

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.011; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.011.

刘欢欢, 魏宇航, 马理辉, 等. 基于水土保持的长汀县农业生态经济耦合系统演变过程[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 286-294.

Liu Huanhuan, Wei Yuhang, Ma Lihui, et al. Evolution process of agricultural eco-economic coupling system in Changting County based on soil and water conservation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 286-294.

基于水土保持的长汀县农业生态经济耦合系统演变过程

刘欢欢^{1,2,3}, 魏宇航⁴, 马理辉^{1,2,4}, 王继军^{1,2,4}, 骆 汉^{1,2,4}

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]揭示水土流失治理下长汀县农业生态系统和经济系统的耦合规律及演变过程, 以期为进一步促进长汀县水土保持高质量发展提供科学依据。[方法]利用 1992—2022 年长汀县统计年鉴及土地覆盖栅格数据, 依据农业生态经济系统演变过程构建了该区域农业生态经济系统的评价指标体系, 运用耦合度模型对长汀县农业生态经济耦合系统的演变过程进行了研究。[结果](1) 1992—2022 年长汀县农业生态系统和农业经济系统综合指数整体上均呈上升趋势; (2) 1992—2022 年长汀县农业生态经济系统耦合度在 $10^{\circ} \sim 270^{\circ}$, 系统从衰退耦合过渡到不协调耦合, 再到协调耦合、不协调耦合, 整个耦合状态演变呈 S 型曲线; (3) 1992—2022 年长汀县农业生态经济耦合系统先后经历再生发展、极限发展、协调发展、极限发展的演变阶段。其中 1992—2000 年处于再生发展阶段, 2001—2002 年、2017—2022 年处于极限发展阶段, 2003—2016 年处于协调发展阶段。[结论]根据耦合度发展趋势可以看出, 通过优化农业生态和经济措施, 系统可以突破不协调耦合朝着协调方向发展, 甚至最终进入到良好或优越的协调发展演变阶段。

关键词: 生态经济学; 农业生态经济耦合系统; 耦合度模型; 长汀县

中图分类号: F062.2; S181; X24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0286-09

Evolution process of agricultural eco-economic coupling system in Changting County based on soil and water conservation

Liu Huanhuan^{1,2,3}, Wei Yuhang⁴, Ma Lihui^{1,2,4}, Wang Jijun^{1,2,4}, Luo Han^{1,2,4}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Soil

and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the coupling pattern and evolution process of agricultural ecosystem and economic system in Changting County under soil erosion control, and to provide scientific basis for further promoting the high-quality development of soil and water conservation in Changting County. [Methods] Based on the statistical yearbook and land cover raster data of Changting County from 1992 to 2022, the evaluation index system of agricultural eco-economic system in this region was constructed according to the evolution process of agricultural eco-economic system, and the coupling model was used to study the evolution process of agricultural eco-economic coupling system in Changting County. [Results] (1) From 1992 to 2022, the comprehensive index of agricultural ecosystem and

收稿日期: 2024-05-31

修回日期: 2024-07-03

接受日期: 2024-07-15

资助项目: 2024 年度福建省级水土流失综合治理科技项目(FJST-CT-001); 2022 年度福建省水土流失综合治理项目水土保持科技推广项目; 西北农林科技大学科技创新资助项目“农业生态经济系统耦合过程研究”

第一作者: 刘欢欢(1999—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源管理。E-mail: liuhuanhuan22@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 马理辉(1979—), 男, 福建长汀人, 博士, 副研究员, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: gjzmlh@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

agricultural economic system in Changting County showed an overall upward trend. (2) From 1992 to 2022, the coupling degree of agricultural eco-economic system in Changting County was between 10° and 270° . The system transitioned from recession coupling to uncoordinated coupling, and then to the coordinated coupling and uncoordinated coupling. The whole coupling state evolved into an S-shaped curve. (3) From 1992 to 2022, the agro-ecological economic coupling system of Changting County experienced the evolution stages of regeneration development, limit development, coordinated development and limit development. Among them, 1992—2000 was in the stage of regenerative development, 2001—2002 and 2017—2022 were in the stage of extreme development, and 2003—2016 was in the stage of coordinated development. [Conclusion] According to the development trend of coupling degree, it can be seen that by optimizing agricultural ecological and economic measures, the system can break through the uncoordinated coupling and develop in a coordinated direction, and even eventually reach a good or superior stage of coordinated development and evolution.

Keywords: ecological economics; agricultural eco-economic coupling system; coupling model; Changting County

农业是国家的经济基础和民生的重要支柱,我国长期以来始终将农业发展放在优先位置。然而,随着农业经济的迅速发展,农业生态环境问题也逐渐凸显。因此,推动农业生态经济系统的可持续发展势在必行^[1]。农业生态经济系统是农业生态系统与农业经济系统相互作用所形成的复杂系统^[2],而农业生态环境是农业经济发展的物质和基础,农业经济发展又为其提供坚实保障^[3]。优化农业生态经济耦合系统是解决农业经济与生态环境之间矛盾的重要途径,这有助于促进区域农业的协调发展,同时实现资源的有效利用^[4]。研究农业生态经济系统耦合过程能够深入剖析农业生态经济系统间的相互作用及演变规律,对于实现农业产业与资源融合,构建持续高效的农业生态经济链条具有重要价值^[5]。

福建省长汀县曾是我国南方红壤区水土流失最为严重的县域之一。水土流失使得长汀县土壤质量不断下降,河流湖泊淤积,严重影响水利设施的使用^[6],同时导致人民生活贫苦、生产条件恶化,阻碍社会和经济的可持续发展^[7]。因此,治理水土流失成为长汀县的首要任务。改革开放后,福建省积极开展了长汀县生态治理工作。2012年1月8日,习近平同志对长汀县水土流失治理做出批示:“长汀县水土流失治理正处在一个十分重要的节点上,进则全胜,不进则退,应进一步加大支持力度。要总结长汀经验,推动全国水土流失治理工作。”在“进则全胜”思想指导下,长汀县持续弘扬“滴水穿石、人一我十”的精神,形成了“以人为本、持之以恒”的水土流失治理和生态文明建设的“长汀经验”,取得了显著的生态、经济和社会效益^[8]。到2022年,长汀县水土流失率从31.5%下降到6.57%,低于全省平均水平,森林覆盖率从58.4%提高到88.3%,实现了从贫瘠荒山到绿水

青山,再到金山银山的历史性转变。

经过近几十年的水土流失治理,长汀县农业生态经济系统运动轨迹发生了改变。农业生态系统与农业经济系统在不同水土流失治理期的关系、产业发展与农业资源是否一致以及按照目前发展趋势农业生态经济耦合系统能否协调发展等问题尚未明确。因此,有必要深入探讨农业生态经济系统的耦合过程,准确把握农业生态系统和经济系统的耦合规律和演变过程。

通过研究长汀县农业生态经济系统的耦合过程,从理论上分析其经历的演变阶段。各个演变阶段的耦合程度影响和制约着长汀县农业生态经济系统的发展,有助于进一步揭示“进则全胜”前后不同阶段水土流失治理取得成效的内在机制,从而为新时代背景下长汀县实施水土保持和生态经济高质量发展提供科学参考。同时,对指导水土流失区生态环境建设,加快区域经济发展有重要意义。

目前针对长汀县水土流失治理的大量研究主要集中在长汀县近几十年水土流失治理取得的成效以及治理经验,而对取得这一成效过程中农业生态系统与经济系统耦合协调性演变过程研究较少^[9]。农业生态经济耦合系统演变过程的研究区域主要集中在黄土高原^[10-12]、黄河流域^[5,13]、长江上游等^[14-15]生态脆弱区以及退耕还林还草项目区^[16-17],对南方丘陵红壤区的研究还远远落后于这些地区^[18]。因此,本文以南方红壤区典型代表区域福建省长汀县为研究对象,利用耦合度模型,对该县近30年(1992—2022年)农业生态经济耦合系统演变过程进行分析,以期对长汀县水土保持高质量发展及南方红壤区农业生态经济系统可持续发展提供参考。

1 研究区概况

长汀县隶属福建省龙岩市,地处闽西山区,北纬 25°18′40″—26°02′05″,东经 116°00′45″—116°39′20″,南面与广东相邻,西面与江西相接,总面积约为 3 000 km²,包含 18 个乡镇。该县地势起伏较大,山地面积约占总面积的 70%,属亚热带季风性气候,年均温在 17.5~18.8℃,年降水总量为 1 613.5 mm。区域主要土壤类型为红壤,成土母岩以花岗岩为主,母质疏松,风化作用十分强烈,易受侵蚀。该县森林覆盖率较高,属于亚热带常绿阔叶林区,但林分结构简单,生长状况不佳,林下植被稀疏。该县的地形特征、成壤条件、植被特点和气候环境等使得该地区资源生态环境较为脆弱,再加上近百年来人为活动造成的破坏,其水土流失问题日益严重。1983 年,福建省将长汀县列为水土流失治理的试点,经过几十年的治理,取得了显著的生态、经济和社会效益。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用数据来源于《长汀县统计年鉴(1992—2022 年)》《长汀林业志》以及武汉大学杨杰和黄昕教授发布的 1990—2022 年精度为 30 m×30 m 的中国年度土地覆盖栅格数据(<https://zenodo.org/record/8176941>)。其中 1999 年、2000 年、2001 年的人均果林地面积缺失值通过 Stata 软件插值得出。同时,2023 年 7 月在长汀县开展农户问卷调查,通过随机抽样法对长汀县 12 个村进行实地访谈,共收集 200 份问卷,其中有效问卷 193 份,通过调查了解长汀县农村在近几十年水土流失治理以来的家庭人员结构变化、土地数量、土地利用变化和农业生产状况等。统计数据和栅格数据以全县为单元,从宏观层面上反映长汀县的整体情况,问卷调查从微观层面上把握长汀县的具体情况,这三者数据具有一定的可比性,为本研究提供一个全面的视角了解长汀县的农业生态经济系统状况。

2.2 指标选择

在指标选择科学性、系统性和可行性等的原则下^[19],根据长汀县自然地理、农村经济发展和黄土高原关于农业生态经济系统耦合发展的研究基础^[5,14,20],从生态条件、生态资源、产业态势和经济效益 4 个方面选取能够代表当地农业生态及经济发展水平的指标,构建长汀县农业生态经济耦合系统的评价指标体系(表 1)。

表 1 长汀县农业生态经济耦合系统综合评价
指标体系及权重

Table 1 Evaluation index system and weight of agricultural eco-economic coupling system in Changting County

子系统	一级 指标	权重	二级 指标	权重	系统中的 权重
生态系统	生态条件	0.4	人口密度	0.40	0.160
			年降雨量	0.30	0.120
			水土保持率	0.30	0.120
	生态资源	0.6	人均耕地	0.30	0.180
			人均果林地	0.26	0.156
			农林牧土地利用结构	0.44	0.264
经济系统	产业态势	0.4	工副业贡献率	0.20	0.080
			第一产业占比	0.26	0.104
	经济效益	0.6	产业链与资源量相关度	0.54	0.216
			农产品商品率	0.37	0.222
			人均纯收入	0.39	0.234
			农业产投比	0.24	0.144

注:(1) 产业链与资源量相关度这一指标主要反映依赖于区域资源下的产业发展情况,即农业产业与资源量的相一致性关系,该计算方法相对复杂,使用 9 个标度并通过专家判定进行打分。广种、垦荒(1 分);广种(2 分);单一种粮(3 分);农果、农牧发芽(4 分);农果发展、林牧萌芽(5 分);主导产业培育(6 分);相关产业形成(7 分);产业间形成有机统一关系(8 分);生态经济系统良性循环(9 分)^[22];(2) 农林牧土地利用结构这一指标主要反映资源配置情况,目前尚无法直接量化,由于林牧面积越大,生态环境相对越好,从功能上将其划分为两类,计算农耕地和林牧地面积比^[22]。

2.3 指标权重确定

本研究利用层次分析法对长汀县农业生态经济耦合系统中各指标进行权重确定,此方法可以将主观判断转化为量化数据,实现决策过程中定性和定量因素的结合,把复杂系统的决策思维进行层次化,使之更加有条理性和科学性^[21]。

2.3.1 建立层次结构模型 整理问题所包括的各要素后,将所有要素进行分组,每一组作为一个层次,并将它们按照最高层、中间层、指标层的次序排列,建立层次结构模型。

2.3.2 构造判断矩阵 判断矩阵元素的取值采用 1—9 的标度方法,表示本层次中元素对于上一层次中某元素的重要性程度。

2.3.3 层次单排序及其一致性检验 一般情况下判断矩阵不具有完全一致性,需计算一致性指标 CI 作为检验。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{1}$$

式中: λ_{\max} 为矩阵最大特征根; n 为矩阵阶数。

当 CI=0 时,判断矩阵具有完全一致性;反之,CI

愈大,判断矩阵的一致性越差。

为了检验判断矩阵是否具有-致性,需将 CI 与平均随机-致性指标 RI 进行比较。即随机-致性比例,记为 CR。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中:CI 为判断矩阵-致性指标;RI 为平均随机-致性指标。

一般地,当 $CR < 0.10$ 时,判断矩阵具有一致性。否则,需继续调整判断矩阵。

2.3.4 层次总排序及其-致性检验 利用同一层次中所有层次单排序结果,计算针对上一层次的本层次所有元素的重要性权重值。与层次单排序类似,这一过程也需要进行-致性检验。指标权重计算结果见表 1。

2.4 耦合度模型及计算方法

“耦合度模型”通过定量描述系统耦合程度随时间的动态变化,分析两个子系统的耦合关系和农业生态经济系统耦合的阶段特征,由此来探究农业生态经济耦合系统演变过程^[15]。本研究运用系统论中的系统演化思想来建立农业生态经济系统的耦合度模型^[5]。

农业生态系统评价指数(el)和农业经济系统评价指数(en)可以用函数表示为^[23]:

$$el = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

式中:el 为农业生态系统评价指数值; a_i 为农业生态系统中各系统要素的权重; x_i 为农业生态系统的各系统要素。

$$en = \sum_{j=1}^m b_j y_j \quad (j=1,2,3,\dots,m) \quad (4)$$

式中:en 为农业经济系统评价指数值; b_j 为农业经济系统中各系统要素的权重; y_j 为农业经济系统的各系统要素。

农业生态经济系统评价指数可表示为时间 t 的函数:

$$el = f_1(t) \quad (t=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

式中:el 为农业生态系统评价指数值; $f_1(t)$ 为农业生态系统评价指数值随时间 t 变化的函数。

$$en = f_2(t) \quad (t=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

式中:en 为农业经济系统评价指数值; $f_2(t)$ 为农业经济系统评价指数值随时间 t 变化的函数。

将农业生态系统与农业经济系统耦合成一个复合系统,按照贝塔兰菲的一般系统理论^[24],将其函数 f_1, f_2 对时间 t 求导,得到农业生态经济复合系统演化方程如下为:

$$V_{el} = \frac{del}{dt} \quad (7)$$

式中: V_{el} 为农业生态系统随时间 t 的演变速度;el 为农业生态系统评价指数值。

$$V_{en} = \frac{den}{dt} \quad (8)$$

式中: V_{en} 为农业经济系统随时间 t 的演变速度;en 为农业经济系统评价指数值。

由于农业生态经济系统发展的可持续性和多阶段性,从而满足 S 型发展机制,由此可以分别以 V_{el} , V_{en} 为横、纵坐标建立平面直角坐标系。由于经济系统演化速度受外界条件影响较大,相对于生态系统更加敏感,因此整个农业生态经济系统的演变速度变化在坐标系中形成类似椭圆轨迹(图 1)。以 V_{el} 和 V_{en} 为变量建立平面直角坐标系, θ 角度表示农业生态系统和经济系统的耦合度,计算公式为:

$$\theta = \arctan \frac{V_{en}}{V_{el}} \quad (9)$$

式中: V_{en} 为农业经济系统随时间 t 的演变速度; V_{el} 为农业生态系统随时间 t 的演变速度。

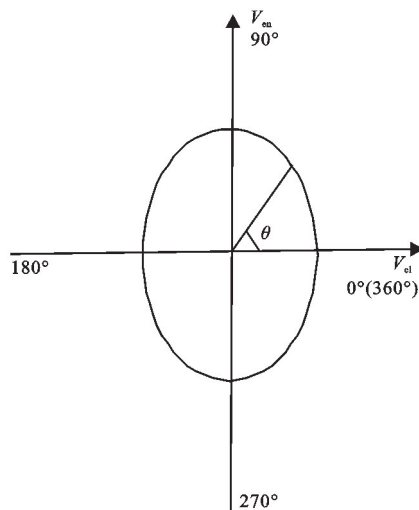


图 1 农业生态系统与农业经济系统耦合示意图

Fig. 1 Coupling diagram of agro-ecological system and agro-economic system

3 结果与分析

3.1 长汀县农业生态经济耦合系统综合指数

根据公式(3)—(4)计算结果显示(图 2),1992—2022 年长汀县农业生态系统和经济系统综合指数整体呈现上升趋势。在 1992—2007 年,两个子系统综合指数相差较小,在 0.2~0.4 波动。改革开放后长汀县实施水土流失治理,在 1992—2007 年还处于前期摸索阶段,只是简单采取生物措施,单一植树种草,未将坡面工程和植物措施相结合,因而未取得显著生态成效,同时农业经济也相应并未得到很大改善。2007—2022 年,生态系统综合指数上升后不断波动之后开始下降,下降后又有上升的趋势,经济系统则

一直保持稳步上升。2002 年以来长汀县对生态方面的保护和生态治理力度加大,采取等高草灌带造林、“老头松施肥改造”、陡坡地“小穴播草”等有效技术措施^[25],经过几年时间治理,在 2007 年取得显著成效,这形成乔灌草复合群落结构,不仅有效控制水土流失使得生态系统状况不断得到改善,而且影响经济系统综合指数也相应增长较快。近几年随着城市化和工业化的发展,农村劳动力向城市转移的趋势增强,这导致土地闲置,2019 年农林牧等各类土地利用面积明显减少,土地生产力下降;再加上长期以来过度施用化肥和农药导致土壤和水体污染,对生态系统造成严重影响,农业生态系统综合指数下降。

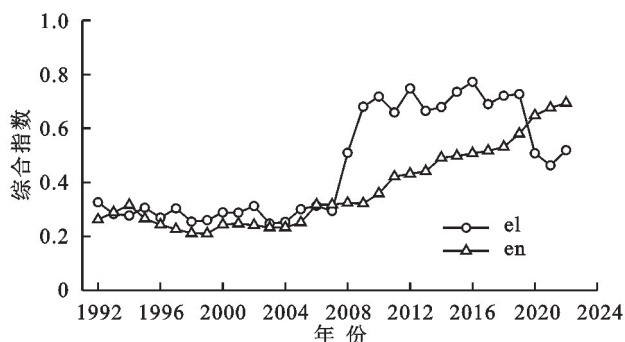


图 2 1992—2022 年长汀县农业生态系统与农业经济系统综合指数值

Fig. 2 Comprehensive index value of agro-ecological system and agro-economic system in Changting County from 1992 to 2022

3.2 长汀县农业生态经济耦合系统的耦合度

利用公式(5)–(6)对两个子系统的综合指数曲线进行非线性拟合,并根据公式(7)–(8)计算其演变速度,公式如下:

$$V_{el} = \frac{del}{dt} = 4.0079 \times 10^{-7} t^5 - 3.2011 \times 10^{-5} t^4 + 8.9078 \times 10^{-4} t^3 - 0.0104 t^2 + 0.0508 t - 0.0844 \quad (R^2 = 0.986) \quad (10)$$

式中: V_{el} 为农业生态系统演变速度; el 为农业生态系统评价指数值。

$$V_{en} = \frac{den}{dt} = -9.1610 \times 10^{-8} t^5 + 9.3469 \times 10^{-6} t^4 - 3.4046 \times 10^{-4} t^3 + 0.0053 t^2 - 0.0313 t + 0.0420 \quad (R^2 = 0.993) \quad (11)$$

式中: V_{en} 为农业经济系统演变速度; en 为农业经济系统评价指数值。

上式中 t 的取值范围均为 1~31,对应年份分别为 1992—2022 年。

根据公式(9)–(11)计算的农业生态经济系统耦合度结果显示(图 3),1992—2022 年,长汀县农业生态经济系统的耦合度在 $10^\circ \sim 270^\circ$,1998 年耦合度开

始下降,先急剧下降后缓慢下降,下降至 2014 年时开始逐渐上升。整个演变过程呈 S 型曲线,主要处于第一、二、三象限,经历了再生发展、极限发展、协调发展、极限发展循环往复的演变阶段。

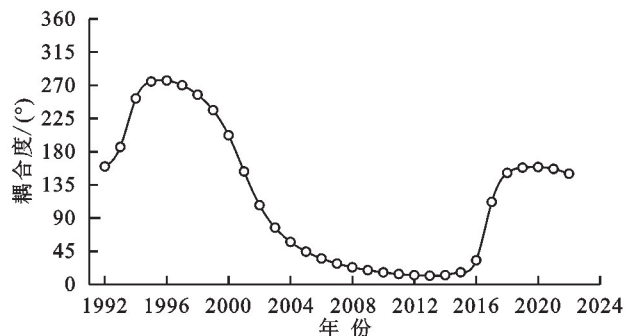


图 3 1992—2022 年长汀县农业生态系统与农业经济系统的耦合度

Fig. 3 Coupling degree of agro-ecological system and agro-economic system in Changting County from 1992 to 2022

3.3 长汀县农业生态经济耦合系统演变过程

3.3.1 农业生态经济系统耦合状态与演变阶段划分
由已有研究结果^[5,10-11],可知农业生态经济系统耦合状态和演变阶段划分类型见表 2。

表 2 农业生态经济系统耦合状态和演变阶段划分类型

Table 2 Classification of system evolution state and coupling stage

耦合度/ $^\circ$	耦合状态	演变阶段
0~90	协调耦合	协调发展
90~180	不协调耦合	极限发展
180~270	衰退耦合	再生发展
270~360	恢复耦合	恢复发展

(1) 当 $90^\circ \geq \theta > 0^\circ$ 时,系统处于协调发展阶段。农业经济系统的发展潜力和生态系统的供给能力相互协调和促进。当 $\theta = 45^\circ$ 时,农业经济系统与生态系统的协调性最佳,且系统的协调耦合性沿 45° 方向逐渐减小。

(2) 当 $180^\circ \geq \theta > 90^\circ$ 时,系统处于极限发展阶段。随着农业经济的迅速增长,人类持续剥夺生态资源,生态系统供给能力不断降低,生态环境遭受严重的破坏。在这个过程中,人类为了经济建设而对生态建设的重视逐渐忽视,这导致经济建设与生态环境之间的矛盾加剧,使生态经济系统经历不可持续的发展过程^[11]。

(3) 当 $270^\circ \geq \theta > 180^\circ$ 时,系统处于再生发展阶段。农业经济系统的发展与生态系统密切相关,农业经济发展速度逐渐降低,生态环境逐渐恶化。随着耦合程度增加,生态系统供给能力急剧下降,经济发展受到限制^[5]。

(4) 当 $360^\circ \geq \theta > 270^\circ$ 时,系统处于恢复发展阶段。在这个时期,降低经济系统发展速度,使得生态系统得以重建,这个阶段对生态系统的影响很小,经济发展不再受生态系统的限制和约束^[11]。

3.3.2 长汀县农业生态经济耦合系统演变阶段 长汀县在历经水土流失治理过程中,农业生态经济耦合系统经历了3个演变阶段。其中1992—2000年处于再生发展阶段;2003—2016年处于协调发展阶段;2001—2002年、2017—2022年处于极限发展阶段。

(1) 再生发展阶段。1992—2000年长汀县农业生态经济耦合系统的耦合度为 $160.04^\circ \sim 276.58^\circ$,处于第三象限(表3),对照表2,这个时期处于衰退耦合状态,农业生态系统与农业经济系统处于再生发展的演变阶段。该阶段特征为农业经济系统依赖农业生态系统发展,随着耦合度的减小,农业生态系统恶化,农业经济系统发展萎缩^[5]。这一演变阶段中,1992—1996年的耦合度不断增加,1997—2000年耦合度不断减少。1992—1996年,水利部将长汀县列为南方小流域治理示范区,开展大规模水土流失治理,通过采取各种水土保持措施,使得长汀县农业生态环境开始恢复,区域经济逐渐好转,农业资源量增加。而农业生态经济系统是一个封闭循环,农业的经济发展依赖于农业资源。伴随着经济发展和人口的不断增加,农业资源的需求也不断增加,使得1997—2000年长汀县农业资源存量不断减少,生态系统被破坏,经济发展受到约束,耦合度降低。

(2) 极限发展阶段。2001—2002年、2017—2022年长汀县农业生态经济耦合系统的耦合度为 $107.46^\circ \sim 159.16^\circ$,处于第二象限(表3),对照表2,这个时期处于不协调耦合状态,农业生态系统与农业经济系统处于极限发展的演变阶段。该阶段特征为农业生态系统与农业经济系统相互制约^[10]。通过水土流失治理,长汀县的植树造林及灌草面积得到了很大提高,但由于后来打枝、割草、采脂的行为加强,导致农业生态系统恶化,2001—2002年进入了极限发展阶段。

2017—2022年长汀县农业生态经济系统快速进入极限发展期。在这期间,经多年治理的长汀县区域生态环境显著改善,森林覆盖率达到80%以上,但仍存在生态脆弱性和重大灾害风险性问题。首先马尾松林的比例过高,树种结构单一,生物多样性差,生态防护效能整体不高,生态系统存在“逆向演替”的风险。其次,生长一定年数的马尾松非常耗水,在旱季主要利用0—40 cm表层土壤水,在雨季随着土壤深层含水量的增加,利用水源会逐渐向土壤深层转

移^[26],导致当地农业水资源匮乏,制约农业经济的发展。此外,受经济利益驱使,长汀县在原先水土流失区和现水土保持核心区进行“挖山造田”,同时组织实施耕地、山林开发项目。通过开展平山“造田”活动,对地势陡峭、缺水严重的山坡地进行开发,建成梯田。然而,在没有充分考虑缺水的情况下,强行建设“水田”导致部分新开垦土地难以耕种,最终导致缺水问题和荒地增加;且有的山林开发项目未完成,从而导致植被破坏,加剧了农业生态系统的恶化,进而制约经济的进一步发展。

(3) 协调发展阶段。2003—2016年长汀县农业生态经济耦合系统的耦合度为 $11.90^\circ \sim 77.11^\circ$,处于第一象限(表3),对照表2,这个时期处于协调耦合状态,农业生态系统与经济系统协调发展。这一阶段,随着水土流失治理力度的加大,生态环境不断改善,各种农业技术和外来物质大量投入,土地利用效率不断提高,产业结构也随之进一步调整,使得农业生态系统和经济系统共同协调发展^[11]。

根据农业生态经济系统演变速度轨迹图(图1),当 $\theta = 45^\circ$ 时,农业生态系统与农业经济系统均衡发展;当 $45^\circ > \theta > 0^\circ$,生态资源利用不足,农业经济系统发展速度相对于农业生态系统滞后;当 $90^\circ > \theta > 45^\circ$,农业生态系统发展速度滞后。由表3的耦合度可以看出:2003—2005年长汀县农业生态系统发展速度小于农业经济系统,2006—2016年农业生态系统发展速度大于经济系统。当地政府政策与财政支持是影响耦合度的最主要因素^[27]。2006年为鼓励更多社会资本参与水土流失治理,长汀县政府出资修建水池、水沟、道路等,对外招商引资,吸引来各种植果园大户,将荒山改造成花果山^[28]。2011年12月和2012年1月,习近平同志连续两次做出批示,强调长汀县水土流失治理处于“进则全胜,不进则退”,总结推广“长汀经验”作为工作重点。这一举措推动了新一轮水土流失治理和生态文明建设取得显著成效。2012年政府将荒山使用权拍卖给农民,农民在荒山种植板栗、油茶等经济树种。山场地瘠土瘦,农民又发展养殖业,陆续兴建了河田鸡、生猪养殖场,同时将禽猪粪便作为有机肥施用到山上,增加土壤肥力,由此形成猪沼果循环种养模式^[29]。2013年9月,长汀县政府成立林业金融服务中心,为推动林业生产以及林业金融的良性发展,政府分配林权使得农民积极投入水土流失治理并取得了很大的成效。政府一系列措施与政策使得长汀县的农业生态环境得到很大改善,农业生态系统发展速度较快,农业经济也相应得到发展,二者处于协调耦合状态。

表 3 1992—2022 年长汀县农业生态系统和
农业经济系统耦合度
Table 3 Coupling degree of agro-ecological system
and agro-economic system for Changting
County from 1992 to 2022

年份	V_{el}	V_{en}	$\tan\theta$	$\theta/(^{\circ})$
1992	-0.0431	0.0157	-0.3632	160.04
1993	-0.0178	-0.0020	0.1112	186.35
1994	-0.0040	-0.0127	3.1296	252.28
1995	0.0016	-0.0179	-11.0060	275.19
1996	0.0022	-0.0190	-8.6645	276.58
1997	0.00004	-0.0171	-442.0801	270.13
1998	-0.0030	-0.0133	4.4477	257.33
1999	-0.0055	-0.0082	1.4956	236.23
2000	-0.0066	-0.0027	0.4073	202.16
2001	-0.0057	0.0028	-0.5040	153.25
2002	-0.0025	0.0079	-3.1802	107.46
2003	0.0028	0.0123	4.3686	77.11
2004	0.0100	0.0158	1.5771	57.62
2005	0.0185	0.0182	0.9815	44.47
2006	0.0278	0.0196	0.7045	35.16
2007	0.0370	0.0200	0.5395	28.35
2008	0.0455	0.0195	0.4290	23.22
2009	0.0524	0.0183	0.3501	19.30
2010	0.0570	0.0166	0.2923	16.29
2011	0.0586	0.0147	0.2503	14.05
2012	0.0568	0.0126	0.2225	12.54
2013	0.0514	0.0108	0.2107	11.90
2014	0.0422	0.0094	0.2238	12.62
2015	0.0294	0.0087	0.2960	16.49
2016	0.0137	0.0088	0.6433	32.75
2017	-0.0040	0.0099	-2.4998	111.80
2018	-0.0222	0.0121	-0.5463	151.35
2019	-0.0392	0.0155	-0.3956	158.42
2020	-0.0525	0.0200	-0.3807	159.16
2021	-0.0591	0.0254	-0.4309	156.69
2022	-0.0553	0.0317	-0.5729	150.19

注： V_{el} 为农业生态系统发展速度； V_{en} 为农业经济系统发展速度； θ 为农业生态经济系统耦合度。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 研究时段内,通过计算 1992—2022 年长汀县农业生态系统和农业经济系统的综合指数可知,长汀县的农业生态系统和农业经济系统状况都得到不断改善,这与国家对长汀县水土流失治理区的重点投资建设有关,政府的相关政策与财政支持使得长汀县

在近 30 年生态环境逐渐变好,区域经济得到发展。

(2) 与王继军^[5]、张建军^[11]等在黄土高原沟壑区的研究相比,长汀县农业生态经济系统也经历了再生发展、极限发展和协调发展 3 个阶段,不同的是两个研究时段中黄土高原沟壑区都将突破“协调”面临极限发展的危机,而本研究时段中长汀县处于“极限发展”向“协调发展”的趋势。原则上认为农业经济发展一定要建立在生态发展的承受能力下,生态发展一定不能制约经济发展,这样更有利于生态与环境的可持续协调发展^[30]。因此长汀县应继续巩固水土流失治理的成效,改善林分结构单一的现状,并且修建蓄水池、沟渠等农田水利设施保障农业生产;同时,应根据实际禁止“挖山造田”,开发林木项目等,防止在水土流失治理尚未完全成功时引起二次水土流失。

(3) 本研究在时段上选用 1992—2022 年的数据并结合该时期政策和自然因素等对长汀县农业生态经济耦合系统发展水平和演变过程进行分析,为长汀县进一步实施水土流失治理和水土保持高质量发展提供科学指导。然而在分析评价时只考虑了时间尺度,对于组成长汀县的各个乡镇的空间层面在今后还需进一步研究。

4.2 结论

经过近几十年的水土流失治理,在“进则全胜”指示前后长汀县农业生态经济耦合系统综合指数、耦合态势发生变化,长汀县农业生态经济耦合系统先后经历了 4 个演变阶段,目前处于极限发展阶段,具有向协调发展阶段演变的趋势。

(1) 1992—2022 年长汀县农业生态系统和经济系统综合指数整体呈现上升趋势,表明两个子系统都在朝良好态势发展。

(2) 1992—2022 年长汀县农业生态经济耦合系统的耦合度在 $10^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 。在政府政策和社会经济发展的影响下,系统从衰退耦合过渡到不协调耦合,再到协调耦合、不协调耦合,整个耦合状态演变呈 S 型曲线。

(3) 1992—2022 年长汀县农业生态经济耦合系统先后经历再生发展、极限发展、协调发展、极限发展的演变阶段。从耦合度的发展趋势来看,通过合理的治理措施,能够解除长汀县农业生态系统与经济系统相互制约的现象,在下一阶段突破极限发展向协调发展演变。

参考文献 (References):

[1] 叶初升,惠利.农业生产污染对经济增长绩效的影响程度研究:基于环境全要素生产率的分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(4):116-125.
Ye C S, Hui L. How much does the agricultural pollu-

- tion affect economic growth performance; an analysis based on the environmental total factor productivity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(4):116-125.
- [2] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, et al. Characterising the urban environment of UK cities and towns: a template for landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87(3):210-222.
- [3] 高邓.农业生态环境与农业经济协同发展路径研究[J]. *农业经济*, 2020(5):18-19.
- Gao D. Study on the path of coordinated development of agricultural ecological environment and agricultural economy[J]. *Agricultural Economy*, 2020(5):18-19.
- [4] 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 analysis of the coupling situation of agricultural eco-economic system in Gannan region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(16):6466-6475.
- [5] 王继军,姜志德,连坡,等.70年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. *生态学报*, 2009, 29(9):5130-5137.
- Wang J J, Jiang Z D, Lian P, et al. Coupling analysis of the agricultural ecological economic system over 70 years in the Zhifanggou watershed, Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9):5130-5137.
- [6] 秦天枝.我国水土流失的原因、危害及对策[J]. *生态经济*, 2009, 25(10):163-169.
- Qin T Z. Study on the technical assessment of soil and water conservation facilities acceptance [J]. *Ecological Economy*, 2009, 25(10):163-169.
- [7] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4):204-209.
- Tian W T, Hu W Y, Li J, et al. The status of soil and water loss and analysis of countermeasures in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(4):204-209.
- [8] 廖萌.改革开放40年长汀生态治理的经验[J]. *金融经济*, 2018, 37(14):20-22.
- Liao M. The experience of ecological governance in Changting in the past 40 years of reform and opening up [J]. *Finance Economy*, 2018, 37(14):20-22.
- [9] 范胜龙,张珊珊,邱凌婧,等.福建省长汀县生态环境建设与经济发展的协调关系研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(3):175-184.
- Fan S L, Zhang S S, Qiu L J, et al. Coordination relationship between ecological environment construction and economic development in Changting County, Fujian Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(3):175-184.
- [10] 李文军,郝明德,牛育华.黄土高原沟壑区王东沟流域农业生态经济系统演变过程[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1):298-302.
- Li W J, Hao M D, Niu Y H. Evolutionary process of agricultural eco-economic system at Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1):298-302.
- [11] 张建军,张晓萍,王继军,等.1949—2008年黄土高原沟壑区农业生态经济系统耦合分析:以陕西长武县为例[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3):755-762.
- Zhang J J, Zhang X P, Wang J J, et al. Coupling analysis of agro-ecologic system in gully area of Loess Plateau in 1949—2008: a case study in Changwu County of Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3):755-762.
- [12] 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.
- [13] 姚石,刘盼,位贺杰.粮食安全视域下黄河流域农业生态经济耦合协调发展及驱动机制研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(8):10-20.
- Yao S, Liu P, Wei H J. Research on coupling coordinated development and its driving mechanism of agricultural ecological-economic system in the Yellow River Basin under the perspective of food security[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(8):10-20.
- [14] 余永琦,余艳锋,彭柳林,等.长江流域农业生态经济系统耦合协调关系评价及其差异化分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(12):235-247.
- Yu Y Q, Yu Y F, Peng L L, et al. Evaluation and its differentiation analysis of the coupling coordination relation of agricultural ecology and economy system in the Yangtze River Basin[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(12):235-247.
- [15] 王伟新,许蒋鸿,王晓萱,等.长江经济带现代农业-区域经济-生态环境耦合关系的时空分异[J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(1):64-74.
- Wang W X, Xu J H, Wang X X, et al. Spatiotemporal differentiation of the coupling relationship among modern agriculture, regional economy and ecological environment in the Yangtze River economic belt [J]. *Research of*

- Agricultural Modernization, 2020, 41(1): 64-74.
- [16] 邹亚东, 张晓萍, 何亮, 等. 退耕还林(草)背景下黄土丘陵沟壑区农业生态经济系统耦合发展态势: 以陕西省吴起县为例[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 217-224, 238.
- Zou Y D, Zhang X P, He L, et al. Coupling development situation of agricultural eco-economic system in loess hilly and gully areas as farmland is returned to forest (grass) land: a case study at Wuqi County, Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 217-224, 238.
- [17] 成思敏, 王继军, 李茂森, 等. 退耕区农户生计策略与农业产业-资源系统耦合机制的演化过程分析: 以纸坊沟流域为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 242-249.
- Cheng S M, Wang J J, Li M S, et al. Analysis on the evolutionary process of farmers' livelihood strategy and the agricultural industry-resources system coupling mechanism in de-farming regions: a case study of Zhifanggou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 242-249.
- [18] 毕安平. 水土流失区生态-经济系统耦合效应[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
- Bi A P. Coupling effects of eco-economic system in soil erosion region[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [19] 骆汉, 胡小宁, 谢永生, 等. 生态治理技术评价指标体系[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5766-5777.
- Luo H, Hu X N, Xie Y S, et al. An evaluation index system for ecological management technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5766-5777.
- [20] 苏鑫, 王继军, 郭满才, 等. 基于结构方程模型的吴起县农业生态经济系统耦合关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 937-944.
- Su X, Wang J J, Guo M C, et al. Coupling relationship of agricultural eco-economic system in Wuqi County based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 937-944.
- [21] 李亮. 评价中权重系数理论与方法比较[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Li L. Weights theory and weighting methods comparison in the evaluation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [22] 李芬, 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域近 70 年农业生态安全评价[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2380-2388.
- Li F, Wang J J. Assessment of agricultural ecological security of the Zhifanggou Valley in the Loess Hilly Region over 70 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2380-2388.
- [23] Bertalanffy L. General system theory: foundations, development, applications[M]. New York: George Braziller, 1968.
- [24] Bretz E A. Clean-coal technologies: a status report[J]. Electrical World (United States), 1992, 206(2): 37-42.
- [25] 岳辉, 曾河水. 等高草灌带在长汀水土流失治理中的应用与成效[J]. 亚热带水土保持, 2007, 19(1): 31-33.
- Yue H, Zeng H S. Application and effect of contour grass shrub belt in soil and water loss control in Changting[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2007, 19(1): 31-33.
- [26] 张岁梦, 叶丽敏, 周肆智, 等. 南方丘陵区马尾松-麻栎群落水分利用来源及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1729-1736.
- Zhang S M, Ye L M, Zhou Y Z, et al. Water use sources and its influencing factors of *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* community in hilly region of Southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7): 1729-1736.
- [27] Lu H L, Zhou L H, Chen Y, et al. Degree of coupling and coordination of eco-economic system and the influencing factors: a case study in Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(3): 446-457.
- [28] 翁伯琦, 徐晓俞, 罗旭辉, 等. 福建省长汀县水土流失治理模式对绿色农业发展的启示[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 141-149.
- Weng B Q, Xu X Y, Luo X H, et al. Controlling model of soil and water loss and revelation to the development of green agriculture in Changting of Fujian, China[J]. Mountain Research, 2014, 32(2): 141-149.
- [29] 朱鹤健. 我国亚热带山地生态系统脆弱区生态恢复的战略思想: 基于长汀水土保持 11 年研究成果[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1498-1506.
- Zhu H J. Strategies on eco-restoration in the subtropical mountain ecosystem fragility areas, China: based on the achievement of eleven years' research in Changting County[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(9): 1498-1506.
- [30] Yao L, Halike A, Wei Q Q, et al. Research on coupling and coordination of agro-ecological and agricultural economic systems in the Ebinur Lake Basin[J]. Sustainability, 2022, 14(16): 10327.