tag{2}$$

同理, 通过序参量贡献值的几何平均数确定子系统 $\theta_{mj}(\eta_{mj})$的有序度函数, $m\geqslant 1$。序参量 $\eta_j(\lambda_j)$越大, 子系统 $\theta_{mj}(\eta_{mj})$的有序度就越高, 反之, 就越低。给定初始时刻 t_0, 子系统的有序度为 $\theta^0_{mj}(\eta_{mj})$, 当系统演变至 t_1 时刻时, 子系统服务的有序度为 $\theta^1_{mj}(\eta_{mj})$。

$$S(C_\lambda)=c\times\sqrt{\left|\prod_{i=1}^{2}\left[\theta^1_{mj}(\eta_{mj})-\theta^0_{mj}(\eta_{mj})\right]\right|} \tag{3}$$

$$c=\frac{\min\left[\theta^1_{mj}(\eta_{mj})-\theta^0_{mj}(\eta_{mj})\right]}{\left|\min\left[\theta^1_{mj}(\eta_{mj})-\theta^0_{mj}(\eta_{mj})\right]\right|} \tag{4}$$

将子系统有序度代入式(3)和(4), 即可计算出子系统协同度的值 $S(C_\lambda)$, 并对各子系统的协同度求几何平均数, 从而得出东北旱作区农业生态系统的综合协同度 $T(S_m)$。参考已有研究成果和上述农业生态系统协同度变化区间及取值特征, 本研究对系统协同度的变化区间划分如下[34](表 2)。

表 2 东北旱作区农业生态系统协同度变化区间及描述

Table 2 The change interval and description of synergy degree of agro-ecosystem in the dry farming areas of Northeast China

分级 Grade	协同度 $T(S_m)$ Synergy degree $T(S_m)$	系统状态 System state	意义 Meaning
Ⅰ	$-1<T(S_m)\leqslant-0.5$	不协同 Very low synergy degree	农业生态系统中各子系统之间的协同状态被打破，农业生态系统向无序发展。The state of synergy among subsystems has been broken seriously, and the agro-ecosystem becomes disordered.
Ⅱ	$-0.5<T(S_m)\leqslant0$	低度协同 Low synergy degree	农业生态系统中的部分子系统之间的协同状态被打破，农业生态系统稳定性出现较大波动。The state of synergy among subsystems has been broken, and the stability of agro-ecosystem has a large fluctuation.
Ⅲ	$0<T(S_m)\leqslant0.5$	较协同 High synergy degree	农业生态系统中各子系统之间处于协同与非协同状态的临界边缘，农业生态系统呈现较小波动。The state of synergy among subsystems is in critical stage, and the stability of agro-ecosystem has a little fluctuation.
Ⅳ	$0.5<T(S_m)\leqslant1$	协同 Very high synergy degree	农业生态系统中各子系统之间处于协同和有序状态，农业生态系统向有序方向发展。All the subsystems are in a better synergy state, and the development of agro-ecosystem realizes sustainable development.

2.4 权衡关系量化

参考Bradford等[3]提出的方法，利用统计参数均方根误差(RMSE)作为旱作农业生态系统多种功能权衡关系的量化指标。以某一对功能的坐标点较1∶1线的相对位置，来说明在某一种情况下哪种功能的收益更多一些；并以坐标点到1∶1线的垂直距离，判断各功能之间权衡度的大小[35]。

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{ES}_i-\overline{\mathrm{ES}}\right)^2} \tag{5}$$

式中：ES_i为第i个农业生态系统功能协同度的标准差，$\overline{\mathrm{ES}}$为农业生态系统中各功能协同度标准差的平均值，n为农业生态系统功能分类数量。

3 结果与分析

3.1 东北旱作区旱作农业生态系统各功能时空变化特征

从空间分布特征来看，2005—2010 年，东北旱作区农业生产功能协同度呈现中间高、南北低的分布格局，高值区(Ⅲ级、Ⅳ级)主要集中于吉林旱作区和黑龙江旱作区中南部，均值达 0.34；而 2010—2015 年农业生产功能协同度低值区(Ⅰ级、Ⅱ级)主要分布于吉林省旱作区和黑龙江旱作区中南部，其中吉林旱作区协同度下降最为明显，最大降幅为 1.10，黑龙江北部县市农业生产功能协同度则有所增加。从时间尺度分析，2010—2015 年，东北旱作区农业生产功能协同度较2005—2010年平均下降0.03，其中降幅较大的是吉林省通榆县和洮南市(图 2A)。总体而言，2005—2015 年东北旱作区农业生产功能协同度下降，区域农业生产功能整体向无序方向发展。

2005—2010 年，东北旱作区农业生活功能协同度低值区(Ⅰ级、Ⅱ级)集中连片分布于各省旱作区境内；2010—2015 年低值区向各省旱作区边缘地带转移，高值区零散分布于部分县市。从时间变化来看，2005—2010 年，Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级协同度县市个数所占比例分别为 9.41%、69.41%、21.18%；而 2010—2015 年Ⅰ级、Ⅱ级县市个数所占比例分别下降为 8.24%、56.47%，Ⅲ级县市个数则上升为 32.94%。区域农业生活功能协同度平均上升 0.1，增幅为 58.82%，整体向有序方向发展，但黑龙江和吉林旱作区的局部县市农业生活功能协同度有所下降(图 2B)。

2005—2010 年，东北旱作区农业生态功能协同度高值区(Ⅲ级、Ⅳ级)在黑龙江、吉林旱作区集中连片分布，低值区(Ⅰ级、Ⅱ级)主要分布于辽宁旱作区；而2010—2015年生态功能协同度高值区集中于辽宁旱作区，低值区则集中连片分布于黑龙江、吉林旱作区，且协同度下降明显。从时间尺度分析，2005—2010 年，Ⅲ级、Ⅳ级协同度县市个数占比分别为 58.82%、22.35%，而 2010—2015 年分别下降为 24.71%、4.7%，Ⅱ级县市所占比例则上升为 61.18%，农业生态功能协同度平均下降 0.45，整体向无序方向发展(图 2C)。

3.2 东北旱作区旱作农业生态系统协同分析

通过计算东北旱作区农业生产、生活和生态功能协同度的几何平均值，得到不同时段内东北旱作区农业生态系统的综合协同度，并依据设定的分类标准进行等级划分(图 3)。结果表明，2005—2010 年，东北旱作区农业生态系统综合协同度为 0.03，处于较协同状态。其中Ⅰ级、Ⅱ级协同度的县市总数所

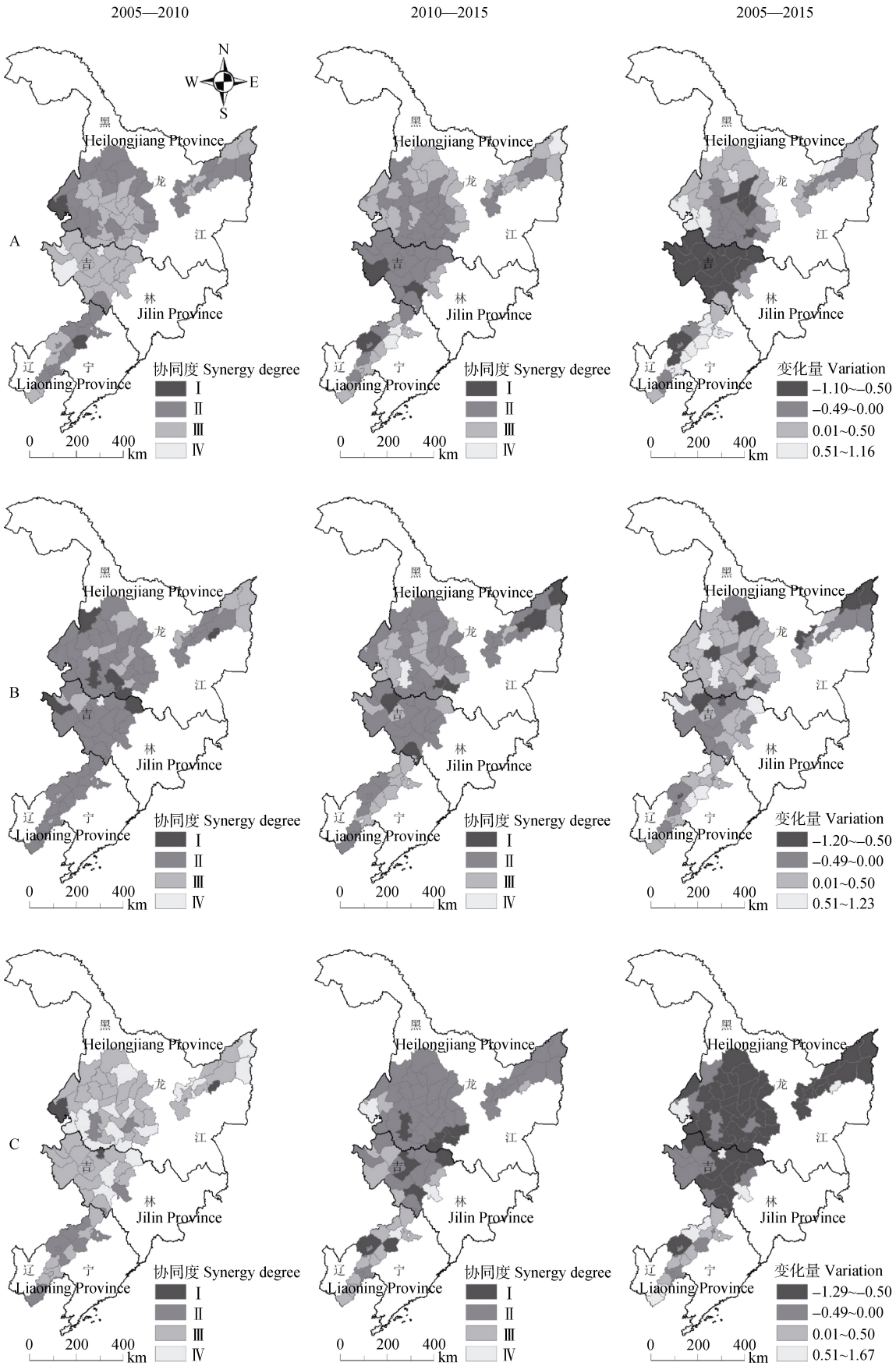

图 2　2005—2015 年东北旱作区农业生态系统生产功能(A)、生活功能(B)和生态功能(C)协同度时空变化

Fig. 2　The temporal and spatial variations of synergy degree of agro-ecosystem from 2005 to 2015 in the dry farming areas of Northeast China (A: agricultural production function; B: agricultural living function; C: agricultural ecological function)

占比为 45.88%; 而 2010—2015 年Ⅰ级、Ⅱ级协同度的县市总数则上升为 70.59%, 区域综合协同度下降为–0.08, 处于低度协同水平, 但各县市降幅不同。空间分布上, 2005—2010 年, 综合协同度高值区集中连片分布于黑龙江、吉林旱作区, 低值区分布于辽宁旱作区大部和黑龙江旱作区局部及边缘地带; 而 2010—2015 年则与之相反, 综合协同度高值区零散分布于黑龙江旱作区北部及辽宁旱作区东南部, 低值区则在黑龙江、吉林旱作区集中连片分布。从综合协同度变化量可知, 2005—2015 年, 东北旱作区农业生态系统综合协同度下降 0.12, 吉林西部、黑龙江的中部、三江平原旱作区部分县市综合协同度下降明显, 其中吉林省西北、西南旱作区综合协同度最大降幅达 40%。相关研究表明, 粮食增产压力与农业资源环境负荷持续加重的矛盾促使农业生产功能与生态功能朝相反方向发展, 农业生产功能与生态功能之间的协同状态被打破, 东北旱作区农业生态系统综合协同度持续下降[36-37]。

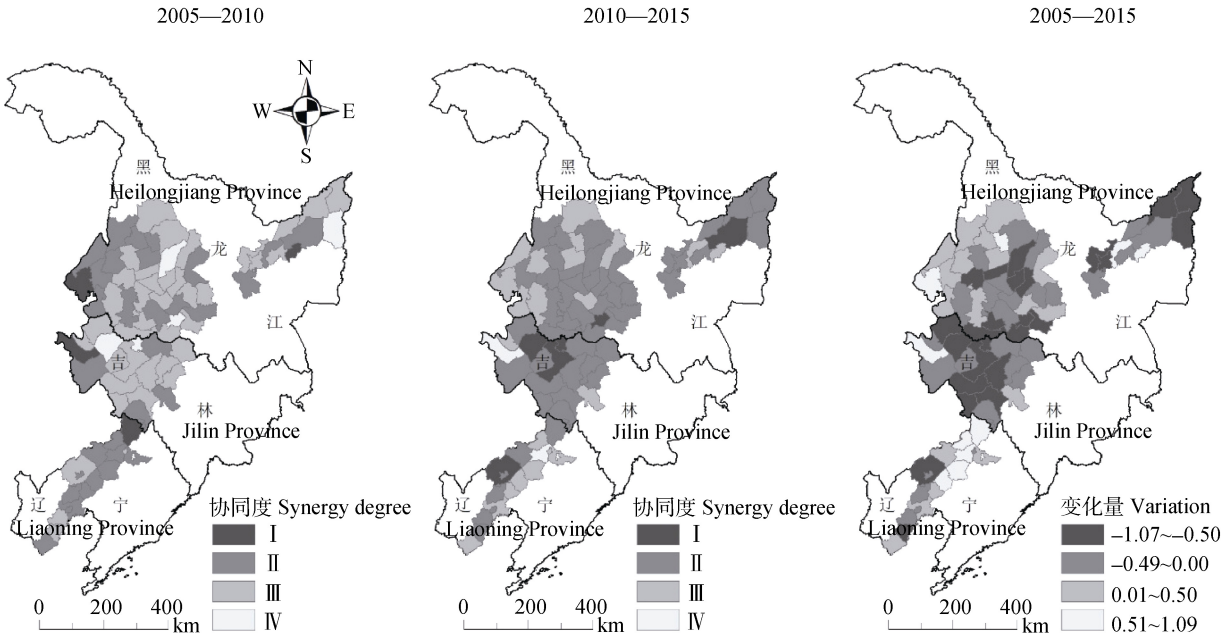

图 3 2005—2015 年东北旱作区农业生态系统综合协同度时空变化

Fig. 3 The temporal and spatial variations of agro-ecosystem overall synergy degree from 2005 to 2015 in the dry farming areas of Northeast China

为了进一步明确不同时段东北各省旱作区农业生态系统协同度演变特征, 本研究对东北旱作区农业生态系统整体及各功能协同度计算结果作了进一步分析。结果表明, 辽宁旱作区各功能协同度在 2005—2010 年表现为农业生态功能>农业生产功能>农业生活功能, 农业生态系统综合协同度处于Ⅱ级水平; 而 2010—2015 年各功能及综合协同度均上升为Ⅲ级水平。吉林旱作区各功能协同度在 2005—2010 年表现为农业生产功能>农业生态功能>农业生活功能, 综合协同度为 0.17, 处于Ⅲ级水平, 而 2010—2015 年则表现为农业生活功能>农业生态功能>农业生产功能, 综合协同度下降 0.37, 处于Ⅱ级水平。2005—2010 年, 黑龙江旱作区农业生态功能协同度为 0.40, 处于Ⅲ级水平, 农业生产功能和生活功能协同度分别为–0.04、–0.17, 均属于Ⅱ级水平; 而 2010—2015 年农业生产功能协同度上升为 0.05, 达到Ⅲ级水平; 农业生态功能和生活功能协同度则分别降为–0.33、–0.11, 均属于Ⅱ级水平。总体而言, 2005—2015 年, 辽宁旱作区农业生态系统综合协同度上升, 农业生产、生态、生活功能协同度在各时段内差异性不显著(P<0.05); 而吉林、黑龙江旱作区农业生态系统综合协同度下降, 且各功能协同度在不同时段上存在明显差异, 整体朝无序方向发展(图 4)。2005—2015 年, 吉林、黑龙江旱作区农业生活功能协同度上升, 而农业生态功能下降, 各功能之间的协同状态被打破, 导致两省旱作区农业生态系统整体协同度下降。

3.3 旱作农业生态系统各功能权衡关系差异

通过计算东北旱作区农业生态系统各功能均方根误差, 量化各功能之间的权衡关系。由图 5 可知, 2005—2010 年, 东北旱作区农业生产-生态功能之间收益于生态功能的县市数量所占比为 81.18%, 可见东北旱作区农业生态系统在二者之间总体收益于农

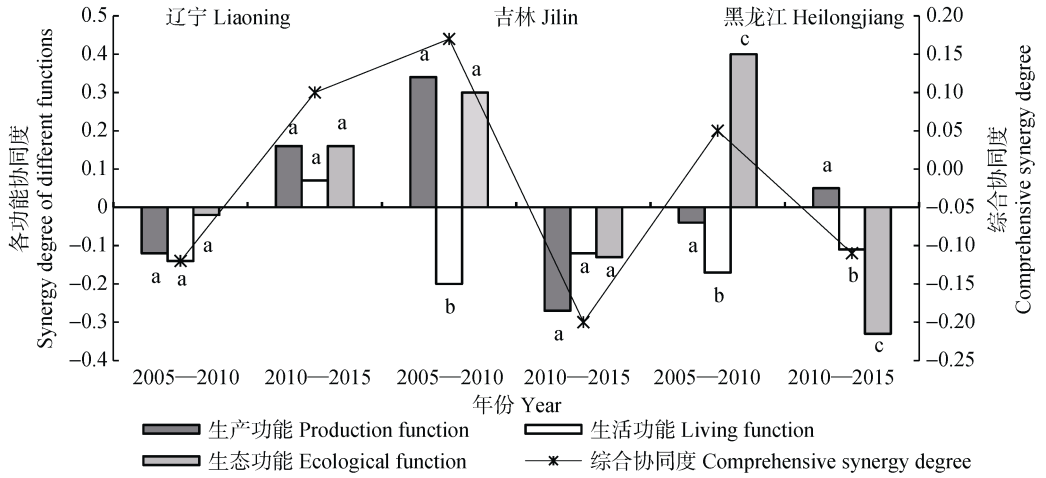

图 4　东北各省旱作区农业生产、生态、生活功能协同度变化

Fig. 4　The variations of synergy degree of three agricultural functions in the dry farming areas of Northeast provinces in China

业生态功能; 而2010—2015年收益于农业生产功能的县市数量占比达69.41%, 说明该阶段区域农业生态系统在二者之间总体收益于生产功能。农业生产功能和生活功能之间的权衡关系在2005—2010年和2010—2015年两个时段内无明显变化。各时段内农业生活功能与生态功能之间的权衡关系明显, 2005—2010年, 区域农业生态系统在二者之间收益于农业生态功能的县市数量所占比为83.53%, 而2010—2015年该比例则下降为28.24%, 整体趋向收益于农业生活功能。该结果从各功能的权衡关系角度解释了东北旱作区农业生态系统协同度的变化特征, 表明农业生产-生态、农业生活-生态功能之间收益方向的转变是东北旱作区农业生态系统协同度出现波动的重要原因。

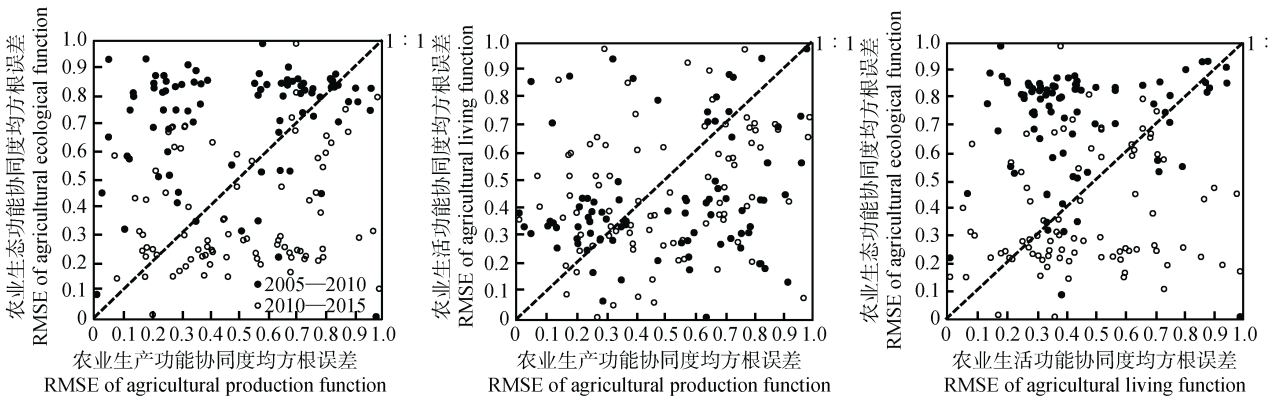

图 5　2005—2010 年和 2010—2015 年东北旱作区农业生态系统各功能权衡关系变化

Fig. 5　The trade-offs among three agricultural functions in the dry farming areas of Northeast China during 2005–2010 and 2010–2015

4　讨论与结论

4.1　讨论

2005—2015 年, 东北旱作区农业生态系统综合协同度明显下降, 农业生产功能、生活功能和生态功能之间的不协调发展是导致其下降的主要原因。相关研究表明, 由于区域人均耕地面积减少、旱地改水田趋势加快以及化肥产出率下降等原因导致各项指标对农业生产功能的贡献率下降, 农业生产功能协同度降低[38]。虽然研究区粮食产量持续增加, 但受到人口增长、粮食价格波动等因素影响, 导致人均粮食占有量和农民人均纯收入增速放缓, 区域农业生活功能协同度虽有所增加, 但增幅较小[39]。研究区是我国重要粮食产区, 近年来在粮食持续增产的同时, 化肥、农药以及农膜的长期过量投入使农业生态环境负荷加重, 区域农业生态功能协同度下降, 导致农业生态环境面临较大压力。

就东北旱作区各省份而言, 吉林、黑龙江旱作区农业生态系统综合协同度明显下降, 可见吉林、黑龙江旱作区在农业供给侧调整方面还具有较大的空间。已有研究表明, 近 30 年吉林、黑龙江旱作区农业种植制度和种植结构发生了重大变化, 小麦播

种面积缩减，玉米种植面积增加，水稻种植呈现北移东扩趋势等因素，均是引起区域农业生态系统协同度出现波动的因素[40-41]。而辽宁旱作区农业生态系统综合协同度上升的主要原因是区域内部分县市受国家粮食作物种植结构调整等政策的积极影响，玉米种植面积大幅调减。调整面积主要种植经济作物和特色作物，替代作物收益良好。伴随着种植结构的调整，农业化肥施用和农药的使用量下降，农业面源污染风险降低，农业生态系统向协同有序方向发展[42-43]。

本文应用统计参数均方根误差判别东北旱作区农业生态系统各功能之间的权衡关系，以某一对功能坐标点的相对位置变化来表征各功能之间的权衡关系，其不仅可以定量化表征各功能间权衡关系的强弱，而且可以直观地描述不同时段内各功能间收益方向的变化。通过对不同时段内各功能之间的权衡分析，结果表明东北旱作区农业生产-生态、生活-生态功能之间权衡关系的变化是影响农业生态系统协同性的主要因素。2005—2015 年，各功能之间的权衡关系发生了明显变化，但由于区域内各县市在农业生产投入、种植结构调整幅度及农业人口等方面有较大区别，导致东北旱作区农业生态系统各功能之间权衡关系的强弱呈现一定差异。由于本文的研究侧重点不同以及受数据获取的限制，在农业生态系统指标选择上与前人研究存在一定差异，最终评价结果可能具有区域局限性[44]。建议后续研究在内容上可分地域强化协同评价体系中指标设置的科学性，结合区域农业种植结构变化，模拟不同土地利用情景下农业生态系统中各功能权衡及协同关系的变化特征；在研究尺度上，可在典型县域或在更大研究尺度上做进一步分析探讨，更好地推动区域农业协调发展研究。

4.2 结论

2005—2015 年，东北旱作区农业生态系统综合协同度平均下降 0.12，由Ⅲ级(较协同)下降为Ⅱ级(低度协同)水平。就各功能而言，农业生产功能和生态功能分别下降 0.03、0.45，而生活功能协同度有较小增幅。2005—2010 年，农业生产功能协同度高值区主要分布于吉林和黑龙江旱作区中部县市，低值区集中于黑龙江旱作区北部边缘及辽宁旱作区大部；而 2010—2015 年农业生产功能高值区集中于辽宁省大部和黑龙江部分县市，低值区则集中连片分布于吉林和黑龙江旱作区大部。从各省份来看，吉林、黑龙江旱作区农业生态系统综合协同度下降，朝无序方向发展，而辽宁旱作区与之相反，综合协同度上升，朝有序方向发展。

2005—2015 年，东北旱作区农业生态系统各功能之间存在时空权衡关系。2005—2010 年，农业生产-生态、农业生活-生态功能之间的权衡关系整体均表现为收益于农业生态功能；2010—2015 年则整体呈现为收益于农业生产功能和农业生活功能，而 2005—2015 年农业生产-生活功能二者之间的权衡关系变化较小。区域农业生产投入、种植结构调整以及农业人口转移等因素的变化推动了各功能之间权衡关系及收益方向的转变，进而导致东北旱作区农业生态系统整体协同度出现波动。

本研究将协同函数和统计参数均方根误差应用于农业生态系统时空协同演变特征的研究中具有可行性，其协同度及权衡程度可以作为定量化衡量区域农业生态系统有序发展及系统内部各功能之间关系的重要指标。通过某一对功能的坐标点距离 1∶1 线的相对位置，分析不同时段旱作区农业生产-生态、农业生产-生活以及农业生活-生态功能之间权衡关系的强弱变化，能够更直接有效地判断引起农业生态系统协同度变化的因素，可为东北旱作区农业生态系统有序发展提供决策依据。

参考文献 References

[1] HAKEN H. Synergetics: An Introduction[M]. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 1983: 120–127

[2] 黄成毅. 成都平原耕地资源系统协同性分析与调控研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011: 60–64
HUANG C Y. Synergetic analysis and adjustment mechanisms study on Chengdu Plain cultivated land resource system[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011: 60–64

[3] BRADFORD J B, D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210–216

[4] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J]. 地理学报, 2011, 66(12): 1618–1630
LI S C, LIU J L, ZHANG C Y, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(12): 1618–1630

[5] LU N, FU B J, JIN T T, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1697–1708

[6] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4–11

[7] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男. 关中盆地生态服务权衡与协同时空差异[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2127–2136
SUN Y J, REN Z Y, ZHAO S N. Spatial-temporal difference analysis of ecosystem service trade-off and synergy in the

Guanzhong Basin of China[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2127–2136

[8] PAULA B M, OSCAR M N. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the Southeast Pampas of Argentina[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 154: 34–43

[9] SCHNEIBEL A, STELLMES M, RÖDER A, et al. Evaluating the trade-off between food and timber resulting from the conversion of Miombo forests to agricultural land in Angola using multi-temporal Landsat data[J]. Science of the Total Environment, 2016, 548/549: 390–401

[10] BOZEC Y M, O'FARRELL S, BRUGGEMANN J H, et al. Tradeoffs between fisheries harvest and the resilience of coral reefs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(16): 4536–4541

[11] 税伟, 陈毅萍, 苏正安, 等. 专业化茶叶种植影响下的农业生态系统服务功能价值评价——以福建省安溪县为例[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3311–3326
SHUI W, CHEN Y P, SU Z A, et al. Agricultural ecosystem services function value evaluation under the influence of specialized tea planting: A case study in Anxi, Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3311–3326

[12] INKELES A. Becoming modern: Individual change in six developing countries[J]. Ethos, 1975, 3(2): 323–342

[13] 龙冬平, 李同昇, 苗园园, 等. 中国农业现代化发展水平空间分异及类型[J]. 地理学报, 2014, 69(2): 213–226
LONG D P, LI T S, MIAO Y Y, et al. The spatial distribution and types of the development level of Chinese agricultural modernization[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(2): 213–226

[14] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近 30 年中国农作物种植结构时空变化分析[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 840–851
LIU Z H, YANG P, WU W B, et, al. Spatio-temporal changes in Chinese crop patterns over the past three decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 840–851

[15] 师帅, 庞金波, 王刚毅. 基于 BP 神经网络的低碳经济下区域农业协调发展研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 392–396
SHI S, PANG J B, WANG G Y. Coordinated development of regional agriculture in a framework of low carbon economy based on BP neural network[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(4): 392–396

[16] 马历, 唐宏, 尹奇, 等. 四川农村人口土地和经济系统的协调发展及时空演变[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 136–146
MA L, TANG H, YIN Q, et al. Coordinated development and its' spatio-temporal evolution of rural population, land and economy system in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 136–146

[17] 贾士靖, 刘银仓, 邢明军. 基于耦合模型的区域农业生态环境与经济协调发展研究[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(5): 573–575
JIA S J, LIU Y C, XING M J. On coordination development of agricultural ecological-environment and economy in different regions based on coupling degree model[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(5): 573–575

[18] 冯宗富, 马丁丑. 都市农业与生态环境协调发展关系研究——以兰州市为例[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 77–82
FENG Z F, MA D C. Analysis of the relationship between urban agriculture and ecological environment coordinated development: Taking Lanzhou City as an example[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 77–82

[19] 辛岭, 王济民. 我国县域农业现代化发展水平评价——基于全国 1980 个县的实证分析[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 673–678
XIN L, WANG J M. Evaluation on agricultural modernization level of China's counties — based on empirical analysis of nationwide 1980 counties[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(6): 673–678

[20] 任志远, 徐茜, 杨忍. 基于耦合模型的陕西省农业生态环境与经济协调发展研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 14–19
REN Z Y, XU Q, YANG R. On coordination development of agricultural ecological-environment and economy in Shaanxi Province based on coupling degree model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(12): 14–19

[21] 叶得明, 杨婕妤. 石羊河流域农业经济和生态环境协调发展研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 76–83
YE D M, YANG J Y. Coordinated development between agricultural economy and ecological environment in Shiyang River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 76–83

[22] 胡兵辉, 廖允成, 尚爱军, 等. 毛乌素沙地农业生态系统 SEREn 协调发展的时序测度[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1200–1211
HU B H, LIAO Y C, SHANG A J, et al. Estimation on harmonious development in SEREn system of agroecosystem in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1200–1211

[23] 孙广友, 王海霞. 松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究、灌区格局与风险控制[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 407–413
SUN G Y, WANG H X. Large scale development to saline-alkali soil and risk control for the Songnen Plain[J]. Resources Science, 2016, 38(3): 407–413

[24] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴(2006—2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006—2016
Department of Rural Social and Economic Investigation of the National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook (2006–2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006–2016

[25] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴(2000—2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000—2016
Department of Rural Social and Economic Investigation of the National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook (2006–2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000–2016

[26] 辽宁省统计局. 辽宁统计年鉴(1983—2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1983—2016
Bureau of Statistics of Liaoning Province. Liaoning Statistical Yearbook (1983–2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1983–2016

[27] 吉林省统计局, 国家统计局吉林调查总队. 吉林统计年鉴

(1984—2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1984—2016
Statistical Bureau of Jilin Province, Jilin Survey Team of the National Bureau of Statistics. Jilin Statistical Yearbook (1984–2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1984–2016

[28] 黑龙江省统计局, 国家统计局黑龙江调查总队. 黑龙江统计年鉴(1987—2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1987—2015
Bureau of statistics of Heilongjiang Province, Heilongjiang Survey Team of the National Bureau of Statistics. Heilongjiang Statistical Yearbook (1987–2015)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1987–2015

[29] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 34–36
JIANG W L. Theory and method to accounting value of forest water conservative[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 34–36

[30] 王思楚, 刘茹, 王志强, 等. 东北典型黑土区表层土壤有机碳储量及适宜样本容量[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 221–226
WANG S C, LIU R, WANG Z Q, et al. Topsoil organic carbon storage and optimum sample size in typical black soil area of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 221–226

[31] 许明军, 杨子生. 西南山区资源环境承载力评价及协调发展分析——以云南省德宏州为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1726–1738
XU M J, YANG Z S. The evaluation and analysis of coordinated development on resources and environment carrying capacity in southwestern mountainous area of China: A case in Dehong Dai-Jingpo Autonomous Prefecture, Yunnan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1726–1738

[32] 田旭, 王善高. 中国粮食生产环境效率及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2106–2116
TIAN X, WANG S G. Environmental efficiency and its determinants regarding China's grain production[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2106–2116

[33] 王艳飞, 刘彦随, 李裕瑞. 环渤海地区城镇化与农村协调发展的时空特征[J]. 地理研究, 2015, 34(1): 122–130
WANG Y F, LIU Y S, LI Y R. Spatial-temporal patterns of urbanization and rural development and their coordination in Bohai Rim region[J]. Geographical Research, 2015, 34(1): 122–130

[34] HUANG C Y, DENG L J, FANG C G, et al. Synergetic analysis and assessment study on vital area of Chengdu Plain farmland resource system[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem (GRMSE). Wuhan: Springer, 2016: 107–115

[35] FU B J, WANG S, SU C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(1): 4–10

[36] 封志明, 孙通, 杨艳昭. 2003—2013 年中国粮食增产格局及其贡献因素研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 895–907
FENG Z M, SUN T, YANG Y Z. Study on the spatiotemporal patterns and contribution factors of China's grain output increase during 2003–2013[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(6): 895–907

[37] 欧阳玲, 王宗明, 贾明明, 等. 基于遥感的吉林省中西部耕地数量和质量空间格局变化分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 234–242
OUYANG L, WANG Z M, JIA M M, et al. Spatial pattern analysis on quantity and quality of cultivated land in mid-west Jilin province based on remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 234–242

[38] 辛岭, 蒋和平, 刘学瑜. 中国县域农业现代化评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 87–94
XIN L, JIANG H P, LIU X Y. The evaluation of county town's agricultural modernization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(20): 87–94

[39] 刘时东, 陈印军, 方琳娜. 东北三省粮食生产区域变化及影响因素分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(11): 44–49
LIU S D, CHEN Y J, FANG L N. The change of grain production regional and its influencing factors in Three Northeast Provinces[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(11): 44–49

[40] 马海超, 刘吉平. 吉林省西部土地利用格局变化图谱与驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 193–199
MA H C, LIU J P. Analysis on TUPU and driving force of land use pattern change in the western Jilin Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 193–199

[41] LI Z P, LONG Y Q, TANG P Q, et al. Spatio-temporal changes in rice area at the northern limits of the rice cropping system in China from 1984 to 2013[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2): 360–367

[42] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1247–1253
LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1247–1253

[43] 陈玉洁, 张平宇, 刘世薇, 等. 东北西部粮食生产时空格局变化及优化布局研究[J]. 地理科学, 2016, 36(9): 1397–1407
CHEN Y J, ZHANG P Y, LIU S W, et al. The spatio-temporal pattern change and optimum layout of grain production in the West of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(9): 1397–1407

[44] 丁志伟, 张改素, 王发曾, 等. 中国工业化、城镇化、农业现代化、信息化、绿色化"五化"协调定量评价的进展与反思[J]. 地理科学进展, 2016, 35(1): 4–13
DING Z W, ZHANG G S, WANG F Z, et al. Progress on quantitative evaluation of coordinated development of industrialization, urbanization, agricultural modernization, informationization, and greenization in China and reflections[J]. Progress in Geography, 2016, 35(1): 4–13