

乡村地域系统转型机理与情景模拟

刘彦随^{1,2}, 郭仁忠³, 张立强⁴, 郭远智¹, 李裕瑞¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 河南大学地理科学与工程学院, 郑州 450046; 3. 深圳大学建筑与城市规划学院智慧城市研究院,
深圳 518060; 4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 乡村地域系统是新时代乡村振兴的多维对象,其复杂性、动态性特征要求突破单一领域思维,通过系统科学理论、多源数据驱动的技术方法与可持续转型路径的深度融合,实现系统诊断—情景模拟—精准施策的全链条治理。本文基于人地系统科学理论与地理学多尺度分析范式,通过探究乡村地域系统“要素—结构—功能”级联分析体系,解析乡村地域系统与乡村振兴的科学内涵,阐明乡村地域系统多尺度演化规律与转型机理,开发乡村地域系统发展状态评估与情景模拟技术,梳理提出了乡村地域系统转型机理与模拟的“三器”(诊断器、探测器、模拟器)平台框架;通过创新多模态时空数据融合与智能解译方法,突破乡村地域系统要素定量反演的技术瓶颈,建立多要素协同观测指标体系与数据共享应用平台,揭示不同发展路径下的乡村转型空间格局,探索创建了“三大”体系,包括“自然—社会—技术”多维交互的乡村地域系统理论体系、跨平台乡村地域系统协同观测技术体系,以及乡村振兴科学路径及其管理标准规范体系。研究成果有助于实现乡村地域系统多源异构数据协同观测和情景模拟体系化,为科学编制乡村振兴规划和全面推进乡村振兴战略决策提供理论指导与技术支持。

关键词: 乡村地域系统;协同观测;融合计算;转型机理;情景模拟;乡村振兴

DOI: 10.11821/dlxb202504001

1 问题提出

乡村是指城市建成区之外,具有自然、社会、经济特征和生产、生活、生态、文化等多重功能的地域综合体^[1]。由于自然、经济、社会、政策等因素的空间异质性,不同国家和地区对乡村概念内涵的界定及其分类存在明显差异。中国依据行政区划来界定乡村或农村,特指以从事农业生产为主的农业人口居住区。美国和墨西哥规定人口数量在2500人以下的居民点为乡村,欧盟则规定人口密度小于300人/km²且人口总量小于5000人的集聚区为乡村。地理学的乡村指乡村地域,也即具有多要素、多层级的乡村地理空间。乡村地域各要素按照一定作用规则和联系方式耦合作用构成了乡村地域系统(Rural Areal System, RAS),其实质是由人文、经济、资源与环境相互联系、相互作用下构成的具有一定结构、功能和区际联系的乡村空间体系^[2-3]。依据地域结构与空间关系,乡村地域系统由外到内包括城乡融合体、乡村综合体、村镇有机体和居业协同体^[2]。

1978年改革开放以来,中国乡村发展取得了历史性成就,农业生产持续增长、农村经济全面繁荣、农民生活显著改善,“三农”面貌发生了翻天覆地的变化^[4]。然而,深受

收稿日期: 2024-12-23; 修订日期: 2025-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42293270) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42293270]

作者简介: 刘彦随(1965-), 男, 陕西绥德人, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110005331M), 主要从事农业地理学与乡村地理学、地理工程与人地系统科学研究。E-mail: liuys@igsnrr.ac.cn

855-870 页

长期固化的城乡二元结构体制约束，乡村发展仍面临着不平衡、不充分问题，一些地区“乡村病”问题突出，加剧了乡村凋敝衰败^[2, 5]。城乡是一个有机体、命运共同体^[3]。系统性破解“乡村问题”亟需以深化城乡融合为根本路径，建设要素有序对流、结构动态调适、功能互补增值的城乡共生系统，强化城市更新、乡村振兴与城乡融合“三管齐下”的战略协同，通过空间重构、制度创新与治理升级，有效构建城市综合体、乡村综合体与城乡融合体“三足鼎立”的地域格局。

已有研究表明，国外乡村转型研究在经历生产主义和后生产主义阶段后，呈现出明显的社会文化和制度转向，逐渐关注个体的行为、情感以及人地系统耦合等内容^[6-8]，而国内的相关研究侧重在系统科学分析范式下探讨乡村地域系统要素、结构、功能的变化，以及乡村人地关系的交互机理与演化规律^[9-11]。同时，受学科交叉研究不足、乡村基础数据缺乏、技术方法创新不够等限制，乡村地域系统的研究仍以单要素、小尺度、专题性为主，尤其是大数据与新技术的运用仍显薄弱^[12-13]。乡村地域系统理论化、量化、模型化研究不足，导致迄今尚缺乏乡村地域类型生成机制、转型机理与未来情景模拟研究，致使科技支撑乡村振兴战略的后劲不足^[10, 14]。随着以大数据和深度学习为基础的第二代人工智能（AI）的广泛应用，以及学科交叉和技术融合进程的不断加快，信息技术深度应用、创新要素优化配置推动了科技资源开发整合与高效利用能力的持续提升^[15-17]。

乡村是一个具有复杂性、综合性、动态性特点的地域综合体。从多尺度看，市域、县域、镇域、村域等不同尺度呈现出“自上而下”集融合—综合—有机—协同为一体的分级传导多体系统（图1）。能否实现乡村“由衰转兴”取决于乡村能否有效地抑制或阻控城镇化的过度虹吸效应，进而遵循“治病、转型、发展与振兴”的基本规律，科学推进乡村地域多体系统的良性演化和城乡深度融合^[2-3]，实现乡村经济、社会、文化、生态、技术等多系统协调与可持续发展^[18]。从多功能看，乡村地域系统转型是要素转型、结构转型、功能转型的迭代发展，其前提是重塑城乡共生关系、重构城乡融合体系、重建乡村地域功能。从多目标看，农业强国是乡村振兴的战略方向，乡村振兴是建设农业强国的核心路径，二者共同构成中国式现代化的重要基础。乡村振兴战略包含乡村产业、人

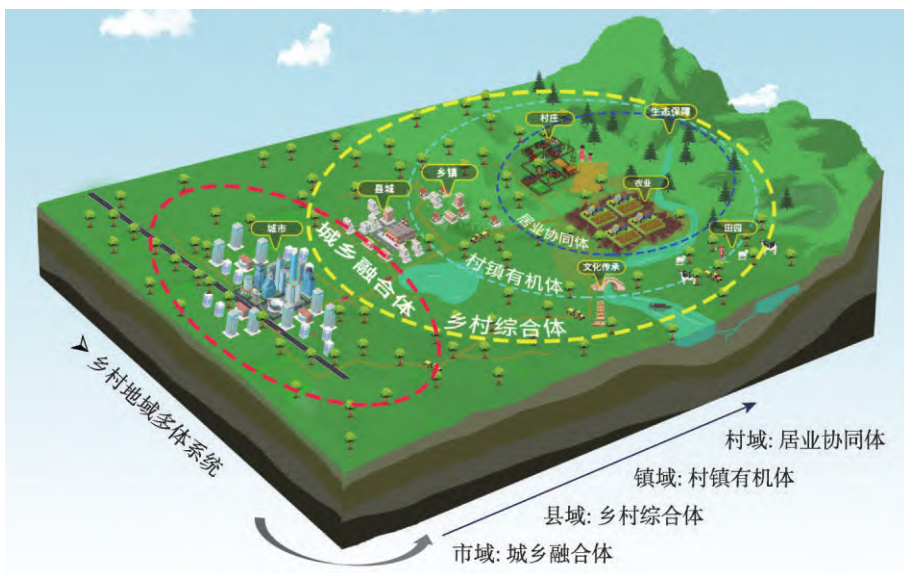


图1 乡村地域系统及其多体结构

Fig. 1 Rural areal system and its multibody structure

才、文化、生态、组织等互为支撑、有机联系的“五大振兴”，其实质是以破解特定时期乡村发展的主要矛盾和突出问题为重点，以提升乡村地域系统的可持续发展能力和竞争力为抓手，其核心目标是遵循乡村发展演化的基本规律，在充分发挥县城“连市带乡”功能的同时，加快构建以村域为单元、城—镇—村一体、人—地—业耦合的乡村地域系统新格局^[2]。因此，应对气候变化、人口流失、村庄空废、文化断层等乡村转型新问题，适应信息化时代大背景和面向中国式现代化新需求，亟需创新全域覆盖的乡村协同观测技术体系、转型机理探测方法与动态评估模拟系统，创建符合中国国情特点、时代特色的乡村地域系统转型理论体系，进而集成多源数据和模型方法等现代信息技术，深入探索乡村从衰退到振兴的科学路径，为新时代推进乡村转型发展迈向更高层次，以及实现农业农村现代化科学决策提供系统性解决方案。

2 创建“三器”平台

乡村地域系统具有复杂性、综合性、动态性等特性，科学开展乡村地域系统转型机理与情景模拟研究，亟需构建多尺度、多要素协同观测体系，整合遥感、统计、社会感知等多源数据，从纵向层级结构与横向子系统组合视角，定量解析乡村地域系统的要素关联及其演化规律，重点突破乡村功能价值核算、转型动态模拟等关键技术，探索创建“三器”（诊断器、探测器、模拟器）综合集成平台，支撑构建乡村地域系统理论体系、协同观测方法体系、管理标准规范体系，为全面推进乡村振兴战略提供理论指导与技术支持。

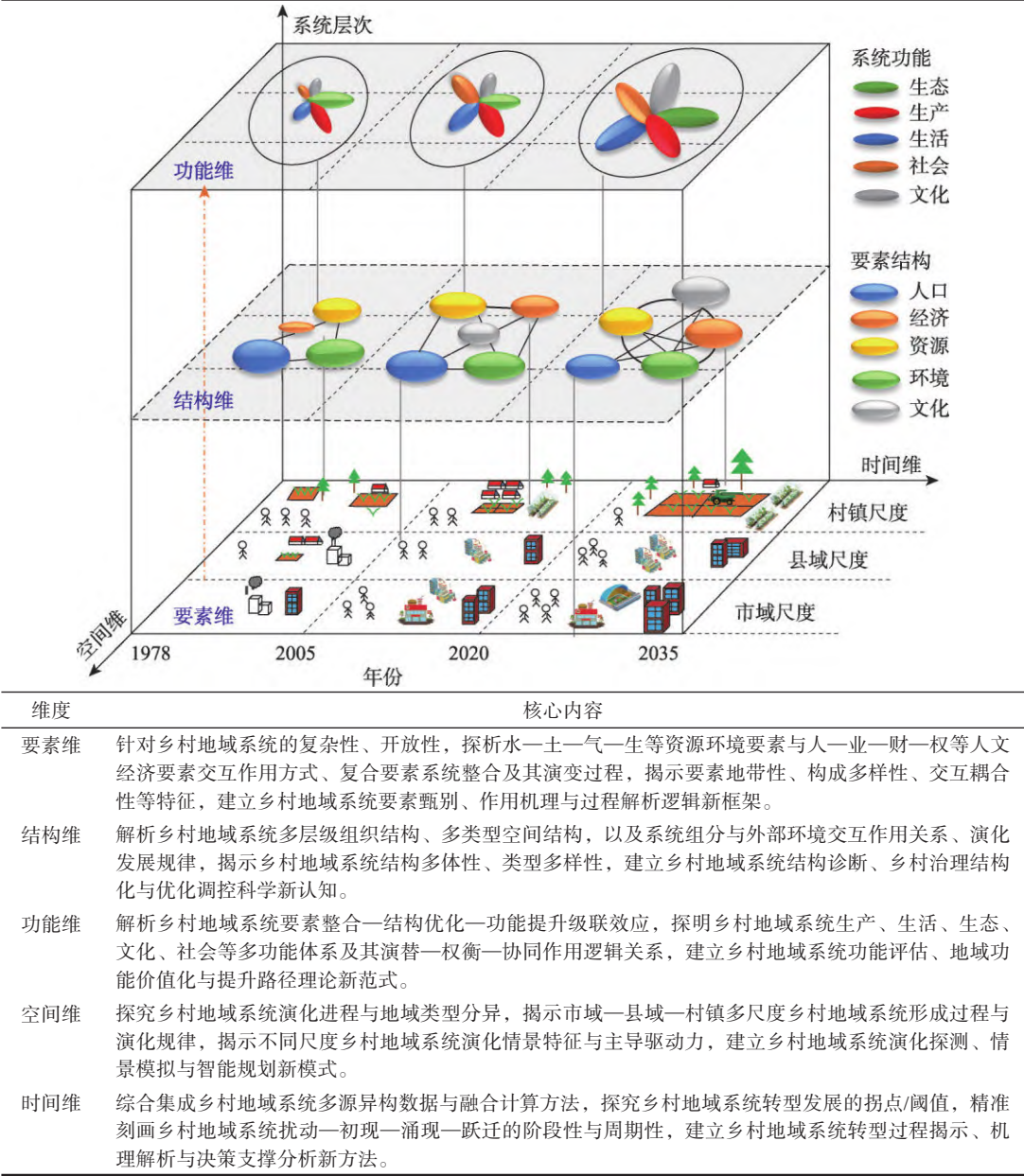
2.1 逻辑思路

实施乡村振兴战略的核心要义在于解决新发展阶段城乡发展不平衡、乡村发展不充分的突出矛盾^[19]。那么，乡村发展不充分是如何形成的？如何开展乡村地域系统的协同观测、科学探知与综合诊断？这既是重大的战略问题，也是重要的科学问题。面向乡村地域系统前沿科学问题，现代乡村地域系统转型机理与情景模拟研究要以推进人文地理学与信息地理学、自然地理学交叉融合为重要抓手，针对乡村地域系统要素、结构、功能，以及系统演化、转型动态过程（表1），重点沿着“一条主线”、着眼“两个视角”、瞄准“三层目标”、聚焦“四体系统”、搭建“五大体系”，深入揭示乡村地域系统转型机理与过程，创建乡村地域系统协同观测体系，探明乡村地域系统转型动态情景，实现乡村地域系统指标数据可定制、主控要素可探测、功能价值可计算、情景格局可视化、标准规范可推广。

（1）一条主线：遵照地理学研究的基本范式，针对乡村地域系统的多要素、多功能、多尺度特性，从系统的本质特征与现实出发，沿着“要素—结构—功能”的逻辑主线，重点揭示乡村地域系统的要素流动、要素结构与地域功能演化过程，创建乡村地域系统协同观测体系与多源数据融合模型，模拟乡村地域系统转型发展动态情景，提炼未来乡村转型发展情景格局及其乡村振兴科学路径。

（2）两个视角：着眼纵向和横向两个视角解析乡村地域系统演化机理、过程、格局与路径。从纵向看，将乡村地域视为由城市、县城、乡镇、村庄等多层级聚落体系构成的空间系统；从横向看，乡村地域系统是城镇、农业、村庄、乡域等不同类型的组合，包括城镇系统、农业系统、村庄系统、乡域系统等子系统。横向与纵向两个视角构成了乡村地域系统立体观测研究总体架构，更好地揭示乡村地域系统演化过程、转型机理与情景格局。

表1 乡村地域系统理论体系构建思路
Tab. 1 Ideas for constructing a theoretical system of the rural areal system



(3) 三层目标：聚焦创新学科发展、创建技术方法和服务国家决策的需要，设定三层研究目标：一是创新乡村地域系统理论体系，推动人文地理学（乡村地理学）与信息地理学、自然地理学等学科交叉融合，发展现代人地系统科学与乡村振兴科学；二是创建乡村地域系统协同观测体系，解决当前乡村研究数据缺失、精度不足、难以获取等问题，实现“可计算乡村”的目标；三是构建乡村地域系统转型情景模拟方法与模型，探明乡村振兴科学路径与管理标准规范体系，将乡村地域多体系统、多级目标与“三主三分”空间组织体系相融合，服务支撑国家乡村振兴重大战略决策。

(4) 四体系统：以乡村地域“四体系统”^[2]为具体研究对象，深入探究乡村地域系统形成与演进过程、转型机理与路径、未来情景与格局，准确把握乡村地域系统转型发展的本质特征及一般规律，深度解析乡村地域多体系统的多层级纵向传导、跨区域横向联动的时空格局，探明乡村地域系统结构化动态机制，以及通过整合乡村资源、优化空间布局、强化治理效能等方式推动乡村振兴的内在逻辑。

(5) 五大体系：从乡村地域系统功能的视角，将其识别为聚落体系、产业体系、生态体系、文化体系、设施服务体系等五大体系，分别承载生活功能、生产功能、生态功能、文化功能、社会服务功能。重点围绕乡村地域系统的“五大体系”，探究乡村地域的多功能演化及其主体功能生成机制，揭示乡村地域系统转型机理、演化过程、未来情景及其优化调控路径。

2.2 技术路线

按照“理论创建—协同观测—过程机理—情景格局—科学路径”的技术路线，解析乡村地域系统与乡村振兴的科学内涵，揭示乡村地域系统要素、结构、功能的分异特征，阐明乡村地域系统演化规律与转型机理，提出乡村地域系统转型“诊断器”；构建“天—空—地—网”协同观测与多源数据融合方法体系，创建协同观测指标体系与数据共享应用平台，研制乡村地域系统转型“探测器”；建立乡村地域系统发展状态评估与情景模拟方法，研发转型情景“模拟器”，模拟全国和典型地区乡村地域系统转型情景格局，提出乡村振兴科学路径及其管理标准规范体系。在此基础上，研制乡村地域系统转型诊断、探测、模拟器功能模块封装标准与接口规范，利用云计算和大数据技术研发松耦合、多粒度、一体化的乡村地域系统转型诊断—探测—模拟综合集成平台（图2）。

(1) 转型过程“诊断器”。“诊断器”是用以诊断乡村地域系统转型机理与过程的模型工具。通过文献荟萃分析和不同类型案例剖析，引入复杂系统理论、耗散结构理论，开发复杂系统要素多层级时空演化分析模型、转型测度与机理解析模型，建立复杂系统

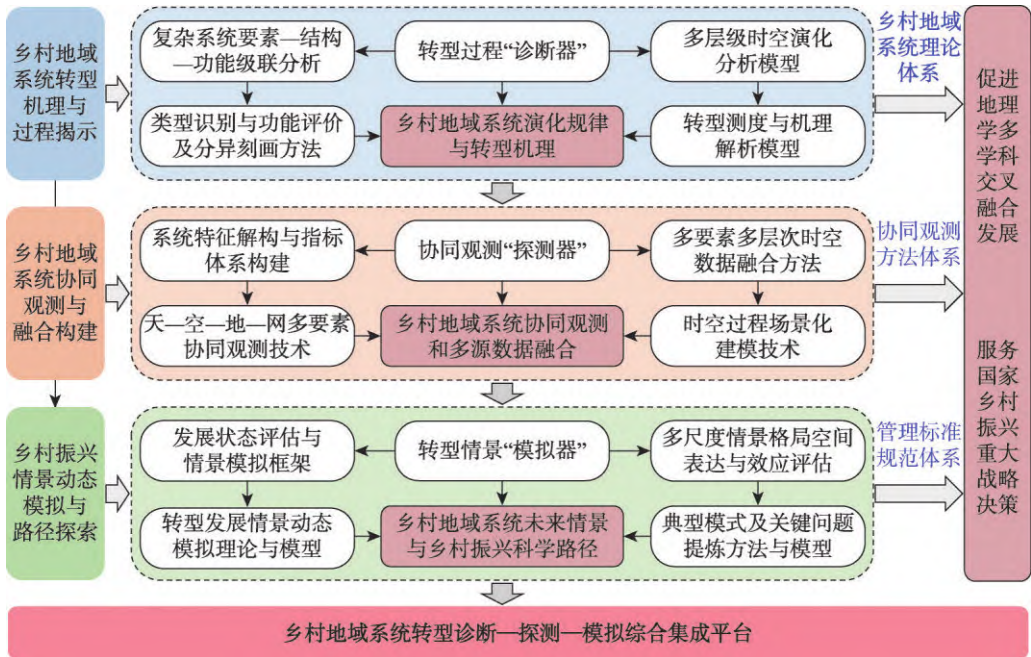


图2 乡村地域系统转型机理与情景模拟研究技术路线

Fig. 2 Flowchart for the research on the transformation mechanisms and scenario simulation of rural areal system

要素—结构—功能级联分析体系,科学识别乡村地域系统主导类型、评估主要功能、解析功能分异规律,探明乡村地域系统关键要素的互动关系与结构特征、乡村地域系统转型关键过程和乡村地域系统时空演化一般规律,支撑创建乡村地域系统理论体系。

(2) 协同观测“探测器”。“探测器”是用以探测乡村地域系统多要素交互作用及其时空变化的模型工具。面向乡村地域系统转型机理和情景模拟的定量研究需求,构建“定制式”乡村地域系统综合指标体系,集成遥感探测、部门统计、行为观测、社会感知等多种手段,发展乡村地域系统“天—空—地—网”一体化协同观测技术体系,建立刻画关键要素的多源异构数据时空融合方法,创新多层次、多维度、多时相场景化建模技术,研制集成指标体系、协同观测和数据融合的共享应用平台,支撑乡村地域系统转型机理揭示和情景模拟研究。

(3) 转型情景“模拟器”。“模拟器”是用以模拟乡村地域系统转型与发展情景格局的模型工具。基于国内外情景模拟技术方法的比较分析,构建乡村地域系统转型发展参照系和目标场景表达规则,形成多目标情景参数与模拟规则集;基于乡村地域系统转型过程与规律,研制乡村地域系统转型发展状态评估模型,发展乡村地域系统转型图谱表达和情景模拟理论与模型方法,实现多目标下全国和典型区域乡村地域系统情景格局的可视化表达、转型状态的精准评估与转型模式提炼,支撑创建乡村振兴科学决策与管理标准规范体系。

2.3 研究方法

着眼多学科理论交叉和方法融合的需要,推进乡村地域系统转型机理与情景模拟研究的主要方法涉及理论解析与规律识别方法、协同观测与融合计算方法和情景模拟与路径探索方法。其中,乡村地域系统理论解析与规律识别聚焦于通过多科学方法集成形成对乡村地域系统及其地带性、地域性、地方性规律的科学认知,乡村地域系统协同观测与融合计算侧重于搭建乡村地域系统多要素“天—空—地—网”智能协同观测技术和多要素跨模态时空融合计算方法体系,乡村地域系统情景模拟与路径探索重点关注乡村地域系统协同发展评估、转型情景模拟与可视化以及未来乡村地域系统科学发展路径(图3)。

(1) 理论解析与规律识别方法。着眼乡村地域系统多尺度视角及其地带性、地域性和地方性特征,构建涵盖RAS自然气候特征(N)、地域环境特征(A)、交通设施特征(T)、城乡关联特征(U)、资源禀赋特征(R)和经济发展特征(E)的系统分层诊断模式(NATURE)。在地带性层面,解析乡村地域系统的自然地理要素(如温度、降水、地形等),通过空间叠置、重心演化模拟、空间趋势分析等方法探究RAS的地带性规律;在地域性层面,借助Google Earth Engine进行RAS关键要素监测评估,同时应用深度学习方法进行乡村系统要素识别、类型划分及典型乡村地物提取。采用局部轮廓树方法进行区域城乡空间范围提取和空间格局分析。运用多尺度地理加权回归模型分析乡村地域系统转型发展态势、影响因素及动力机制。利用多智能体系统模拟揭示乡村地域系统转型过程及其地域分异规律;在地方性层面,利用数量特征预测模型、空间概率预测模型、空间优化模型进行资源环境要素耦合、乡村经济社会发展态势模拟,探明乡村地域系统子系统分异特征与优化路径。

(2) 协同观测与融合计算方法。依据乡村地域系统分区—分类—分级原则,建立“天—空—地—网”智能协同观测技术体系,研制乡村地域系统协同观测技术方案,主要涉及卫星数据获取时间和周期、无人机的采样区域和周期、物联网和社会感知网络的数据获取范围,以及地面调查数据的内容和调查的频次,实现平台协同、时间协同、参数协同、尺度协同和计算协同。为细化观测指标,提高融合计算能力,根据具体研究尺度

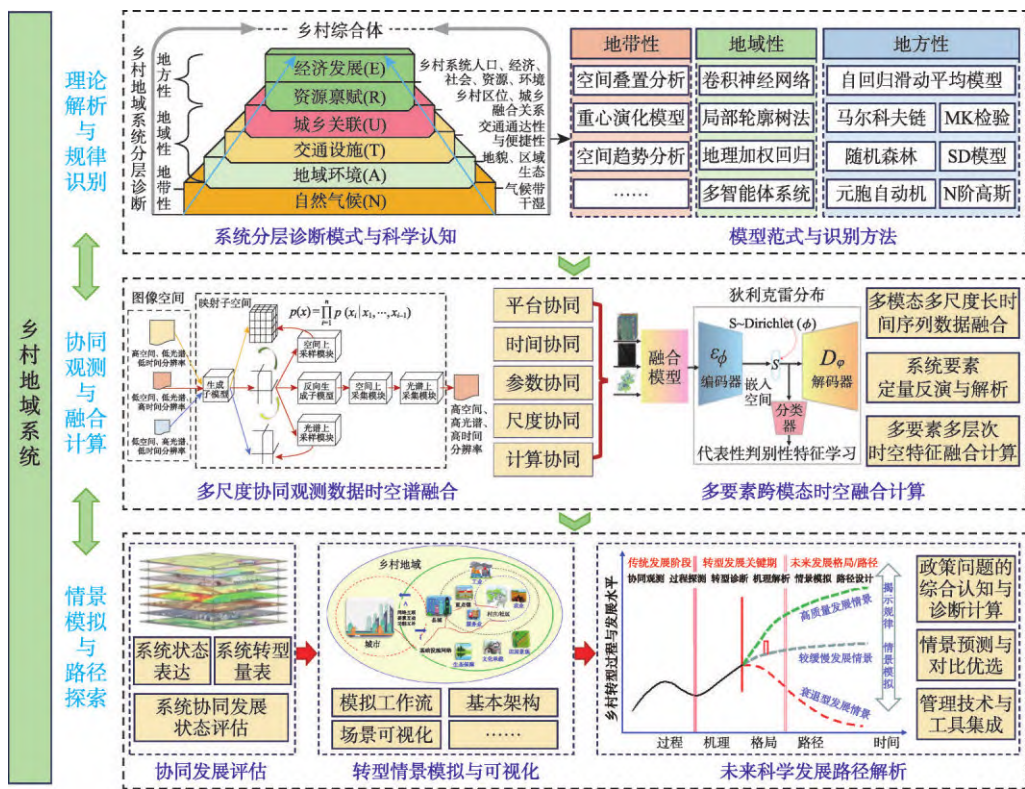


图3 乡村地域系统转型机理与情景模拟研究技术方法

Fig. 3 Technical-methodology for the research on the transformation mechanisms and scenario simulation of rural areal system

及精度需求，实现遥感、无人机、地面监测数据的多要素、跨模态时空融合计算方法体系，主要包括时空谱融合、光学、SAR图像、社交媒体等异质数据融合，以及遥感与地面站点多尺度数据融合，推动数据—模型—知识驱动的大范围乡村地域系统要素定量反演与解析。

(3) 情景动态模拟与路径探索方法。采用时空分析、规律挖掘、信息重组等方法探究乡村地域系统多维图谱构成与生产流程，建立乡村地域系统图谱体系，从图形角度认知乡村地域系统协同特征。从地理网络视角构建不同尺度下的乡村地域系统协同发展状态评估模型，考察节点及节点间连接的特性，探索乡村地域系统在多因素综合作用下的复杂过程。结合乡村地域系统多功能空间分异特征及类型识别，提出面向不同类型乡村地域系统的振兴目标及其参数化方案；通过现代信息技术和计算机工程手段，引入“决策剧场”工具，整合指标统计分析、模型库开发、场景可视化表达等技术，实现乡村地域系统转型发展模拟及其可视化；按照乡村振兴战略总要求，研制可推广、可复制的乡村振兴与管理标准规范体系，提出推动乡村全面振兴的科学路径。

3 构建“三大”体系

乡村地域系统是人文与自然多要素耦合形成的多体系统^[2]。深入探究乡村地域系统转型前沿科学问题，科技服务乡村振兴国家战略，亟需推进人文地理学与自然地理学、信

息地理学等多学科交叉融合，聚焦乡村地域系统转型机理与过程揭示、乡村地域系统协同观测与融合构建、乡村振兴情景动态模拟与路径探索等“三项”主要任务，创建乡村地域系统理论体系、协同观测技术体系、管理标准规范体系等“三大”体系（图4），为实施乡村振兴战略与规划决策提供科学依据。

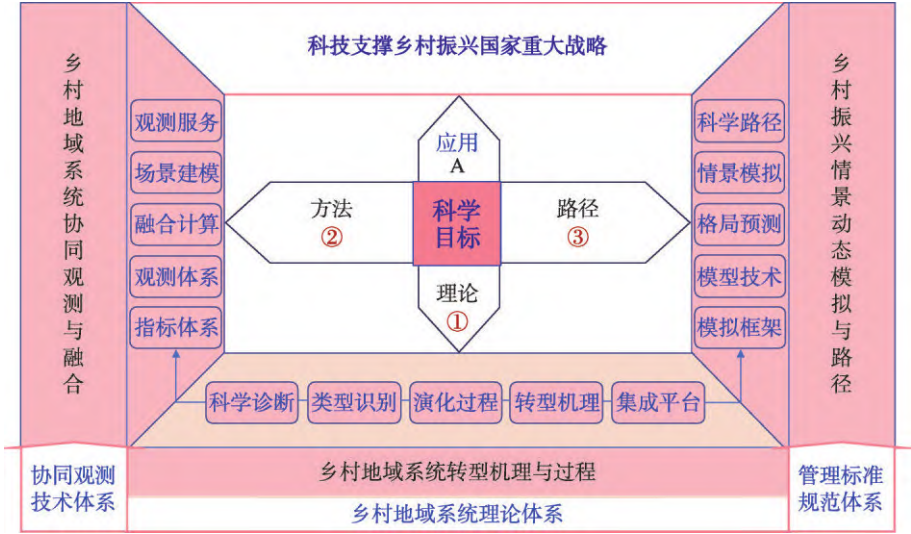


图4 乡村地域系统转型机理与情景模拟的逻辑框架

Fig. 4 Logical framework for transformation mechanisms and scenario simulation of rural areal system

3.1 乡村地域系统理论体系

立足系统科学研究范式，遵循结构形态—类型分异—过程机理的研究主线，通过跨学科理论与方法融合、协同观测多源数据融合和典型乡村案例研究，深度解析乡村地域系统的复杂性、动态性特征，揭示乡村地域自然—社会—技术多要素交互作用过程，探明系统要素—结构—功能交互促进乡村地域系统演进的动力机制，研制乡村地域系统转型发展测度模型，创建乡村地域系统演化过程—转型机理—情景格局模拟理论体系。

（1）乡村地域系统与乡村振兴科学内涵。着眼于乡村地域系统人地关系结构（图5），探究各子系统与乡村振兴的对应关系，以及系统整体优化与乡村振兴目标的耦合机理，构建乡村地域系统理论研究、方法集成与振兴路径研究范式。阐明乡村地域系统内涵与范畴，深度解析不同子系统的多要素层级关系，以及人文、经济、资源、环境等主导要素演进过程，探明构成乡村地域系统的稳定要素、多变要素和新要素的分异及其演变趋势，进而甄别精准刻画乡村地域系统演化的关键指标、转向特征和人—地—业耦合机制。剖析不同类型乡村地域系统空间形态，解析乡村地域系统空间粒度和幅度特征，揭示乡村地域系统的多体关联模式及其交互作用原理，提出乡村地域系统空间形态与结构分析理论框架和多体结构认知理论。

（2）乡村地域系统类型识别与功能分异。解析不同类型乡村地域系统的特征及其自然—经济—社会关键影响因素，形成基于系统地带性、地域性、地方性特征的多级识别体系，建立乡村地域系统主要类型识别模型，进而分析不同类型系统的空间特征，并探明其影响因素。探究系统多功能属性及其演进规律，揭示系统功能形成环境、系统演化机理，以及系统主导功能稳定性维持机制，探究乡村地域多体系统演化过程中的功能转换模式、区域分异规律。科学认知乡村地域系统要素整合—结构优化—功能提升的级联

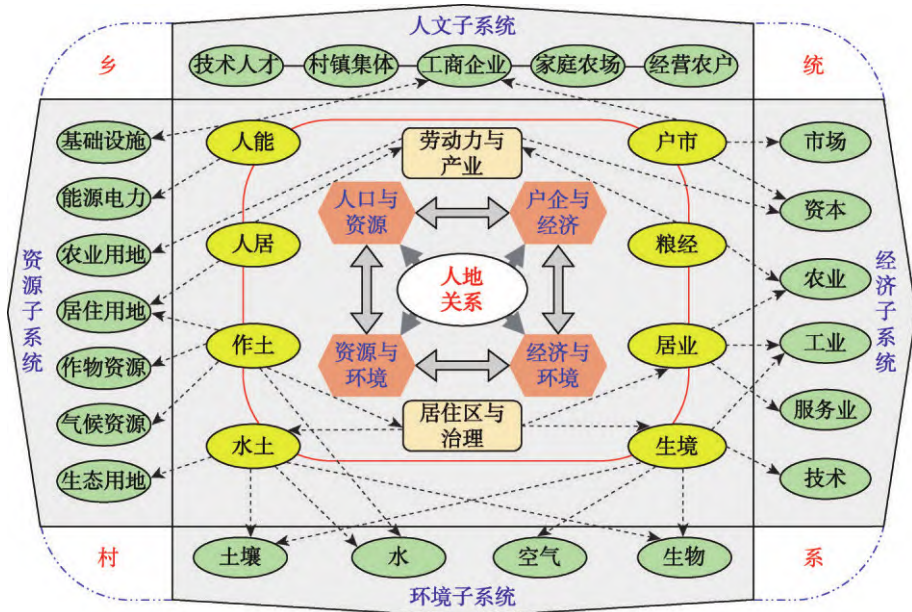


图5 乡村地域系统要素结构及其关系网络

Fig. 5 Elements and structure of rural areal system and its relation network

效应，建立内外力协同作用的乡村地域系统功能演替—权衡—协同的逻辑关系及理论范式，探明乡村地域系统功能实现的主导影响因素，提出乡村振兴目标导向下促进乡村地域系统功能协调、功效发挥、竞争力提升的创新路径。

(3) 乡村地域系统演化过程与驱动机制。基于“天—空—地—网”协同观测获取多源长时序数据，建立乡村地域综合体诊断分析模型，解析典型乡村地域系统城市—县城—乡镇—村庄多层级聚落体系演化过程，厘清乡村地域综合体空间格局演化拐点及其规律。定量模拟乡村地域系统主导驱动因素变化特征，综合集成协同观测时空数据、社会经济统计数据、实地调研数据等多源异构数据，构建乡村地域系统演化主导驱动因素变化测度模型，科学识别典型乡村地域系统时空演化过程与变化规律。采取“解剖麻雀”的案例研究方式，深入剖析乡村地域演化格局及其关键驱动力，定量诊断各驱动力对系统演化的贡献系数，据此判定乡村地域系统结构与功能演化主导因素，解析多尺度、多类型乡村地域系统演化的共性特征、关键参数及主导驱动力。

(4) 乡村地域系统转型机理与诊断模型。基于乡村地域系统要素—结构—功能分析及其演化机理解析，利用协同观测多源数据，以典型样地区为训练样本，构建乡村地域系统转型探测综合指标体系，建立乡村地域系统及其子系统差异度、转型度、协调度量化分析模型和转型诊断方法体系，定量识别乡村地域系统要素、结构、功能转型阈值或拐点，深入探究不同类型乡村地域系统由基础稳态向衰退、停滞或振兴演进过程，揭示系统转型的普适性特征，重点揭示各子系统指标由涌现到跃迁转型机理与变化过程，探究系统核心要素、关键结构、主导功能转型的主导诱发因素，探明乡村地域系统由衰退向振兴转型机理及传导机制（图6）。

3.2 乡村地域系统协同观测体系

面向乡村地域系统转型机理与情景模拟研究的定量数据需要，建立专门化和定制式的观测指标体系，创建多源、异构、多模数据及其高效汇集、管理的乡村地域系统协同

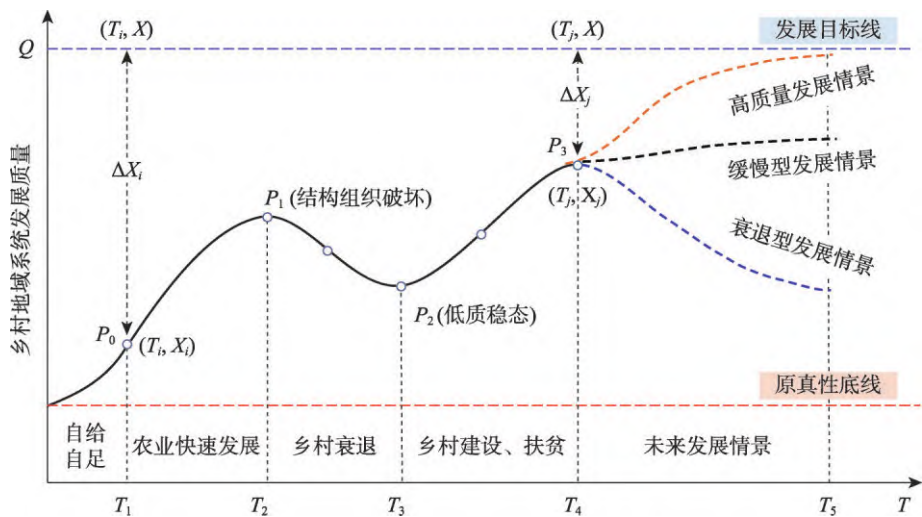


图6 中国乡村地域系统转型历程

Fig. 6 The transition process of rural areal system in China

观测技术体系，通过发展多模型耦合的地理空间信息模型实现乡村地域系统要素、结构、场景等多维度建模与可视化分析，研制乡村地域系统协同观测数据应用与服务系统，为转型机理研究、未来情景模拟和科学路径设计等提供数据支撑、计算平台、场景建模工具和“定制式”基础数据服务，研制刻画乡村地域系统演化过程“探测器”，进一步优化提升协同观测技术手段和融合计算模型方法。

(1) 乡村地域系统特征解构及指标体系。基于乡村地域系统的理论认知，厘清乡村地域系统演化过程和转型发展的关键特征及其定量分析方法，明确协同观测对象的主要参数及其逻辑关联。面向乡村地域系统转型过程揭示、情景模拟等研究需要，剖析现有指标数据获取、观测技术优劣势及其互补性，提出适合乡村地域系统关键要素、结构、功能研究需求的天—空—地—网协同观测指标类型及其主要内容。进而从供给与需求出发，建立协同观测分类指标框架，确定现有可观测指标、新设观测指标、细化观测指标、待挖掘观测指标和定制性观测指标，建成多类型、多参数的乡村地域系统协同观测指标体系。

(2) 乡村地域系统天—空—地—网多要素协同观测技术体系。建立任务驱动、指标牵引、知识引导的天—空—地—网协同的乡村地域系统观测体系，构建面向任务要求的协同规划模型，突破观测资源时空分配和协同模式动态优化的技术瓶颈。研制乡村地域系统协同观测方案，设计地面调查数据内容和调查频次，对协同观测任务进行科学分类，并基于任务驱动优化天—空—地—网协同智能观测方案，实现平台协同、时间协同、参数协同、尺度协同和计算协同。依托多源数据高效存储方法建立数据库，并针对不同数据结构设计空间索引和时间索引算法，开发对多源数据之间的跨域管理做混合式索引，进而基于多源数据潜在的关联和乡村地域系统要素结构间关系研究领域知识图谱，构建乡村地域系统样本库和知识库，实现可拓展的样本标记机制，为时空融合计算和要素精准识别奠定基础。

(3) 基于知识的多源数据高效融合计算的理论与方法。通过耦合几何关系的多模态多尺度时间序列数据融合提高融合计算能力，探索多源数据形成机理，并综合不同模态数据中的不同高分辨率信息实现观测影像时—空—谱融合和光学图像非光学图像融合，

提升数据在不同维度的分辨率，精细刻画乡村地域系统演化过程及其规律。利用要素间的几何、物理和上下文等关系，构建知识图谱，针对数据结构选择最佳特征提取方式，利用自监督、自注意力等机制，构建深度学习模型，提取包含语义信息的非局部特征向量。针对不同任务和需求，采用图自注意力机制融合不同模态的特征向量，实现多模态数据协同观测与融合计算（图7）。

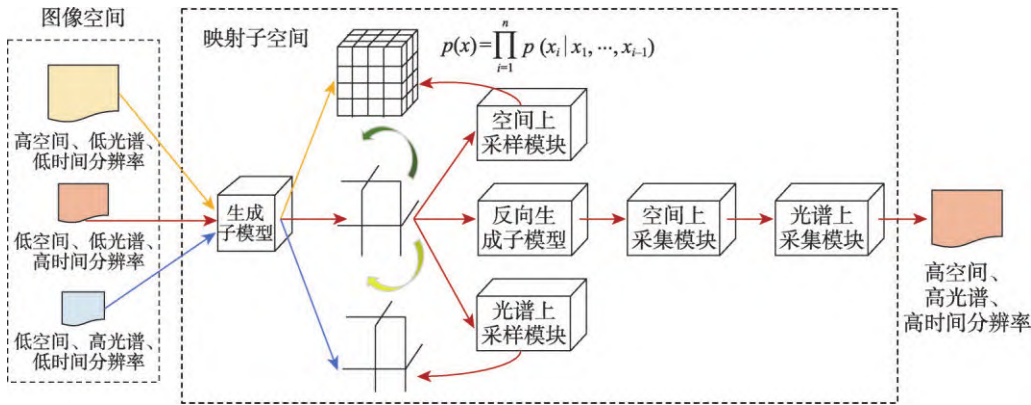


图7 乡村地域系统遥感图像时空谱融合体系

Fig. 7 The temporal-spatial-spectral fusion system for the remote sensing imagery of rural areal system

（4）乡村地域系统复杂地表要素智能认知理论与方法。面向数据—模型—知识驱动的人工智能解译技术，构建顾及参量反演的时变要素精细分类、结构复杂要素精细分类的深度学习模型，发展乡村地域系统智能解构分区方法及要素结构解译技术框架，建立样本库智能优选、分区布设、知识迁移等技术体系。研制数据—模型—知识驱动的生态环境要素定量反演、识别与变化检测算法库，实现复杂时变和复杂空间结构地表要素从粗到精的智能解译。分析乡村地域系统要素的几何和物理特征、不同要素间的相互关系，以及在观测数据中的表现形式，构建要素结构特征间的统计约束关系和内在物理关联。研究大规模地表要素平行建模技术，构建物理建模与机器学习建模联合驱动的不同类型地表要素的自动拓扑表达，建立保持要素形态、语义与格式塔特征的约束能量函数，发展多模型耦合的多源地理空间信息模型，提出多层次、多维度、多时相的乡村地域系统场景化建模技术方法。

（5）乡村地域系统协同观测与应用平台。基于云计算技术建立包括基础设施层、数据服务层、算法技术层、应用支撑层、用户服务层的乡村地域系统协同观测与服务平台，同时开放数据接口以实现乡村地域系统平台和多个数据平台的数据获取和传输，并对遥感数据、部门统计数据、物联网数据、调查数据、社会感知数据等多源数据进行有效管理。针对不同类型区的研究需求调用不同融合计算模型，根据指标公式计算乡村地域系统要素、结构、功能等不同层次指标。针对部门统计、地面调查等数据的滞后性，以及部分要素参数的不易获取性，联合多源遥感数据和部门统计/地面测量数据，实现先验知识与多源遥感数据支持的乡村人文、经济、生态、环境等要素关键参数估算与定量反演。

3.3 乡村振兴管理标准规范体系

基于乡村地域系统协同观测技术和转型机理研究，创建乡村地域系统转型与乡村振兴情景模拟的理论框架，开发多尺度乡村地域系统协同发展评估模型与技术方法，建成乡村地域系统转型格局“模拟器”，并系统模拟和预测未来30~50年中国乡村地域系统转型与振兴的多维情景。提出不同情景下乡村地域系统转型与振兴的目标体系、总体格局

和协同发展状态，探究典型乡村地域系统从衰退到振兴的科学路径，进而建立乡村振兴管理标准规范体系，服务支撑乡村振兴国家重大战略（图8）。

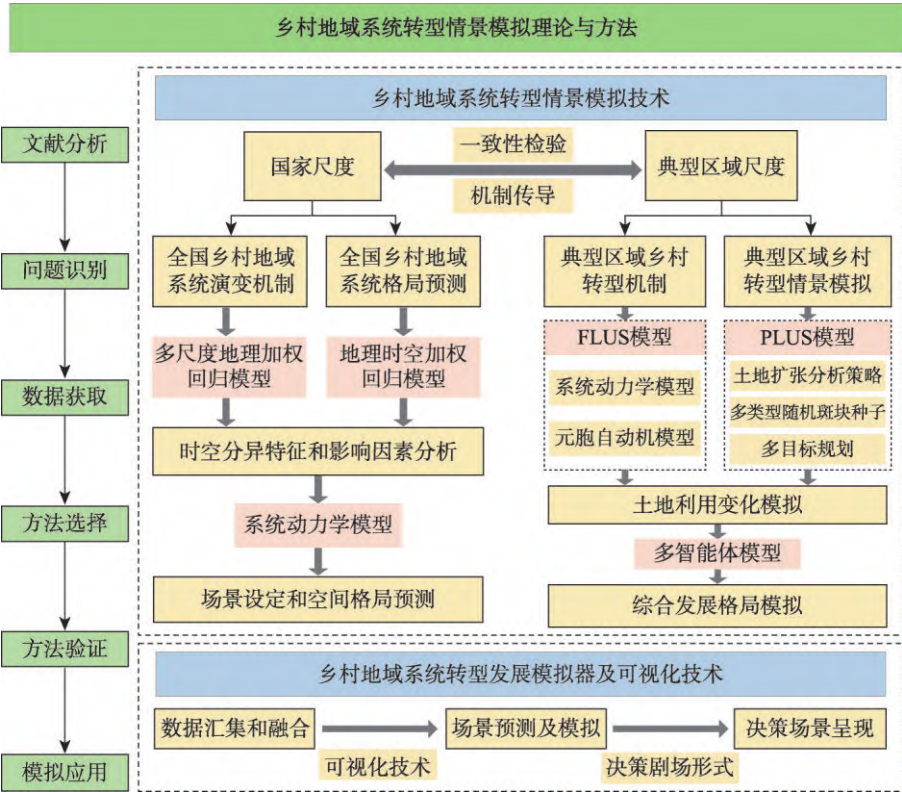


图8 乡村地域系统转型情景模拟研究技术方法

Fig. 8 Research technical-methodology for the scenario simulation of rural transformation development

- (1) 乡村地域系统协同发展状态评估与模拟框架。借用地理信息图谱、复杂网络、系统动力学模型、拟合诊断、统计分析等多学科分析方法，构建多尺度乡村地域系统状态评估模型，诊断乡村地域系统演化状态及其振兴潜力。在乡村地域系统要素交互作用及其演化机理认知的基础上，构建宏观层面乡村地域系统要素协同状态评估方法，在典型区域尺度构建乡村地域系统功能协同状态评估模型，同时建立乡村地域系统状态的多维信息图谱，据此提出面向未来不同发展情景的乡村地域系统转型情景模拟框架。
- (2) 乡村地域系统转型情景模拟理论与方法。基于乡村地域系统演化规律与转型机理分析，构建乡村地域系统转型多尺度、多情景、多要素模拟模型并进行验证，探讨不同尺度模拟结果之间的一致性及其传导机制。构建多尺度动态情景模拟器，搭建决策剧场预测乡村地域系统适应性演化过程。考虑不同空间尺度转型问题识别、目标约束条件、近远期模拟精度和数据可获得性等具体因素，优选最适宜模型深入开展乡村地域系统转型情景模拟。
- (3) 乡村地域系统转型总体格局模拟和预测。着眼于农业农村现代化的发展目标，模拟预测未来50年中国乡村地域系统转型发展的多维情景，诊断关键时间节点乡村地域系统转型发展状态，研判未来乡村地域系统转型的空间格局及其特征。揭示不同情景下中国乡村地域系统发展特征及其资源环境效应，剖析未来乡村地域系统转型发展的多维情景，进而提出乡村振兴分阶段主要指标及其科学调控目标。

(4) 典型区域乡村振兴情景模拟及其决策应用。科学研判典型地区乡村转型发展情景,模拟典型地区乡村地域系统转型发展格局及其特征。定量测度典型地区乡村地域系统的多情景振兴指数,揭示不同发展情景下乡村振兴成效及其影响因素和主要问题。基于多情景乡村振兴模拟与评估结果,提出支撑乡村振兴科学规划准则及其决策应用场景。

(5) 乡村振兴科学路径及其管理标准规范体系。结合情景模拟和典型调研,识别乡村衰退、转型与振兴的关键问题和现有政策短板,提炼乡村振兴典型模式,搭建乡村振兴典型地域模式谱系。例如陕西绥德农文旅跨界融合、佳县多业态深度结合,河南灵宝土特产多业并举、兰考田园村协同治理等典型模式,既发挥了黄河流域的资源优势,又凸显了系统转型的地域特征。因此,亟需基于乡村地域系统转型原理、发展定位、未来情景等进行不同类型区域乡村转型发展路径遴选,探明典型乡村从衰退到振兴的科学路径。制定服务乡村振兴的标准管理规范构建原则,探究管理规范应用场景和凝练乡村振兴管理标准规范体系。

4 结论与讨论

乡村地域系统转型机理与情景模拟研究是服务支撑乡村振兴国家重大战略的前沿科学命题。本文立足乡村地域系统的复杂性、动态性与综合性特征,通过多学科理论交叉与方法集成,构建了“理论体系—协同观测—情景模拟”三位一体的研究框架,揭示了乡村地域系统要素关联及其演化规律,创建了乡村地域系统转型机理与情景模拟的“三器”平台和“三大”体系,为全面推进乡村振兴战略规划和着力破解乡村发展不充分问题提供了科学依据。

(1) 着眼于乡村地域系统的特性,在协同观测技术与大数据支撑下阐明乡村地域系统要素—结构—功能级联效应及其驱动机制,科学揭示乡村地域系统演化拐点规律、功能分异机理及振兴转型阈值,探索形成乡村地域系统要素—结构—功能的综合研究技术方案,建成乡村地域系统转型“诊断器”,建立乡村地域系统演化过程—转型机理—情景格局模拟理论体系,提升地理学特别是乡村地理学基础理论水平和研究解决乡村发展实际问题的创新能力。

(2) 面向乡村地域系统转型定量研究的迫切需要,研发定制化协同观测指标体系与智能解译算法库,创建多源、异构、多模数据及其高效汇集、管理的乡村地域系统协同观测技术体系,建立多源数据融合与挖掘技术方法及其共享平台,建成乡村地域系统转型发展“探测器”和乡村地域系统定量化、可视化分析模块,通过学科交叉与集成创新,提升信息科学支撑乡村地域系统定量研究的技术水平和共享服务能力,为创建“可计算乡村”提供技术支撑。

(3) 基于乡村地域系统转型理论研究和协同观测技术,开发多尺度乡村地域系统发展状态评估模型,研制乡村地域系统转型“模拟器”,系统模拟和预测未来中国乡村地域系统转型与乡村振兴多维情景,提出不同情景下全国及典型区域乡村振兴阶段目标、差异格局与科学路径,进而创建乡村振兴管理标准规范体系,为乡村振兴战略实施提供情景预演工具与决策依据。

新时代以大数据、人工智能、物联网为代表的科技进步正在重塑乡村地域系统研究的范式与方法^[9, 15, 17, 20]。协同观测技术、高分辨率遥感、社会感知数据等新手段的应用,已突破了传统城乡二元数据割裂的局限,也克服了传统乡村地域系统研究中数据碎片化、时空分辨率不足等瓶颈,使多源异构数据的实时采集与动态分析成为可能^[21-23]。这些技术

革新不仅推动了乡村要素、结构、功能特征的定量解析,更催生出“数据驱动”与“机理驱动”融合的研究新路径^[17, 24]。未来乡村地域系统研究需要进一步强化跨学科协同与多尺度耦合创新,通过创新集成数字孪生、多学科交叉等方法,系统构建情景模拟工具,深度解析乡村地域系统转型的多维驱动机制与动态阈值。一方面,随着农业强国、碳中和、数字乡村等国家战略的纵深推进,乡村地域系统功能定位已从单一生产空间转向生态—经济—文化复合空间,亟需融合地理学、生态学与计算机科学等多学科理论,创新地理工程学、地理智能学等交叉学科,创建复杂要素综合性分析框架,揭示现代治理体系下乡村要素流动、结构适配、功能迭代的复杂传导规律。另一方面,乡村地域系统转型机理与情景模拟仍需突破“静态性”“局部化”的局限,通过构建全球—国家—区域—社区多级联动的模拟系统,深入揭示外部环境扰动(如气候变化、全球化波动等)与内生动力(如乡土文化韧性、数字技术嵌入等)的交互机制、演化过程和情景格局。

针对乡村人地系统耦合研究中存在的多元机制交叉性、多变环境复杂性以及多维目标协同性等科学挑战,亟需聚焦乡村作为复杂适应系统(CAS)的本质特性,通过协同观测与探测、大数据与模型构建、转型机理与情景模拟,深入探究如何利用现代遥感、人工智能、复杂网络分析等集成技术,模拟揭示乡村地域系统的非线性演化规律、乡村经济—社会—生态(ESE)复合系统韧性,以及如何通过创建“乡村振兴实验室”,探索“实验性治理”和“政策性效应”,有效突破“本土化”理论,进而基于多类型案例归纳提炼,提出中国特色的乡村治理普适性理论和可推广模式。本文初步构建了面向乡村地域系统转型与乡村振兴战略的乡村地域系统理论研究、方法集成与振兴路径研究范式,通过地理科学—技术—工程—实践(Geo-STEP)的系统集成,创建破解区域协调与城乡融合发展难题的时空大模型及关键工具^[25],探明系统整合地理科学(Science)理论建构、地理技术(Technology)系统突破、地理工程(Engineering)场景设计和地理实践(Practice)价值转化的协同新路径,形成地理过程机理揭示—地理模型算法研发—地理工程场景应用—地理实践示范引领的融通新机制。在此过程中,现代地理学应主动对接国际科学前沿和国家战略需求,以Geo-STEP全链条创新为核心,推动乡村地域系统研究从“问题解释”向“未来设计”“科学治理”跃迁,引领推进乡村全域创新、系统转型与乡村振兴内源发展^[26],进而为全球乡村可持续发展提供兼具理论原创性和实践适配性的中国方案。

参考文献(References)

- [1] Law of the People's Republic of China on the Promotion of Rural Revitalization. Farmers' Daily, 2021-04-30. [中华人民共和国乡村振兴促进法. 农民日报, 2021-04-30.]
- [2] Liu Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 637-650. [刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650.]
- [3] Liu Yansui, Zhou Yang, Li Yuheng. Rural regional system and rural revitalization strategy in China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2511-2528. [刘彦随, 周扬, 李玉恒. 中国乡村地域系统与乡村振兴战略. 地理学报, 2019, 74(12): 2511-2528.]
- [4] Wei Houkai, Liu Changquan. The outline, experiences and prospect of China's rural reform. Chinese Rural Economy, 2019(2): 2-18. [魏后凯, 刘长全. 中国农村改革的基本脉络, 经验与展望. 中国农村经济, 2019(2): 2-18.]
- [5] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside. Nature, 2017, 548(7667): 275-277.
- [6] Li Simeng, Yang Ren, Long Hualou. The theoretical evolution of global rural development and its enlightenment to rural modernization in China. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(4): 854-872. [李思梦, 杨忍, 龙花楼. 全球乡村发展理论演化及其对中国乡村现代化的启示. 地理学报, 2024, 79(4): 854-872.]
- [7] Cloke P, Goodwin M. Conceptualizing countryside change: From post-fordism to rural structured coherence. Transactions of the Institute of British Geographers, 1992, 17(3): 321-336.
- [8] Woods M. Rural geography: Blurring boundaries and making connections. Progress in Human Geography, 2009, 33(6):

849-858.

- [9] Liu Yansui, Long Hualou, Li Yurui. Human geography research based on the new thinking of global rural-urban relationship. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 2869-2884. [刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球城乡关系新认知与人文地理学研究. *地理学报*, 2021, 76(12): 2869-2884.]
- [10] Long Hualou, Zhang Yingnan, Liu Yansui, et al. The state-of-the-art of agricultural geography and rural development research in China. *Economic Geography*, 2021, 41(10): 49-58. [龙花楼, 张英男, 刘彦随, 等. 中国现代农业与乡村地理学研究进展. *经济地理*, 2021, 41(10): 49-58.]
- [11] Yang Ren, Liu Yansui, Long Hualou, et al. Research progress and prospect of rural transformation and reconstruction in China: Paradigms and main content. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 1019-1030. [杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 中国乡村转型重构研究进展与展望: 逻辑主线与内容框架. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 1019-1030.]
- [12] Liu Yansui, Liu Yaqun, Ou Cong. Scientific cognition and detection methods of modern human-earth system. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(3): 447-463. [刘彦随, 刘亚群, 欧聪. 现代人地系统科学认知与探测方法. *科学通报*, 2024, 69(3): 447-463.]
- [13] Liu Y S, Ou C, Li Y R, et al. Regularity of rural settlement changes driven by rapid urbanization in North China over the three decades. *Science Bulletin*, 2023, 68(18): 2115-2124.
- [14] Wu Guohua, Zhou Guohua, Long Hualou, et al. Characteristics of research in agricultural and rural geography in China: Review from papers in four geographical periodicals. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(9): 1634-1644. [吴国华, 周国华, 龙花楼, 等. 从“四地”期刊载文审视中国农业与乡村地理学研究发展特征. *地理科学*, 2021, 41(9): 1634-1644.]
- [15] Cheng Changxiu, Shi Peijun, Song Changqing, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1397-1406. [程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. *地理学报*, 2018, 73(8): 1397-1406.]
- [16] Zhou Chenghu, Sun Jiulin, Su Fenzhen, et al. Geographic information science development and technological application. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2593-2609. [周成虎, 孙九林, 苏奋振, 等. 地理信息科学发展与技术创新. *地理学报*, 2020, 75(12): 2593-2609.]
- [17] Zhou Chenghu, Wang Hua, Wang Chengshan, et al. Geoscience knowledge graph in the big data era. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(7): 1070-1079. [周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地质知识图谱研究. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(7): 1070-1079.]
- [18] Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234. [刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221-1234.]
- [19] Ye Xingqing. The general principles of the China's rural vitalization strategy in the new era. *Reform*, 2018(1): 65-73. [叶兴庆. 新时代中国乡村振兴战略论纲. *改革*, 2018(1): 65-73.]
- [20] Liu Yu. Revisiting several basic geographical concepts: A social sensing perspective. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 564-575. [刘瑜. 社会感知视角下的若干人文地理学基本问题再思考. *地理学报*, 2016, 71(4): 564-575.]
- [21] Chen Jun, Wu Hao, Liu Wanzeng, et al. Technical connotation and research agenda of natural resources spatio-temporal information. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1130-1140. [陈军, 武昊, 刘万增, 等. 自然资源时空信息的技术内涵与研究方向. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1130-1140.]
- [22] Wang Qiao. Progress of environmental remote sensing monitoring technology in China and some related frontier issues. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 25-36. [王桥. 中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题. *遥感学报*, 2021, 25(1): 25-36.]
- [23] Liu Y S, Ou C, Liu Y Q, et al. Unequal impacts of global urban-rural settlement construction on cropland and production over the past three decades. *Science Bulletin*, 2025, 17: S2095-9273(25)00285-3. DOI: 10.1016/j.scib.2024.12.054.
- [24] Liu Yu, Guo Hao, Li Haifeng, et al. A note on GeoAI from the perspective of geographical laws. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1062-1069. [刘瑜, 郭浩, 李海峰, 等. 从地理规律到地理空间人工智能. *测绘学报*, 2022, 51(6): 1062-1069.]
- [25] Liu Yansui, Yang Linpeng, Guo Yuanzhi. Spatial identification of underdeveloped counties in China and their development paths. *Geographical Science*, 2025, 45(2): 239-253. [刘彦随, 杨林朋, 郭远智. 中国欠发达县域的空间识别及其发展路径. *地理科学*, 2025, 45(2): 239-253.]
- [26] Chen Jieqi, Lu Lin, Lu Xingfu. Theory and practice of social innovation and rural revitalization. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(11): 2721-2738. [陈劼琦, 陆林, 路幸福. 社会创新与乡村振兴的理论与实践. *地理学报*, 2024, 79(11): 2721-2738.]

Transformation mechanism and scenario simulation of rural areal system

LIU Yansui^{1,2}, GUO Renzhong³, ZHANG Liqiang⁴, GUO Yuanzhi¹, LI Yurui¹

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Faculty of Geographical Science and Engineering,

Henan University, Zhengzhou 450046; 3. Research Institute for Smart Cities, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

4. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Rural areal system is a multidimensional object of rural revitalization in the new era, and its complexity and dynamics require a breakthrough in single-domain thinking. Through the in-depth fusion of system science theories, multi-source data-driven technical methods and sustainable transformation paths, the full-chain governance of system diagnosis-scenario simulation-precise policy implementation should be carried out. Based on the scientific theory of human-land system and the multi-scale analysis paradigm of geography, this paper explores the "element-structure-function" cascade analysis system of rural areal system, analyzes the scientific connotation of rural areal system and rural revitalization, clarifies the multi-scale evolution law and transformation mechanism of rural areal system, develops rural areal system development status assessment and scenario simulation technology, and sorts out and proposes a "three-device" (diagnostic device, detector, simulator) platform framework for the transformation mechanism and simulation of rural areal system. By innovating multimodal spatiotemporal data fusion and intelligent interpretation methods, it can break through the technical bottleneck of quantitative inversion of rural areal system elements, establish a multi-factor collaborative observation indicator system and a data sharing application platform, reveal the spatial pattern of rural transformation under different development paths, and explore and create "three major systems", including a theoretical system of rural areal system with multi-dimensional interaction of nature-society-technology, a technical system of cross-platform coordinated observation of rural areal system, and a system of standards and norms for the scientific path of rural revitalization and its management. The findings will help to achieve the systematization of coordinated observation and scenario simulation of multi-source heterogeneous data in rural areal system, and provide theoretical guidance and technical support for the scientific formulation of rural revitalization plans and the comprehensive promotion of rural revitalization strategic decisions. Additionally, focusing on the current trend of technological progress, modern geography should connect with the international scientific frontier and national strategic needs, and take the system integration of geographic science-technology-engineering-practice (Geo-STEP) as the core to promote the transition of rural areal system research from "problem explanation" to "future design" and "scientific governance".

Keywords: rural areal system; synergistic observation; fusion calculation; transformation mechanism; scenario simulation; rural revitalization