

农田生态系统恢复力评价与调控机制

王洪佳¹, 王晨奇¹, 李沪波², 郭新霞³, 冀增胜⁴, 高明秀^{1*}

¹山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安

²青岛市植物园管理处, 山东 青岛

³东营市经济技术开发区东城街道办事处, 山东 东营

⁴青州市自然资源和规划局, 山东 青州

Email: 3194004716@qq.com, *mxgao@sda.edu.cn

收稿日期: 2021年7月25日; 录用日期: 2021年8月27日; 发布日期: 2021年9月3日

摘要

科学认识和评价农田生态系统恢复力并构建调控机制, 对于合理调控农田生态系统良性发展、促进农田资源可持续利用、高效生态农业发展、保障国家粮食安全和生态安全意义重大。农田生态系统恢复力研究包括农田生态系统恢复力的内涵及构成分析、影响机理与指标体系构建、定量评价方法和调控机制4部分内容。基本思路是以农田生态系统恢复力“内涵界定→构成分析→影响机理→定量评价→调控机制”为主线开展评价并构建起科学的调控机制。评价方法包括数据获取处理、指标体系构建、赋权和评价模型构建、阈值和标准确定、定量评价5个关键环节。调控机制应基于评价结果, 结合政府部门和农业经营主体分级分层宏观微观管理需求建立。研究结果可为农田资源持续利用、高效农业发展, 以及生态空间格局再造、资源环境协调、生态可持续发展提供科学依据。

关键词

恢复力, 生态系统, 农田, 评价, 调控机制

Evaluation and Regulation Mechanism of Farmland Ecosystem Resilience

Hongjia Wang¹, Chenqi Wang¹, Hubo Li², Xinxia Guo³, Zengsheng Ji⁴, Mingxiu Gao^{1*}

¹College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian Shandong

²Botanical Garden Management Office of Qingdao City, Qingdao Shandong

³Dongcheng District Office of Dongying Economic and Technological Development Zone, Dongying Shandong

⁴Natural Resources and Planning Bureau of Qingzhou City, Qingzhou Shandong

Email: 3194004716@qq.com, *mxgao@sda.edu.cn

*通讯作者。

Abstract

Scientific understanding and evaluation of farmland ecosystem resilience and construction of regulation mechanism are of great significance for reasonably regulating the benign development of farmland ecosystem, promoting the sustainable utilization of farmland resources, the development of efficient ecological agriculture, and ensuring national food security and ecological security. The research on farmland ecosystem resilience includes four parts: the connotation and composition analysis of farmland ecosystem resilience, the impact mechanism analysis and construction of the index system, quantitative evaluation method and regulation mechanism. The basic idea is to carry out the evaluation and establish a scientific regulation mechanism based on the mainline of "connotation definition of farmland ecosystem resilience → composition analysis → impact mechanism → quantitative evaluation → regulation mechanism". The evaluation method includes five key links: data acquisition and processing, index system construction, weighting and evaluation models construction, threshold and standard determination, and quantitative evaluation. The regulation mechanism should be established based on the evaluation results and combined with the hierarchical macro and micro-management needs of government departments and agricultural business entities. The results can provide a scientific basis for the sustainable utilization of farmland resources, the development of efficient agriculture, the reconstruction of ecological spatial pattern, the coordination of resources and environment and the sustainable development of ecology.

Keywords

Resilience, Ecosystem, Farmland, Evaluation, Regulation Mechanism

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,在经济社会迅速发展的同时,受气候变化和人类活动等影响,全球生态系统变化剧烈,自然生态系统面积不断缩减、生物多样性急剧减少、生态系统生产力显著下降等导致区域乃至全球生态系统脆弱性不断强化、稳定性和恢复能力不断降低,并成为制约可持续发展的关键因素[1]。人们逐渐意识到人类发展离不开稳定的生态系统,但研究和实践中传统科学方法可能不再奏效,甚至使问题更严重[2]。如何最大限度降低人为干扰和不确定因素造成的影响和损失,维持生态系统稳定,成为事关人类可持续发展亟需解决的问题。20世纪70年代出现的生态系统恢复力(Resilience)理论为解决这些问题提供了一种新思路,恢复力成为维持可持续的关键,以恢复力为基础的自然资源管理方法得以不断革新和广泛接受,越来越多的国家和地区致力于区域恢复力研究和建设[3][4]。目前,恢复力理论已发展成为探索缓解生态系统状态转化、应对气候变化和突发事件、制定管控方案的理论指导和分析社会-生态系统(Social Ecological Systems)的重要框架,成为探索人类社会和自然环境关系的主流[4][5][6]。正在开展的全球土地计划(Global Land Project)的主要目标之一就是测量和理解土地系统对于灾害和扰动的恢复力。

农田是生态系统的重要组成部分,提供着全球66%的粮食供给,是人类社会发展的基础。但非持续

的利用方式导致农田生态系统遭损害、环境受污染，世界范围 40%的农业用地、25%的耕地出现严重退化；据 2014 年全国土壤污染状况调查公报，约 82.8%的土壤被无机材料污染，耕地面临耕作层变薄、有机质含量下降、重金属等污染面积占比高达 19.4%的严峻形势。这不但削弱了农田生态系统提供服务的能力，更引发了一系列环境和生态安全问题，威胁到人类的发展。如何科学评价和合理调控农田生态系统的状态、服务能力及其可持续性已受到广泛关注[7]，但相关研究集中于生态系统服务及微观方面[8]。近年来，国家为保护农田生态环境，采取了化肥农药“双减”、有机替代无机、轮作休耕等政策。这些政策是否能维持农田生态系统的良性循环，保证其处于理想的系统稳态？如何深刻理解农田生态系统恢复力与可持续性？

基于此，借鉴恢复力理论，科学界定农田生态系统恢复力的内涵及构成，构建农田生态系统恢复力指标体系，探索农田生态系统恢复力的定量测量方法和调控机制，可以为从根本上深刻理解、科学评价农田生态系统状况，合理调控农田生态系统良性发展提供依据，对促进农田资源可持续利用、高效生态农业发展、保障国家粮食安全和生态安全具有重要意义。

2. 恢复力研究现状述评

2.1. 恢复力内涵及理论研究

一般认为，生态系统恢复力是指生态系统在受到外界干扰，偏离平衡态后表现出的自我维持、自我调节和抵抗外界压力和扰动的能力[1] [5]。1973 年，美国生态学者 Holling 将恢复力概念引入生态学领域，用于观察生态系统的稳定性[9]。80 年代，Pimm 提出恢复力是系统遭受扰动后恢复到原稳态的速度[10]。而后，随着研究的深入，恢复力的内涵也不断得到丰富，许多学者结合稳定性、抵抗力、持续性来解释恢复力[11]。在恢复力理论发展过程中，经历了工程恢复力、生态恢复力和社会 - 生态系统恢复力 3 个阶段[5] [6]。工程恢复力(Engineering Resilience)是一种对恢复力的最早解释，强调系统的某个稳态并以恢复到该稳态所需时间和速度来衡量[12]。生态恢复力(Ecological Resilience)是在工程恢复力的基础上，假设系统存在多个稳态，以系统在跨越这些状态时吸收的干扰量来表达[3] [4]。两者都认为多空间的复杂系统行为将围绕吸引场进入稳态，如系统进入一个新的稳态，原系统的恢复力将丢失。社会 - 生态系统恢复力聚焦于系统的演变过程，包括系统保持结构和功能时能忍受的变量、受干扰后重组的程度、系统学习和适应的程度，更加关注复杂的社会 - 生态系统在应对压力和张力时的变化、适应及转换能力，引领生态学进入复杂系统或复杂科学阶段[6]。

2.2. 生态系统恢复力评价研究

恢复力是生态系统的内在属性，难以直接测量。为开展评价，学者们探讨了诸如阈值法[13]、替代指标法[14]、场景分析法[15]、实验方法等[16]评价方法，主要侧重于对系统的脆弱性、稳定性等的综合评价；研究内容则主要针对某一生态系统受到干扰时的适应性管理框架[17]。

生态系统恢复力的影响因素分析是评价的基础，20 世纪末以来已有大量探讨和案例分析，较多集中在气候、植被、生物多样性、人类活动等方面，但目前的理解仍然具有一定局限性，缺少一致的观点[1] [5] [6]。在恢复力评价方法方面，一般是根据影响因素构建指标体系并赋权，建立综合评价模型计算综合指数，用以表示生态系统恢复力的大小。指标权重的确定采用层次分析法(AHP)、主成分分析法(PCA)、变异系数法、组合赋权法等[5]，RS 和 GIS 技术在数据获取与处理中得到运用。胡文秋[18]利用 Robert 湿地恢复潜力估算模型评价了黄河三角洲退化湿地恢复力；陈伟等[19]基于森林生态系统的自组织能力、抵抗能力和适应能力遴选指标建立指标体系，结合遥感技术评价了冰雪冻灾极端气候干扰下南方丘陵山区森

林生态系统的恢复力。侯彩霞等[20]运用系统动力学方法测量社会-生态系统恢复力,以盐池县为例研究生态政策对草原社会-生态系统恢复力状况的影响。张行等[21]从景观尺度探究生态脆弱区米脂县的社会-生态系统恢复力时空分异及演变,并运用有序加权平均法,基于干扰指标与适应能力指标的不同权重设置情景偏好进行情景模拟。王丽等[22]构建了多尺度矿区植被生态系统恢复力定量测度研究框架。近年社会-生态恢复力测量受到更多关注,阈值或断裂点法、恢复力替代法、场景分析法、状态空间法和恢复力长度法等5种方法较多见,但阈值和断裂点方法依旧是量化恢复力的基本方法[6]。

2.3. 研究述评

综合而言,当前,恢复力理论的政策和管理价值已被广泛接受和认可,受到生态学、经济学、社会学等众多学科的关注。然而,目前学界对恢复力的内涵、构成、影响因素等的认识还未达成一致;由于测量难度较大,对生态系统恢复力的研究处于理论研究及案例分析阶段,实证探索较少,生态系统恢复力的测度成为进一步研究的切入点[1] [6] [7] [23] [24]。已有研究在这方面的尝试仅涉及到森林、湿地、草原、旅游地以及矿区生态系统等[18] [19] [20] [21] [22],但对农田生态系统的研究尚很鲜见。特别是,在恢复力测量中对尺度的考虑不足,阈值的确定不尽合理[1] [5] [6],更缺乏基于评价的恢复力调控机制研究。

农田是全球生态系统中人类干扰强度最大、持续时间最长的生态系统之一,在气候恶化、资源约束、环境压迫背景下,从根本上深刻理解、科学评价农田生态系统状况,合理调控农田生态系统良性发展,对促进农田资源可持续利用、高效生态农业发展、保障国家粮食安全和生态安全意义重大。因此,迫切需要开展农田生态系统恢复力理论方法研究,深入分析其内涵及构成,科学构建农田生态系统恢复力指标体系、定量测度模型,探索其调控机制,为农田资源综合管理,促进高效生态农业发展提供科学依据。

3. 农田生态系统恢复力研究内容分析

研究农田生态系统恢复力,首先要明晰农田生态系统恢复力的内涵,解析农田生态系统恢复力的构成,阐明农田生态系统恢复力影响因素及其作用机理,构建农田生态系统恢复力指标体系,建立阈值标准,提出农田生态系统恢复力定量评价方法,建立农田生态系统恢复力评价理论和方法。

3.1. 农田生态系统恢复力的内涵及构成分析

1) 农田生态系统及其扰动特征分析:基于生态学、系统论、控制论、复杂科学等理论,从农田生态系统受人类驯化,受自然规律和人类活动双重影响、自然生态规律和社会经济规律双重支配角度出发,探究人为持续干扰下农田生态系统的系统组分、系统结构、系统功能、扰动特征、变化模式、系统稳态及持续发展特征。

2) 农田生态系统恢复力内涵及特征分析:基于农田生态系统及其扰动特征,科学阐释农田生态系统恢复力的内涵,界定其主体、客体,分析其基本特征和构成,解析农田生态系统恢复力调控的必要性和对农田资源持续利用管理的科学价值,为农田生态系统恢复力指标体系构建和评价测度奠定理论基础。

3.2. 农田生态系统恢复力影响机理与指标体系构建研究

1) 农田生态系统恢复力影响机理研究:在农田生态系统恢复力的内涵和构成分析基础上,从自然、环境、经济、技术管理、社会5个维度解构农田生态系统恢复力的影响因素,并细化解析农田生态系统恢复力的具体影响因素,分析各因素的影响机制,包括作用的方式、方向、强弱、相对位序等,阐明农田生态系统恢复力影响因素的作用机理。

2) 农田生态系统恢复力指标体系构建研究: 基于农田生态系统恢复力影响因素及其机理和农田资源持续利用目标, 结合具体研究区的农田实际, 合理确定时空维度, 研究指标初选、筛选、优化方法和指标体系完备度可靠性检验方法, 构建区域、县域、田块不同尺度相互嵌套、标准统一、操作性强、体系完整的农田生态系统恢复力评价指标体系; 研究各因素指标量化方法, 根据国家和地方农田和水土环境、产品质量、生产力、作物生长发育生理需求以及经济社会技术投入和管理目标标准, 合理确定各指标阈值, 建立农田生态系统恢复力定量评价标准体系。

3.3. 农田生态系统恢复力定量评价方法研究

1) 指标赋权方法研究: 根据农田生态系统恢复力指标体系特点, 比较 Delphi Method、AHP Method、熵值法、变异系数法等赋权方法的优缺点, 研究科学的组合赋权方法, 如 AHP-熵值法、AHP-变异系数法、AHP-CRITIC 组合赋权法等。

2) 农田生态系统恢复力评价模型研究: 研究建立加权求和模型、加权几何模型、基于 GIS 的加权指数模型、基于改进 TOPSIS 的加权评价模型等评价模型, 对比不同模型的特点和评价效果, 筛选得到农田生态恢复力评价最优模型, 建立评价方法体系。

3.4. 农田生态系统恢复力调控机制研究

基于评价结果, 分析农田生态系统恢复力的时空尺度特征和变异规律, 探究农田恢复力存在问题和解决方法, 研究政府部门和农业经营主体分级分层宏观微观结合的农田生态系统恢复力调控机制。

农田生态系统恢复力研究中, 应突出应用导向, 基于理论和方法研究, 在区域、县域、田块 3 个尺度上进行应用研究, 构建不同尺度的农田生态系统评价指标体系, 提出评价方法, 评价农田生态系统恢复力, 分析尺度、时空特征及其规律, 建立调控机制, 为政府制订调控政策、农业经营主体实施农田管理提供参考。

4. 农田生态系统恢复力研究方法探讨

4.1. 基本思路

农田生态系统恢复力研究, 基本思路是围绕“内涵界定→构成分析→影响机理→定量评价→调控机制”开展(见图 1)。首先, 深入分析农田生态系统及其扰动特征, 包括农田生态系统的组分、结构、功能, 以及扰动特征、变化模式, 科学界定农田生态系统恢复力的内涵, 明晰其主体、客体及特定和一般的内涵构成, 明确其对农田可持续利用管理的科学价值; 其次, 从自然、环境、经济、技术管理、社会 5 个方面, 分析影响农田生态系统恢复力的因素, 及其对恢复力的影响机理、作用方式、方向、强弱位序和阈值, 筛选关键因素, 构建评价指标体系; 然后, 筛选、组合和优化评价模型, 提出评价方法, 进行实证评价应用; 基于评价结果, 结合研究区实际, 提出调控标准、方法和程序, 构建科学调控机制。

4.2. 研究方法

4.2.1. 数据获取与预处理

1) 调查收集: 调查收集研究时段(10~20 年)统计年鉴及公报、水利年报、土壤公报等农业、水、土、气象等监测和统计数据资料, 整理得到研究区农田自然、环境、经济、技术管理和社会等资料。

2) RS & GIS 技术分析: 从美国地质调查局(USGS)网站、中科院地理空间数据云等平台下载研究区遥感影像、DEM 等数据, 基于 ENVI、ArcGIS 等软件平台, 处理分析获取地形、高程、坡度、坡向及相关地理数据, 结合已有土壤、作物数据, 反演获取历史年份及缺失区域相应数据。

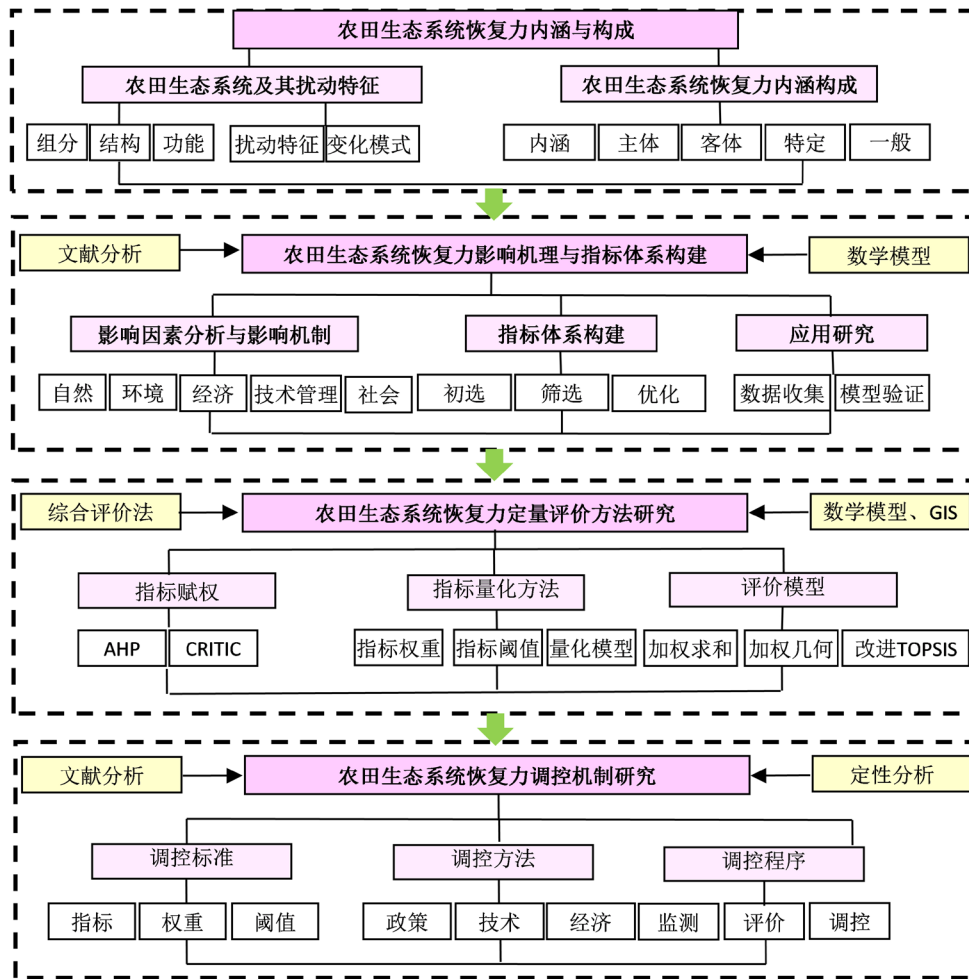


Figure 1. Research technology route
图 1. 研究技术路线

3) 采集化验分析：根据农田环境监测相关国家及行业标准，在研究区域内基于网格法设置采样点，采用 GPS 精确定位，采集农田土壤、水、作物样品，记录作物长势数据。水质指标(地表水化学需氧量 COD、总氮 TN、总磷 TP、NH₃-N、氟化物 FL 等，地下水 COD、NH₃-N、NO₃-N、FL、氯化物、硫酸盐、Fe、Mn 等)采用多参数水质分析仪测定，水和土壤 pH 采用 pH 计测定，土壤含水率采用土壤水分速测仪测定，土壤电导率采用 EC110 电导率仪测定；土壤(颗粒组成、有机质 SOM、TN、TP、速效氮 SAN、有效磷 SAP、速效钾 SAK、微生物总数、Hg、As、Pb 等)及作物化学指标，参照《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤，1999)测定。

4) 插值与延展：对缺乏的时空数据，采用 ArcGIS 插值完善空间数据，或根据解释变量和被解释变量关系采用多元线性回归分析法延展相关时间序列数据。

5) 数据标准化：可采用极值法处理原始数据矩阵 $X(O_{ij})_{m \times n}$ ，得到标准化矩阵 $Y(g_{ij})_{m \times n}$ ，区分正、负向指标计算，以消除指标类型与量纲对评价结果的影响。

4.2.2. 指标体系构建与优化

首先，依据 Dale 单指标入选原则[25]和 TOSE 空间维度模型[26]，从自然、环境、经济、技术管理、社会 5 个维度构建农田生态系统恢复力评价指标体系框架，选取相关指标建立农田生态系统恢复力评价

初选指标体系；然后，基于指标适用性，利用指标相对离散系数和累计信息贡献率(CRCI)剔除对评价影响小的指标，运用灰色关联度(GRA)方法计算剩余指标间 GRA 筛除信息重复的指标[27]；最后，对筛选结果进行成因分析及模型合理性与可信性分析，经可行性验证后构建出优化的指标体系。

4.2.3. 评价方法

1) 赋权方法：结合农田生态系统指标体系特点，征询专家意见，比较 Delphi Method、AHP、熵值、变异系数等赋权优缺点，筛选科学的组合赋权方法，如 AHP-CRITIC 组合赋权法[28]，得到权重矩阵 W。

2) 评价模型：构建并对比加权综合指数模型、改进 TOPSIS 评价模型评价效果，选择最优模型作为评价模型进行评价。

a) 加权综合指数评价模型：加权求和评价模型[19]：

$$F_j = \sum (w_i * f_i) \quad (1)$$

加权几何指数评价模型[18]：

$$F_j = \sqrt{\prod_{i=1}^n f_i^{w_i}} \quad (2)$$

式中， $(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$ ， F_j 为j评价单元农田生态恢复力综合评价值， w_i 和 f_i 分别为第i个指标的权重和指标值。

b) 改进 TOPSIS 评价模型[28] [29]：

① 计算加权规范化矩阵 C。将 $Y(g_{ij})_{m \times n}$ 和 W 相乘得到矩阵 C。

② 确定正、负理想点集 A^+ 、 A^- 。 A^+ 为矩阵 C 中每列的最优值，即正向指标(+)取最大值，负向指标(-)取最小值， A^- 则相反。

③ 分别计算待评样本与最优、最劣方案灰色关联度系数矩阵：

$$(r_{ij}^+)_{mn} = \left(\frac{(\min \min |c_j^+ - c_{ij}^+| + \delta \max \max |c_j^+ - c_{ij}^+|)}{(|c_j^+ - c_{ij}^+| + \delta \max \max |c_j^+ - c_{ij}^+|)} \right)_{mn} \quad (3)$$

$$(r_{ij}^-)_{mn} = \left(\frac{(\min \min |c_j^- - c_{ij}^-| + \delta \max \max |c_j^- - c_{ij}^-|)}{(|c_j^- - c_{ij}^-| + \delta \max \max |c_j^- - c_{ij}^-|)} \right)_{mn} \quad (4)$$

式中， $(r_{ij}^+)_{mn}$ 、 $(r_{ij}^-)_{mn}$ 分别为待评样本与最优、最劣方案灰色关联度系数矩阵； c_{ij} 为指标值， c_j^+ 、 c_j^- 分别为 A^+ 、 A^- 中的对应理想值； $\delta \in (0,1)$ 为分辨系数，一般取值 0.5 [29] [30]。

计算各待评样本与最优、最劣方案的灰色关联度(R^+ ， R^-)：

$$R^+ = \left(\sum_{j=1}^n r_{ij}^+ \right) / n, \quad R^- = \left(\sum_{j=1}^n r_{ij}^- \right) / n \quad (5)$$

④ 计算各方案指标值与正、负理想点的欧式距离：

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\max j} - Z_{ij})^2}, \quad D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{\min j} - Z_{ij})^2} \quad (6)$$

⑤ 计算各方案与正理想点相对贴近度 N_i 。先无量纲处理灰色关联度和欧式距离，将两者合并，计算各方案与正负理想解接近程度 n_i^+ 、 n_i^- ：

$$n_i^+ = \alpha R^+ / R_{\max}^+ + \beta D^+ / D_{\max}^+, \quad n_i^- = \alpha R^- / R_{\max}^- + \beta D^- / D_{\max}^- \quad (7)$$

式中， $\alpha + \beta = 1$ ，分别为形状和位置偏重程度。然后计算相对贴近度：

$$N_i = n_i^- / (n_i^- + n_i^+) \quad (8)$$

在二维空间上，与理想点 $O(\min(n_i^+), \max(n_i^-))$ 接近的方案为最优，运用下式对相对贴近度计算结果

进行排序检验:

$$N_i^* = \sqrt{\left[n_i^+ - \min(n_i^+) \right]^2 + \left[n_i^- - \min(n_i^-) \right]^2} \quad (9)$$

5. 结语

在气候恶化、资源约束、环境压迫背景下,开展农田生态系统恢复力理论方法研究十分迫切。本文评述了恢复力研究现状,探讨了农田生态系统恢复力研究的内容和方法。科学认识和评价农田生态系统恢复力,对于合理调控农田生态系统良性发展、促进农田资源可持续利用、高效生态农业发展、保障国家粮食安全和生态安全具有重要意义。农田生态系统恢复力研究包括农田生态系统恢复力的内涵及构成分析、影响机理与指标体系构建、定量评价方法和调控机制 4 部分内容。基本思路是以农田生态系统恢复力“内涵界定→构成分析→影响机理→定量评价→调控机制”为主线开展评价并构建起科学的调控机制。评价方法包括数据获取处理、指标体系构建、赋权和评价模型构建、阈值和标准确定、定量评价 5 个关键环节。调控机制应基于评价结果,结合政府部门和农业经营主体分级分层宏观微观管理需求建立。研究结果可为农田资源持续利用、高效农业发展,以及生态空间格局再造、资源环境协调、生态可持续发展提供科学依据。

基金项目

本文受到山东省农业科技园区产业提升工程(乡村振兴)项目(2019YQ014),山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2019RZB01015),2020年山东省大学生创新创业训练计划项目(S202010434028,S202010434132)支持。

参考文献

- [1] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.
- [2] Ludwig, D., Hilborn, R. and Walters, C. (1993) Uncertainty, Resource Exploitation, and Conservation: Lessons from History. *Science*, **260**, 17-36. <https://doi.org/10.1126/science.260.5104.17>
- [3] Campbell, E.M., Saunders, S.C., Coates, K.D., et al. (2009) Ecological Resilience and Complexity: A Theoretical Framework for Understanding and Managing British Columbia's Forest Ecosystems in a Changing Climate. British Columbia, Victoria.
- [4] Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., et al. (2002) Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *AMBIO*, **31**, 437-440. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.5.437>
- [5] 杨庚, 曹银贵, 罗古拜, 等. 生态系统恢复力评价研究进展[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(3): 508-513.
- [6] 周晓芳. 从恢复力到社会——生态系统: 国外研究对我国地理学的启示[J]. 世界地理研究, 2017, 26(4): 156-167.
- [7] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学, 2000, 25(2): 98-100.
- [8] 刘静萍, 徐晋保. 不同管理模式对农田生态系统服务影响模拟研究——以太湖流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9314-9324.
- [9] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [10] Pimm, S.L. (1984) The Complexity and Stability of Ecosystems. *Nature*, **307**, 321-326. <https://doi.org/10.1038/307321a0>
- [11] Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., et al. (2010) Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, **15**, 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
- [12] Holling, C.S. (2006) Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In: Gunderson, L.H., Allen, C.R., and Holling, C.S., Eds., *Foundations of Ecological Resilience*, Island Press, Washington DC, 51-66.
- [13] 杨永均. 矿山土地生态系统恢复力及其测度与调控研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [14] Bennett, E.M., Cumming, G.S. and Peterson, G.D. (2005) A Systems Model Approach to Determining Resilience Sur-

- rogates for Case Studies. *Ecosystems*, **8**, 945-957. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0141-3>
- [15] Gumming, G.S., Barnes, G., Perz, S., *et al.* (2005) An Exploratory Framework for the Empirical Measurement of Resilience. *Ecosystems*, **8**, 975-987. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0129-z>
- [16] Whitford, W.G., Rapport, D.J. and Desoyza, A.G. (1999) Using Resistance and Resilience Measurements for “Fitness” Tests in Ecosystem Health. *Journal of Environmental Management*, **57**, 21-29. <https://doi.org/10.1006/jema.1999.0287>
- [17] 袁媛, 白中科. 基于文献计量分析的生态系统恢复力研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 271-278.
- [18] 胡文秋. 基于 RS 和 GIS 的退化湿地生态系统恢复力研究——以黄河三角洲湿地为例[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2013.
- [19] 陈伟, 杨飞, 王卷乐, 等. 冰雪冻灾干扰下的亚热带森林生态系统恢复力综合定量评价——以湖南省道县为例[J]. 林业科学, 2018, 54(6): 1-8.
- [20] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 等. 生态政策下草原社会-生态系统恢复力评价——以宁夏盐池县为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 117-126.
- [21] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会——生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466.
- [22] 王丽, 雷少刚, 卞正富. 多尺度矿区植被生态系统恢复力定量测度研究框架[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 76-80.
- [23] 张绍良, 杨永均, 侯湖平, 等. 基于恢复力理论的“土地整治+生态”框架模型[J]. 中国土地科学, 2018, 32(10): 83-89.
- [24] Miranda, P.M., Peter, H., Alisa, S., *et al.* (2019) A Framework to Assess the Resilience of Farming Systems. *Agricultural Systems*, **176**, 1-10.
- [25] Dale, V.H. and Beyeler, S.C. (2001) Challenges in the Development and Use of Ecological Indicators. *Ecological Indicators*, **1**, 3-10. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(01\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(01)00003-6)
- [26] Beisner, B.E., Haydon, D.T. and Cuddington, K. (2003) Alternative Stable States in Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**, 376-382. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0376:ASSIE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0376:ASSIE]2.0.CO;2)
- [27] 刘东, 齐晓晨, 朱伟峰. 基于 CRCI-GRA 模型的区域农业水土资源复合系统恢复力评价指标体系优选[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(1): 59-67.
- [28] 刘东, 徐磊, 朱伟峰. 基于最优组合赋权和改进 TOPSIS 模型的区域农业水资源恢复力评价[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(6): 86-96.
- [29] 徐林明, 李美娟, 卢锦呈. 考虑决策者偏好的均衡接近度灰关联改进 TOPSIS 动态评价方法及其应用研究[J/OL]. 中国管理科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210525.1615.003.html>, 2020-05-26.
- [30] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 217-227.