

地理空间视角下耕地资源新认知体系构建

叶思菁^{1,2}, 宋长青^{1,2*}, 高培超^{1,2}, 程 锋³, 任书义², 杜 彬²

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
3. 中国国土勘测规划院, 北京 100035)

摘 要: 耕地是在自然资源要素和人为活动的共同作用下, 以食物生产为核心, 兼具生活、生态、文化等多重功能的复杂综合体, 其成为资源的本质是“空间的可利用性”。地理学特有的“要素、空间与时间相互融合的视角”为理解耕地资源空间格局、时空变化及影响、驱动因素等问题提供了重要支撑。发展地理空间视角下耕地资源综合认知理论与方法, 是探索耕地保护与利用协同路径的关键环节。该文根据已有耕地资源质量、价值研究探讨耕地资源内涵, 包括: 解析耕地资源自然层、生计层、制度层、意识层的“要素-功能-价值”级联关系; 梳理耕地资源多尺度、整体性、区域性与动态性特征。在此基础上, 该文提出耕地资源认知理论框架, 提出从耕地资源利用-本底-效益三方面综合认知耕地资源格局; 发展耦合利用-本底-效益的耕地资源过程模型; 解析文化传统、社会经济发展对农作物产量未来需求的影响机制。探讨了土地适宜性、资源环境承载力、耕地质量与价值、耕地集约利用、地理权衡、地理耦合、复杂地理系统等研究领域研究对认知耕地资源的支持。最后, 从星空地一体化耕地资源感知、高性能时空数据处理、时空格局与过程分析、多情景空间模拟与优化四方面探讨耕地资源认知关键技术体系及面临难题。

关键词: 土地利用; 耕地; 资源描述框架; 地理空间; 集约利用; 复杂地理系统

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211142

中图分类号: F323.21; S2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0225-16

叶思菁, 宋长青, 高培超, 等. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 225-240.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211142 <http://www.tcsae.org>

YE Sijing, SONG Changqing, GAO Peichao, et al. Construction of the new cognitive system for arable land resources from geospatial perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 225-240. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211142 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

粮食安全问题是关系人类可持续发展基本需求的全球性问题^[1]。FAO 报告显示, 当今世界仍有近 7 亿人缺乏饮食保障, 并随着人口、社会经济、气候等因素变化, 至 2050 年全球粮食需求将增长近 70% (也有研究提出粮食需求增长 100%~110%)^[2-3]。作为人类赖以生存的宝贵资源, 耕地不但承担为人类的生存与发展提供坚实物质基础和食物保障的产品供给功能, 还具有气候调节、净化水质、生物控制等多种生态功能^[4]。2019 年, IPCC《气候变化与土地报告》指出耕地退化在危及粮食安全同时也会加剧气候变化, 可持续耕地利用对减少土壤侵蚀, 消除饥饿以及应对气候变化具有重要作用。而耕地无序扩张严重威胁森林、草地等其他生态系统安全^[5]。这对全球科学家和政策制定者提出艰巨挑战, 即如何在保障粮食需求的同时, 保护耕地及其他生态系统稳定, 满足农业、生态和社会经济的可持续发展^[6-8]。

中国把“十分珍惜和合理利用每一寸土地, 切实保护耕地”作为一项基本国策。《中共中央国务院关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》(中发〔2017〕4 号)要求, 着力加强耕地管控、建设、激励多措并举保护。中国共产党第二十次全国代表大会提出“牢牢守住十八亿亩耕地红线, 确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。事实证明, 虽然中国人均耕地面积不足世界平均数的 40%, 但以全球 9% 的耕地养活近 20% 的人口, 实现粮食产量“十五连丰”, 为实现联合国千年发展目标作出重要贡献^[9-11]。然而, 当前增产不代表永续高产, 在过去的 40 年, 化肥农药的过度投入、重型农业机械设备的推广和多重套种的高强度利用不断加剧农田生态系统退化, 引起耕作层变薄、板结、酸化、有机质降低, 引发植物生理特征病变, 危害土壤动物与微生物群落结构, 抑制土壤酶活性, 阻碍土壤中有机质分解、腐殖质形成等物质转化过程, 影响耕地可持续利用; 并通过饮用水或土壤-植物系统经食物链进入人体, 危害人体健康^[12]。在此背景下, 亟待加强耕地资源利用与保护耦合认知理论与方法研究。

耕地是在自然资源要素和人为活动的共同作用下, 以食物生产为核心, 兼具生活、生态、文化等多重功能的复杂综合体^[13]。耕地成为资源的本质是“地理空间的可利用性”^[14], 其功能质量是气候、地形、土壤、生物、工程设施、地理区位、科技水平、社会经济条件等多要素在特定开放空间中综合作用的结果, 在垂直空间视角

收稿日期: 2022-11-16 修订日期: 2023-04-03

基金项目: “美丽中国”科学院先导科技专项 (XDA23100303); 国家自然科学基金资助项目 (42171250); 地表过程与资源生态国家重点实验室自主课题 (2022-ZD-04)

作者简介: 叶思菁, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为耕地资源保护与可持续利用。Email: yesj@bnu.edu.cn。

※通信作者: 宋长青, 教授, 博士生导师, 研究方向为地理区域综合、复杂地理系统等。Email: songcq@bnu.edu.cn。

涉及岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈和生物圈的相互作用^[15]；在平面空间视角表现为自然-社会-经济要素驱动下的区域格局差异与时空过程差异^[16]。作为一门以综合性和区域性见长的学科，地理学以不同时空尺度下独立要素、要素群以及全要素系统的格局与过程耦合研究为核心^[17-18]。从地理空间视角切入，为理解耕地资源是如何变化的；在哪里发生，为什么会发生，以什么样的速率发生变化；这些变化又可能产生什么影响等问题提供了重要突破点^[19-20]。

众多学者基于地理空间视角围绕陆地表层（子）系统、自然资源系统认知框架开展思考与研究。部分研究聚焦土地系统的多尺度、区域性与动态性特征，提出基于“格局—过程—服务”级联关系认知土地资源空间分布与时间演化、自然条件与人类需求之间的系统关联状态及运行轨迹^[21]；耦合人口—经济—社会—生态—文化等多要素解析人地交互作用过程^[22]；基于作土关系、人居关系、居业关系、产城关系理解人地关系地域系统类型、结构与动力机制^[23]；基于“生物多样性—生态系统结构—过程与功能—服务”级联式理论框架理解生态系统服务评估指标与土地利用的可持续性^[24]；基于“要素—结构—功能”级联理解乡村地域系统的重构作用机制^[25]；通过效率提升、价值显化、要素流通与结构优化过程理解显隐性土地利用转型过程影响城乡融合发展的机制^[26]；基于“资源环境约束下的植物物质生产-生物种群繁衍-人类社会发展互作的动力学机制”的科学理念，理解大尺度生态系统的起源、分布、演变、格局的生态过程机制^[27]等。作为土地系统的重要组成，唐华俊等定义农业土地系统为“以土地为核心承载的农业系统，是农业系统与土地系统的结合部分，即人类利用耕地从事的一切活动及其后果”，其研究对象从耕地时空分布扩展至农业集约化、作物种植制度与物候、农业生态系统服务等诸多方面，并提出从时空格局探测、变化过程模拟以及综合效应分析三方面认知农业生产过程中人地综合复杂关系^[28]。此外，针对基于“还原论”思维和方法体系逐级分解陆地表层要素，在理解开放土地系统非线性变化规律方面的困境，越来越多的学者提出引入复杂系统理论方法来解释土地系统运行机制^[23, 27, 29]。例如，宋长青等在讨论陆地表层系统空间格局、时间过程及时空变化机制“复杂性”特征基础上，提出发展适用于地理空间认知的复杂系统理论与方法^[29]。于贵瑞等在大陆尺度陆地生态系统数值模拟器研究中强调“虽然无法抓住复杂性的各个细节，但应尽力揭示复杂性系统基本性质”^[27]。围绕自然资源认知，相关学者提出基于地理空间视角认知自然资源的数量、结构、质量、形态、分布、价值，自然资源要素之间相互关系，自然资源的区域特性与协调性，及自然资源与人类活动的关系^[30]；基于形态结构、能量平衡和行为（管理）信息3个维度认知草地资源^[31]；基于自然资源的资源、资产和资本特性，构建面向自然资源高质量发展需求的时空信息技术框架^[32]等。在耕地资源认知方面，众多学者围绕耕地数量、质量、价值、生态

等特征的时空变化、空间分异及驱动机制开展研究^[33-35]，并探索土地整治与高标准农田建设适宜性、潜力与效应的评估方法^[36-39]。例如，胡月明等深入探讨了耕地系统、耕地质量、耕地资源认知内涵与演进过程，在解析耕地资源内部机制与外部价值基础上，提出“二维要素—三重功能-多元价值”的耕地资源认知框架^[40]。上述研究与思想对本文探讨地理空间视角下的耕地资源综合认知理论框架提供了重要的启发与引导。

耕地系统是可人工赋能的半自然生态系统，在不同地理空间中具有特定结构和功能特性，经长期自然演变形成稳定的生态平衡状态。人类活动是驱动耕地系统功能状态变化或稳态相变的主导因素，直接或间接影响耕地生产、生活、生态功能，但这种影响过程及耕地系统相应的弹性与响应过程因耕地本底特征而表现出空间分异。然而，已有研究往往围绕耕地利用强度^[10, 41-42]、耕地质量^[43-45]、耕地生态系统服务^[4, 46-47]中的一方面开展，较少关注耕地利用模式、本底属性、生态功能的互馈作用；部分研究聚焦耕地利用与耕地质量因子或生态系统服务的相互作用（例如，耕地空间转换对生态系统服务影响^[11, 48-49]；耕作密度对生物多样性影响^[50-51]；耕地细碎化对耕地集约利用影响^[52]等）或耕地生态系统服务间的耦合关系^[53]，但往往重视耕地显性利用而对隐性因子的考虑不足，并缺乏过程机理模型研究。上述不足导致耕地资源认知难以定量表征“区域适宜的耕地集约利用强度与模式”；预警“主导区域耕地健康的序参量及其触发机制与拐点”；回答关于“土地节约（land sparing）”与“土地共享（land sharing）”^[54]的长期争议。本文拟基于耕地资源研究的长期实践，在地理空间视角下探讨一个宽泛的耕地资源综合认知理论框架，着重解析基于耕地资源利用-本底-效益级联关系综合认知耕地资源格局的研究内容与理论基础，并探讨耕地资源认知关键技术难题，以期探索耕地保护与利用协同路径、推进农业绿色发展提供支持。

1 耕地资源内涵探讨

在已有耕地资源质量、价值研究基础上，笔者从维度及特征层面探讨耕地资源内涵（图1）。在维度层面，耕地资源由自然层、生计层、制度层、意识层组成。从“要素-功能-价值”视角解析，自然层是耕地作为资源的基础支撑，侧重基于地貌—气候—水文—植物-动物-土壤要素的耕地生态系统支持、调节、供给功能，通过生态价值表征，可以视为耕地资源内在价值。生计层对应耕地资源的生产功能与社会保障功能，前者是自然要素与人文要素综合作用的结果，表现为工具价值；后者基于农户机会成本及社会保险量化，是社会价值的组成部分。制度层体现对自然层与生计层的保护与管控，重点面向耕地保障农户生计与粮食安全的社会价值。此外，通过发展耕地系统科学研究，进而提升耕地生产力与生态保护技术创造的认知价值，也是制度层的范畴。意识层强调耕地的文化娱乐功能以及人们对耕地的情感（如

乡土乡情、故乡的味道)，通过不同群体对耕地的保护意愿及农户耕作意愿量化，表现为关系价值。此外，耕地资源的5种价值难以割离：自然价值是其他价值实现的基础；自然价值和工具价值共同支撑社会价值实现；

认知价值是提升耕地自然、工具、社会价值所形成的附加价值；而关系价值衍生于不同群体对耕地生态、工具、社会价值的认知与情感；这种价值间错综复杂的关系也进一步提升耕地资源认知与定量评估难度。

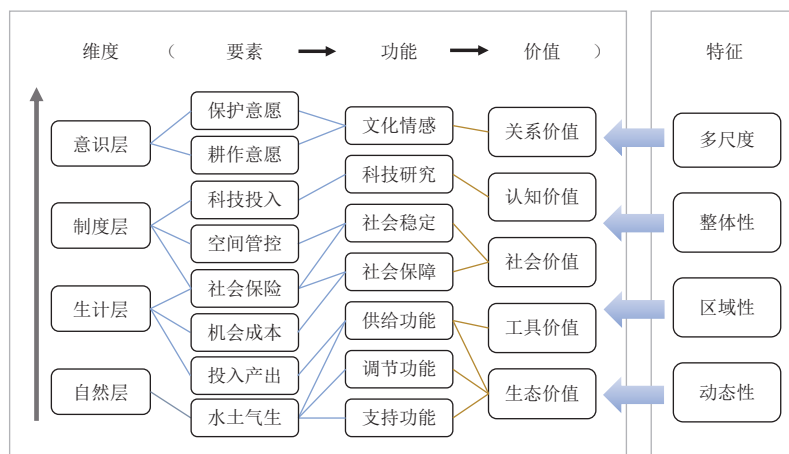


图1 耕地资源的内涵探讨

Fig.1 The connotation of arable land resources

在特征层面，耕地资源兼具自然属性与社会属性，具备多尺度、整体性、区域性与动态性特征。多尺度特征指在不同空间尺度，耕地资源功能的核心需求存在差异，例如农户尺度侧重经济功能，国家尺度关注粮食安全与社会保障功能；而驱动或表征耕地资源演变的关键因子存在不同时间尺度的变化特征，例如土壤氮含量受人类耕作活动表现出季节尺度变化，而气候变化在年际年代尺度体现。把握耕地资源的整体性，需从生态系统承载力、城乡发展需求与粮食供给需求及三者空间关系入手，发展耕地系统相态与熵变定理理论与表征方法。应对耕地资源的区域性，需从空间上理解耕地系统功能及其影响要素的局地差异、近程效应和远程效应。顾及耕地资源的动态性，一方面需要对外部气候变化、社会经济发展情景有合理预期，进而量化未来情景下作物潜在单产、复种制度、水资源承载力、潜在植被类型等水—粮食—生态关联的驱动变量；另一方面需要考虑耕地系统内部状态会因外界扰动发生波动式变化。

2 耕地资源认知框架及内容

2.1 耕地资源认知框架

概念框架是认知耕地资源进而探索其利用与保护协同路径的重要前提和理论基础。本文尝试提出地理空间视角下耕地资源综合认知框架（图2），包括认知目标、认知内容、认知理论、认知方法与技术4个组成部分。耕地资源认知应置于全球变化背景下，考虑气候变化、“碳中和”目标、生态保护、可持续发展目标实现等对耕地系统关键功能的需求与影响。从不同学科视角，耕地资源认知的目标是多层次、多方面的。本文从地理空间视角，将耕地资源认知目标限定为以保障粮食安全为底线，探索特定外部背景与粮食供需平衡情景下耕地显性空间优化策略与隐性利用调控路径，进而为区域耕地

红线管控政策设计与实施提供理论与方法支撑。

2.2 耕地资源认知内容

为了实现上述耕地资源认知目标，需要从人地系统视角探究多维因素是如何影响耕地资源时空变化过程的。耕地资源认知内容涉及人类系统（需求端）与农田生态系统（供给端）两部分。人与自然和谐共生的美丽中国图景在粮食安全、生态健康、高质量发展、人类福祉等多方面提出未来发展目标，需求端应在多维度情景下认知文化传统、社会经济发展对农作物产量未来需求的影响机制，进而构建定量评估理论模型与区域化表征方法，主要涉及经济水平提高影响饮食结构、科技社会发展影响粮食流动损耗与成本、农作物价格弹性影响耕地扩张与作物结构^[55]等过程模型。其中典型的研究实践有，TILMAN等构建了人均GDP与人均食物需求的多项式关系，模拟2050年全球作物热量和蛋白质需求，并定量评估实现全球粮食需求的发展路径^[3]。ZHAO等^[56]将全球生物圈管理模型进行优化和参数本地化校正，定量评估未来中国粮食需求、生产和贸易的发展趋势。

供给端面向农田生态系统，从耕地资源利用、耕地资源本底、耕地资源效益三方面认知耕地资源。耕地资源利用主要可分为显性利用与隐性利用^[57]，显性利用是指引发空间形态变化并可直接观测的耕地利用行为，包括耕地扩张与空间转移、非粮化、破碎化等；隐性利用行为则难以根据地理实体的形态、光谱特征直接观测，包括种子、化肥、农药、地膜、劳动力投入，农业机械应用，及免耕、少耕、秸秆还田等耕作技术。部分耕作行为兼具显性与隐性特征，如耕地边际化既有弃耕撂荒的空间表现形式，也可能表现为隐性的粗放利用；土地整治行为同时包含土地平整、工程建设等显性特征与土壤改良、农艺管理水平提升等隐性特征。不合理的耕地

利用是威胁耕地资源本底与效益的主要原因（即压力）。聚焦高精度作物类型识别与农业集约化因子空间化评估认知耕地资源利用以要素精细化识别与评估为主要挑战，研究。

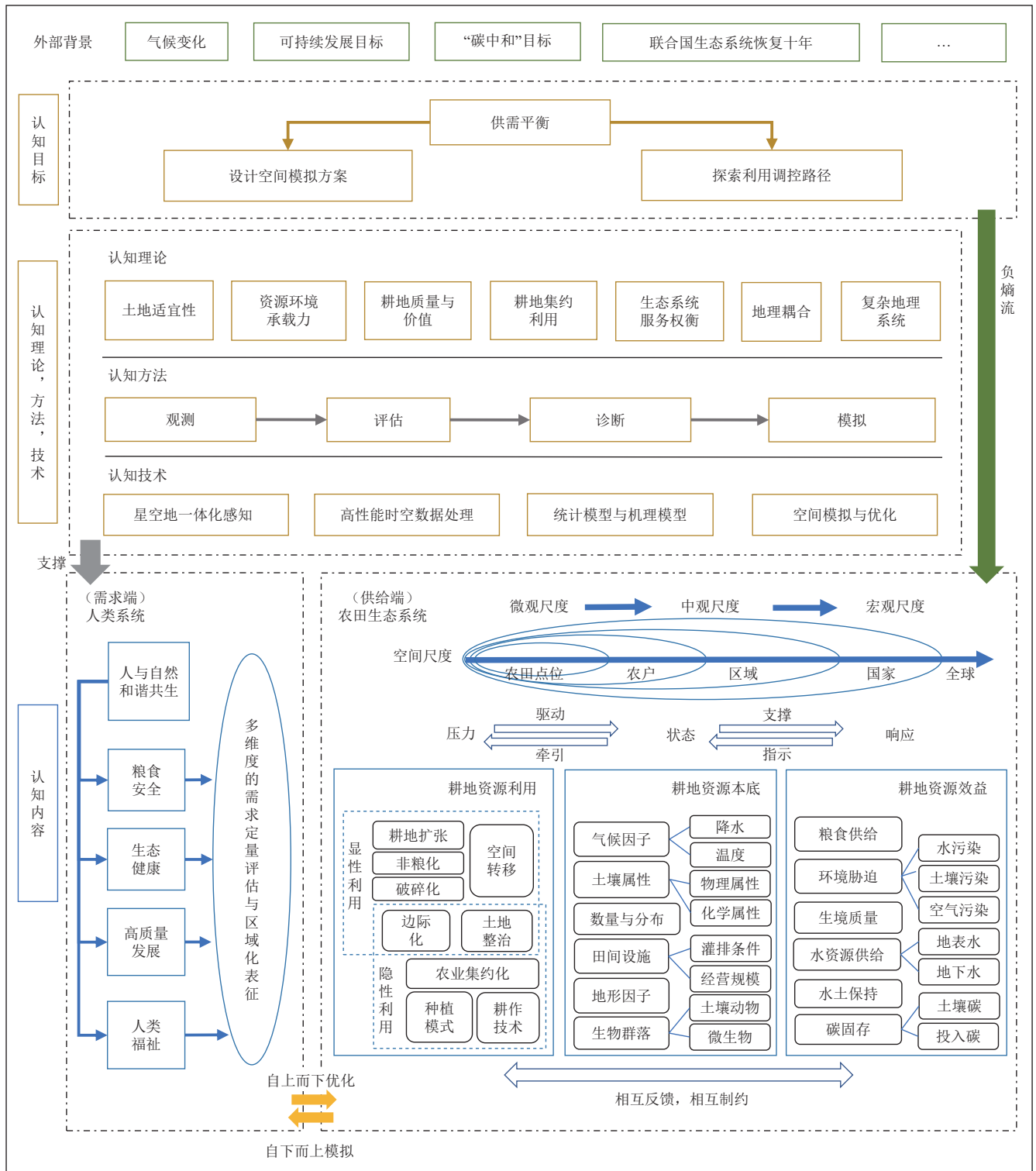


图 2 地理空间视角下耕地资源认知框架

Fig.2 Framework architecture for cognizing arable land resources from the perspective of geospatial

耕地资源本底认知是面向耕地内在属性开展研究，观测评估水热气候因子、土壤理化属性、耕地数量与分布、田间设施、微地形、生物多样性等要素的状态，理解内在属性间相互作用机理及其影响，诊断影响农田生态系统稳定的主导参量及其拐点。气象观测与遥感观测技术的发展为耕地空间分布、气候因子研究提供了多时

空分辨率数据支持；地形因子、土壤物理属性因变化周期较长，也具备了一定的单时相空间数据^[58]；田间工程设施条件与生物群落观测与数据共享成为认知耕地资源本底的主要短板。根据 2018—2019 年自然资源部组织开展全国 65 个试点县耕地健康产能调查实践资料分析，众多调查人员提出土壤蚯蚓生物量调查采样困难并且不稳

定（因受采样季节、位置与天气条件影响大）；而灌溉保证程度、排水条件、农艺管理水平等田间设施指标受调查人员对当地情况熟悉程度及知识水平影响较大。

耕地资源效益认知通过“功能-服务-价值”视角评估农田生态系统在人为耦合作用下的外在表现（即响应），直接支撑耕地资源生态价值、工具价值、社会价值、认知价值与关系价值的实现，主要通过粮食产出、水/土壤/空气环境胁迫、生境质量状况、水资源供给量、水土保持量、碳固存量等刻画。由于耕地资源效益观测实施过程复杂不一，当前不同维度耕地资源效益评估研究往往应用不同时空尺度测算的参数执行计算，一定程度上削弱了资源效益空间分异特征，这一缺陷在多服务权衡分析时尤为突出。

耕地资源“利用-本底-效益”存在级联关系与互馈作用，耕地资源利用行为通过改变资源本底状态，进而支撑资源效益的实现；耕地资源效益指示耕地资源本底的质量、健康状况，进而牵引或制约适宜的耕地利用行为。这一级联关系的影响对微观尺度更为突出，在尺度上升过程中受平滑效应影响被一定程度削弱，并表现出区域性差异。因此，研究耕地资源“利用-本底-效益”间的互馈作用适合从微观尺度出发，进而探究微观尺度互馈作用涌现出的宏观效应，这对耕地资源指标体系设计及观测样本数量提出更高要求。目前围绕“利用-本底”[52, 59-61]、“利用-效益”[11, 49-51, 62]与“本底-效益”[12, 63-64]两两间互馈的区域性研究实践逐渐丰富，但对三者综合分析的考虑尚不足。例如，在大尺度研究氮肥投入对作物单产的贡献时，应考虑区域气候、土壤、田间设施等本底属性差异的干扰。又如研究极端气候事件对农作物单产的非线性影响过程，不仅需要考察地形、土壤、田间设施因子等影响作物对极端气候事件的抵抗力，还需要顾及农户耕作行为（灌溉、病虫害防治等）、耕作意愿等利用属性差异的干扰。发展耦合利用-本底-效益的耕地资源过程模型，对于模拟特定场景下低肥、低碳、高产的耕地显隐性利用模式具有重要意义。

2.3 耕地资源认知理论

2.3.1 土地适宜性

土地适宜性理论始于MCHARG，发扬于FAO《土地评价纲要》，在长期评估实践中发展完善，表现为评估理论与主题多元化、评估体系与方法精细化，为认知耕地资源开发利用适宜性提供理论支持。1969年，MCHARG首次提出土地适宜性概念，认为土地自然属性决定某项土地用途的适宜程度，强调土地开发利用要遵循自然生态过程[65]。1976年，FAO颁布《土地评价纲要》将土地适宜性划分为4级：土地适宜性纲、土地适宜性级、土地适宜性亚级和土地适宜性单元，其评价对象主要为农用地。傅伯杰等发展了土地适宜性评价理论，提出基于多过程、分尺度的视角从生态、经济、社会三方面评估土地可持续利用[66]。倪绍祥等[67]提出利用相似距建立土地适宜性评估与土地利用规划决策的联系。而后在长期实践中，土地适宜性评估应用领域不断拓展，覆盖耕地

利用适宜性、城市建设适宜性、生态保护适宜性、旅游开发适宜性、土地整理与复垦适宜性等众多主题[68-72]；研究对象也由早期一级土地利用类型逐步向特定农作物类型[73]、物种类型[74]细化；生态位理论、层次分析法、模糊隶属度、主成分分析、人工智能方法等的融入推动土地适宜性评估向精细化发展，为耕地资源空间格局优化提供理论支持。

2.3.2 资源环境承载力

资源环境承载力关注资源环境“最大负荷”这一基本命题，最早起源于力学系统中的承载力理论，随后被引入到生态学和区域发展领域[75]。中国的资源环境承载力研究，最早起源于单要素的承载力研究，如土地承载力、水资源承载力和生态承载力[76]。然而，随着研究的深入，单要素研究愈发局限，学界基于可持续发展、人口理论、环境容量、生态足迹和短板效应等理论，开始构建综合评价模型对区域资源环境承载能力进行评估，资源环境承载力逐渐发展成为关注资源合理开发利用与生态环境良性循环的综合性概念[77-78]。樊杰等[79-80]在汶川灾后重建规划研究中，正式提出资源环境承载的整体概念并在后续研究中不断发展。资源环境承载力研究为认知耕地资源的适宜利用强度和边界提供理论基础。

2.3.3 耕地质量与价值

中国耕地质量研究衍生于土壤质量研究，相比于后者更强调表征自然-社会-经济因素作用下耕地系统整体性状态。耕地质量内涵在争议中发展，并随社会经济发展表现出不同的侧重点，包括“生产力视角”[81-82]，“自然属性视角”[83]，“自然-经济双重属性”[84-85]，“耕地利用多重功能性视角”[86-90]等。耕地质量评估理论在发展中融入生产力形成理论、级差地租理论、土地报酬递减规律、空间变异理论、生态系统服务理论等，逐步形成综合表征耕地资源生产、生活、生态多元功能的评估体系，覆盖地形特征、土壤性状、耕作条件、土壤环境、生物特性、利用强度、经济效益等多个维度，其中的代表性框架有“天—地—人—生”[91-92]，“要素—过程—功能—特性—质量”[93]等。耕地价值观在马克思主义劳动价值论、土地价值二元论、劳动价值泛化论、效用价值论、使用价值决定论、三元价值论等多种思想交汇中发展，逐步形成包含经济价值、生态价值、社会价值、精神价值等的多元价值体系，相关评估方法包括传统市场法、替代市场法、模拟市场法等[94-96]。耕地质量与价值研究为认知耕地资源本底与效益提供理论支持。

2.3.4 耕地集约利用

耕地集约利用研究可以追溯到19世纪中期，MALTHUS明确地在人口增长的背景下探讨了农业集约化[97]。BROOKFIELD将农业集约化定义为以资本、劳动力和技能的投入替代土地，从而从某一特定地区获得更多的生产，使生产更集中成为可能[98]。在早期研究中，土地利用集约化以单位土地的生产投入或产出来衡量。随着工业化发展，耕地集约利用逐渐成为缓解耕地供给和需求矛盾，保证社会经济持续稳定发展的必要选择，

相关研究逐渐聚焦于不同的主题,包括集约化的驱动因素、集约化潜在的生态危害以及集约化与耕地扩张的相互关系。这使得明确评估耕地集约化的效益变得重要,并推动采用创新的方法来评估耕地集约利用强度^[99-100]。考虑到耕地集约利用强度的复杂性,众多研究从多维度提出评估方法,可以归纳为4个方面:投入强度,产出强度,投入和产出的组合和对生态系统服务影响。耕地集约利用研究为认知耕地资源利用及影响,进而优化耕地利用路径提供理论支持。

2.3.5 生态系统服务权衡

生态系统服务权衡研究旨在充分认识生态系统服务之间多重非线性关系、类型特征、响应速率、驱动机制和尺度效应的基础上,找到生态保护与社会-经济发展之间的平衡点,提出科学合理的生态系统服务管理策略,以实现不同利益相关方的效益最大化^[101-103]。从权衡目标出发,生态系统服务权衡可从认知与决策2个维度进行解读^[104]。权衡认知研究是在定量化评估不同生态系统服务物质质量或价值量基础上,着重研究生态系统服务间的权衡关系(例如无相互关联、直接权衡、凸权衡、凹权衡、非单调凹权衡以及反“S”型权衡等)及其驱动机制与时空尺度效应。权衡认知研究方法主要包括统计方法(例如 Pearson 相关系数法、有序加权平均算子、k-means 聚类、logistic 回归、ESTD 模型、均方根误差、生产可能性边界等)与空间分析方法(例如单变量/双变量局部空间自相关分析、主成分分析、叠加分析等)。权衡决策研究是在确定不同生态系统服务变化之间的潜在因果关系基础上,借助情景分析、多目标分析等手段,将权衡结果应用到生态系统服务的集成管理与优化决策之中,实现整体惠益的最大化^[105]。生态系统服务权衡研究为模拟耕地资源利用提供理论支持。

2.3.6 地理耦合

耦合强调“两个或两个以上独立单元的相互作用,并产生以物质为载体的能量交换过程”^[106]。格局与过程耦合可表达为“格局影响过程,过程改变格局”^[21]。宋长青等^[105]提出地理耦合内涵包括地理要素耦合、地理空间耦合、地理界面耦合、地理空间尺度耦合、地理关系耦合、地理耦合解译。地理耦合模型包括简单概念模型、智能体模型、系统动力学模型、综合评估模型、融合人类活动的陆面过程与地球系统模型等^[106]。发展对人类活动及社会经济系统的定量感知与尺度转换方法,通过不同层次耦合,解读特定地域耕地资源的关键要素、结构和功能关联机制(如水—粮食—能源关联耦合),是明晰耕地资源利用—本底—效益级联关系与互馈作用的有效途径。

2.3.7 复杂地理系统

地理系统是一个开放的复杂巨系统,其包含种类多样的子系统,并具有层次结构。复杂地理系统理论^[19]在地理学长期区域性、综合性人地关系研究与复杂系统自组织理论、突变理论、耗散结构理论相互融合中形成,侧重刻画微观尺度下多元非结构化地理要素复杂自适应行为,并解释其相互作用及对宏观地理现象的涌现过程。

2018 年,宋长青等从组织结构、组织次序、要素关系、研究方法等角度,解释地理系统是一个非线性演化特征的复杂系统,并阐述了复杂地理系统的认识论,认为地理学的研究对象,即陆地表层是一个复杂地理系统,其“复杂性”具体表现在三方面:地理要素的时空过程、要素之间的相互作用、驱动机制。当前地理系统研究的不足在于缺乏能够对复杂的、综合的陆地表层过程进行解析的方法^[29]。在地理系统中探索性应用的复杂系统方法包括复杂的幂律分布;空间分形与时间分形;混沌现象的特征量;复杂网络^[107]等。然而,当前复杂地理系统理论尚在发展初期,面临如何界定复杂地理系统结构;如何度量复杂地理系统的“复杂性”“熵”与“序”;如何刻画复杂地理系统的“相”;如何识别复杂地理系统的“相变”与“序参量”等挑战。耕地系统是复杂地理系统研究的典型对象,复杂地理系统理论为认知耕地系统演化提供了新途径。例如,通过度量不同空间优化与利用调控策略引起的耕地系统熵变特征,可为耕地利用路径规划决策提供理论支持;识别耕地系统“相变”与“序参量”可为耕地资源退化诊断与预警提供理论支持。

3 耕地资源认知技术体系

耕地资源认知技术发展迅速,但难题尚存。难题一是耕地资源感知技术不足,对于耕地资源隐性利用、耕地资源本底属性及效益缺乏时空连续的感知数据支持,亟待突破指标观测装备与空间化模拟方法;难题二是面向海量多源异构耕地资源数据的高算力支撑不足,亟需突破高效稳定的时空大数据集成计算技术;难题三是耕地资源指标非线性作用认知不足,解析指标作用过程的理论、方法研究不足,亟待发展耦合人地系统的耕地资源评估、诊断、模拟方法。针对上述难题,本文作者基于近 10 年耕地资源认知技术的研究实践,提出从星空地融合感知、高性能时空数据处理、时空格局与过程分析、空间模拟与优化四方面发展耕地资源认知技术体系(图 3)。

3.1 星空地融合的耕地资源感知

耕地资源感知技术为认知耕地资源“利用-本底-效益”格局与互馈作用提供多时相空间化数据支撑。首先,遥感观测技术发展为中高分辨率耕地资源时空变化认知提供有力支持,形成了 GLOBELAND30、GLC_FCS30 等重要数据集,但耕地内涵复杂、种植结构多样的特征以及高时空分辨率耕地保护监管需求对耕地利用类型遥感识别技术提出更精细要求。其次,星地融合技术发展推动多元化耕地资源指标观测评估,在农作物类型识别与单产评估、土壤理化性质评估、田间设施评估、农田生态系统服务评估等方面取得突破,但评估成果的时空分辨率离高质量耕地资源时空信息保障仍有较大差距,且评估模型扩展应用能力及评估结果误差尚需进一步优化。第三,外业调查为耕地资源认知与指标模拟提供重要“真值”,亟需基于指标空间异质性与空间相关性特征发展空间布样技术^[108-110];面向农户尺度耕地利用调查发展集成参与式、空间信息服务等的的数据汇聚技术^[111-112];面向土壤物理、化学、生物指标调查发展高精度观测装备。

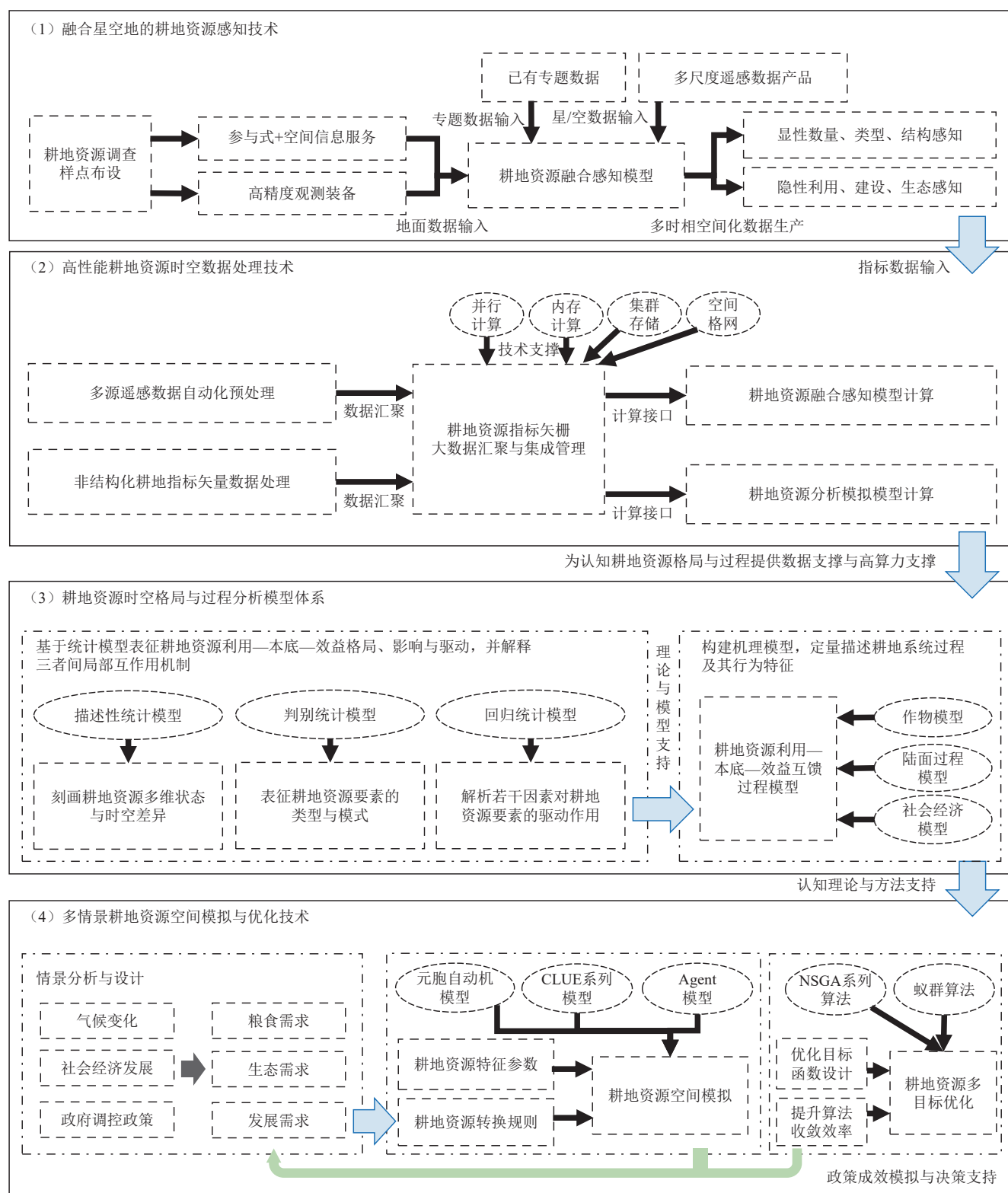


图3 耕地资源认知技术体系

Fig.3 Technical system for cognizing arable land resources

3.2 高性能时空数据处理

耕地资源观测“全地域、全方位、全时域、全要素”^[30]发展方向及耕地资源模拟“多情景、高精度、快反馈”应用需求对高性能时空数据处理技术提出挑战。首先，作为耕地资源观测的重要数据源，需发展高效稳定的多源遥感数据预处理与反演计算 workflow。例如叶思菁等设

计实现 GF-1 号数据自动化处理 workflow，集成辐射校正、正射校正、几何校正、云检测、投影变换优化算法^[113-117]。其次，政府部门耕地调查业务数据往往基于矢量格式分区组织，具有海量非结构化特征，需要高性能矢量数据处理技术支持。一种可行的解决方案是基于 HILBERT 曲线的矢量图斑分块存储插件并嵌入 HADOOP HDFS 底

层,实现全国耕地图斑高效存储、计算与表达^[118-120]。第三,耕地资源指标矢栅数据具有多源异构多尺度特征,在坐标系统、时空分辨率、分幅规则、元数据规范与内容、数据类型等方面存在差异,需发展耕地资源时空大数据集成计算技术。例如 YE 等面向耕地质量指标数据应用场景,研发时空数据多层级格网集成框架(Raster Dataset Clean & Reconstitution Multi-Grid, RDCRMG),该框架基于多尺度格网构建异构数据统一分块组织规则,并集成集群存储、无元数据索引、格网编码以提升数据管理效率^[121-122]。第四,多情景下实现大范围、高空间分辨率耕地利用格局优化与模拟研究,需研发基于 GPU、MPI 等的并行计算模型。

3.3 时空格局与过程分析

时空格局与过程分析是认知耕地资源“利用—本底—效益”格局与互馈作用的直接手段,主要依托统计模型与机理模型实现。统计模型直接研究观测变量间的数值关系,主要包括描述性统计、判别统计和回归统计。描述性统计方法指应用方差、均值、中位数等参数表达耕地资源指标的区域差异或基于加权平均等方法表达耕地资源综合特征。例如, YE 等^[10]评估中国县级单元耕地平均利用强度,研究提出中国耕地利用具有较大的提升潜力,当前近 54% 的县区耕地平均利用强度不足 60%,并对比不同县区耕地利用强度均值与离散程度的差异; REN 等^[123]基于荟萃分析方法,统计了近 20 年中国耕地土壤重金属含量的时空变化特征。叶思菁等提出耕地健康产能的评估方法,并基于方差分析评估耕地健康-亚健康的临界预警值^[12]。LIU 等^[124]从数量平衡、产能平衡、耕作距离变化、利用可持续性 4 个维度评估了近 20 年中国省域尺度耕地占补平衡政策的实施成效,研究发现虽然补充耕地的平均耕作距离达占用耕地的 2-7 倍,但由于偏远耕地被粗放利用甚至撂荒(进而被遥感分类模型识别为其他土地利用类型),省级平均耕作距离在同时期下降了 3.82%~63.88%。判别统计模型包括主成分分析、空间自相关、k-means、地理探测器、自组织神经网络、支持向量机、深度神经网络等,支持耕地资源利用、本底、效益多要素的类型与模式表达,例如 LU 和 YE 等^[125-126]应用支持向量机、深度残差网络构建外业背景下田间蝗虫种类与龄期动态识别模型; YE 等^[127]应用 k-means 模型解析中国县级耕地产能、耕作条件、利用强度与经济水平的空间聚类模式,研究提出高耕作条件-低利用强度是当前中国耕地质量发展的主要矛盾。回归统计模型包括皮尔逊相关系数、地理加权回归、多元线性回归、小波回归、结构方程、随机森林等,常用于解析若干影响因素对耕地资源要素的驱动作用。机理模型应用系统动力学逻辑刻画观测变量间的互作用过程,例如作物模型、陆面过程模型、生态水文模型、地租模型、李嘉图模型等。相比于生态学、水文学、土壤学和气候学等领域侧重自然要素过程模型,耕地资源过程模型更强调自然、社会、经济因素驱动下人类行为对耕地资源本底与效益的互馈机制,如刻画不同耕作方式对土壤碳氮储量与作

物产出的影响。发展耕地资源时空格局与过程分析模型体系,需要在不同尺度应用统计模型深化理解耕地系统要素—结构—过程—功能—格局及其相互作用关系基础上,定量描述多要素—多过程—多界面—多介质—多尺度耕地系统过程及其行为特征^[27, 106]。

3.4 多情景空间模拟与优化

在特定时空场景下预判耕地利用管控策略会引起耕地资源利用、本底、效益发生何种变化,或解答如何调整耕地资源利用、本底空间格局以满足特定的效益需求,是耕地资源认知为耕地资源管理提供智能化知识服务的核心切入点。耕地资源空间模拟的研究主题是预测不同管控情景下耕地利用空间变化格局。耕地资源空间模拟一般将耕地定义为一种或多种特定的土地利用类型,将耕地面积或产能作为规划需求,应用土地利用变化模拟模型实现,其中代表性的模型有元胞自动机模型、CLUE 系列模型、GEOMOD 系列模型、Agent 模型等。设计规划需求与转换规则是土地利用变化模拟的重点。元胞自动机模型、CLUE 系列模型等依托栅格单元的局部相互作用模拟土地利用变化模式,相关研究提出集成马尔可夫链、系统动力学模型、灰色模型或政府规划情景等量化规划需求;集成逻辑回归、神经网络、支持向量机等模型构建转换规则。例如 GAO 等^[128]应用 CLUMondo 模型模拟河南省未来多种人口增长与粮食安全情景下耕地利用变化过程。ZHENG 等^[129]应用 LANDSCAPE (LAND System Cellular Automata model for Potential Effects) 模型从国家、省、市和县 4 个尺度模拟耕地数量平衡、产能平衡情景下耕地空间分布格局并评估其对生境质量的影响。Agent 模型通过模拟微观主体的行为过程涌现宏观土地变化,从研究单元视角可分为“主体决策模型”与“空间决策模型”^[130],前者一般以个人或家庭为主体单元,模拟主体行为或结构变化对土地利用格局的影响;后者面向空间网格单元,模拟不同主体决策或偏好对单元土地利用方式的影响。深入理解政策因素、农户行为与自然-经济-社会条件综合影响下的耕地利用变化机制,完善顾及耕地资源利用—本底—效益状态与互馈作用的耕地变化需求与转换规则,成为发展耕地资源空间模拟的重要方向。

耕地空间优化侧重通过耕地资源空间优化配置实现特定效益需求,这一过程通常会权衡多个目标以使净效益最大化(即解空间中的最优解),典型的求解方法包括模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等。例如,王昊煜等面向经济效益最大、生态效益最大、土地紧凑性最大 3 个优化目标,应用 NSGA-II 算法模拟西宁市土地利用优化方案^[131],并以拉萨市土地优化为例从算法理论与优化结果视角对比了 NSGA-II 算法与 NSGA-III 算法的特征^[132-133]。FOLBERTH 等在考虑气候、土壤条件空间异质性特征基础上分区评估作物潜在单产,进而基于多目标优化方法,模拟在当前作物产量不变前提下,调整作物结构与耕地面积对全球化肥投入及生态系统服务的影响^[134]。发展耕地空间优化模型,一是要应用

耕地利用-本底-效益级联理论完善优化目标函数的设计;二是要提升优化算法在耕地空间优化中的收敛效率与鲁棒性;三是将空间模拟模型与优化算法集成,提升局部优化结果的可行性。

4 结论与展望

协同耕地资源保护与利用,关系中华民族永续发展的千年大计。当前中国耕地空间格局与利用方式正发生变化,表现出“非农化”“非粮化”“细碎化”“边缘化”与“生态退化”等诸多问题。过往耕地资源认知研究强调人对耕地的显性利用,并以状态评估为主,一定程度上忽视了耕地显隐性综合利用及其与耕地生态系统的互馈机制,导致难以定量表征“区域适宜的耕地集约利用强度与模式”;预警“主导区域耕地健康的序参量及其触发机制与拐点”;权衡耕地生产、生活、生态功能空间格局;进而对协同耕地利用与保护、应对耕地“五化”的理论方法支持不足。耕地成为资源的本质是“空间的可利用性”,在自然层、生计层、制度层、意识层表现出不同的“要素-功能-价值”级联关系,并具有多尺度、整体性、区域性、动态性特征。地理空间视角为理解耕地资源格局、过程、影响及驱动因素提供重要突破点。本文拟基于耕地资源研究的长期实践,在地理空间视角下探讨一个宽泛的耕地资源综合认知理论框架,着重解析基于耕地资源利用-本底-效益级联关系综合认知耕地资源格局的研究内容与理论基础,并探讨耕地资源认知关键技术难题,主要结论如下:1) 认知耕地资源,在需求端应定量评估不同社会经济发展情景下中国多元食物需求,并以保障粮食安全为基本底线;在供给端应从耕地资源利用、耕地资源本底、耕地资源效益三方面评估耕地资源状态,诊断影响耕地系统的主导因素及其拐点,模拟利用—本底—效益互馈作用,进而以满足供需平衡为目标,探索多情景下耕地资源空间优化策略与利用调控路径。2) 在理论层面,耕地资源认知应充分扎根于土地适宜性、资源环境承载力、耕地质量与价值、耕地集约利用、生态系统服务权衡、地理耦合等已有理论,并不断融汇复杂地理系统理论的创新思想,发展耕地利用、本底、效益的状态评估方法与问题诊断方法;创新基于利用-本底-效益互馈机制的耕地资源空间优化与利用调控方法。3) 在技术层面,亟需从星空地一体化感知、高性能时空数据处理、时空格局与过程分析、多情景空间模拟与优化四方面发展技术方法体系,为耕地资源认知提供数据、算力与模型支撑。

回首改革开放40年,最可骄傲的成就之一,是实现了“零饥饿”的可持续发展目标。建设新时代的美丽中国,下一项重要目标是实现由“吃饱”向“吃好、饮食更健康”转变。其中一个最突出的问题是,作为具有中国特色的“最严格的耕地保护”新战略应该如何确定?回答这一问题需要综合考虑多元化食品供需关系及耕地利用、本底、效益的互馈作用,以协同农作物生产与耕地生态保护。2023年中央一号文件在加强耕地保护与用

途管控、加强高标准农田建设、推进农业绿色发展等方面提出目标。根据本文提出的耕地资源综合认知理论框架,基于地理空间视角解析耕地资源利用-本底-效益级联互馈机制,进而研发空间优化模型并模拟不同空间优化与利用调控策略对农田生态系统的影响,可在优化耕地空间格局、划定耕地保护红线、预警农田生态系统退化、解析区域性高标准农田建设的核心短板因子、评估区域性耕地减肥增效潜力等方面为实现中央一号文件目标提供支持。同时,本文侧重从理论层面探讨地理空间视角下耕地资源认知体系,在下一步工作中需在不同区域不同尺度开展特定场景下耕地资源利用-本底-效益互馈机制的实证研究,其中一个重要内容是本底特征是如何影响耕地利用-效益耦合过程的,理解这一问题对于诊断限制耕地效益的核心因子与拐点,评估通过优化耕地利用方式及整治耕地本底条件提升耕地效益的潜力,进而优化耕地空间格局具有重要意义。开展这项研究对高分辨率耕地布局与作物类型数据,及长时序空间化的耕地投入、土壤性状、工程设施水平、农田生态系统服务水平等定量数据提出高要求,亟需融合星空地的耕地资源感知模型支持;另一项必要条件是突破计算效率限制,研发顾及耕地效益差异的空间模拟与优化模型。另一个重要方向是融合耗散结构、协同学、自组织、突变论等复杂系统理论与方法,研究耕地复杂系统“熵”与“序”的度量方法;探索微观尺度利用方式及其变化对宏观尺度耕地系统“熵变”与“相变”的涌现过程、序参量及临界条件。

致谢:感谢刘焱序、黄庆旭、房德琳、高秉博、谢一茹、王昊煜关于本文部分内容的讨论;感谢蒋嘉益、张晔铎、周坤对部分文献资料的整理;感谢北京师范大学地理科学学部地理数据与应用分析中心地学高性能计算平台支持(<https://gda.bnu.edu.cn/>)。

[参 考 文 献]

- [1] ROSEGRANT M, CLINE S. Global food security: Challenges and policies[J]. *Science*, 2003, 302(5652): 1917-9.
- [2] ALEXANDRATOS N, BRUINSMA J. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision [R]. ESA Working Paper No. 12-03, Rome, Italy: FAO, 2012.
- [3] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *PNAS*, 2011, 108(50): 202604.
- [4] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 刘国华. 农田生态系统服务功能及其形成机制[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 929-934. YIN Fei, MAO Renzhao, FU Bojie, et al. Farmland ecosystem service and its formation mechanism[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 929-934. (in Chinese with English abstract)
- [5] IPCC. Climate Change and Land[R]. 2019.
- [6] COYLE C, CREAMER R, SCHULTE R, et al. A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 56: 39-48.
- [7] VALUJEVA K, O'SULLIVAN L, GUTZLER C, et al. The challenge of managing soil functions at multiple scales: An

- optimisation study of the synergistic and antagonistic trade-offs between soil functions in Ireland[J]. *Land Use Policy*, 2016, 58: 335-347.
- [8] KONG X. China must protect high-quality arable land[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 7.
- [9] DENG X, HUANG J, ROZELLE S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China[J]. *Land Use Policy*, 2015, 45: 1-7.
- [10] YE S, SONG C, SHEN S, et al. Spatial pattern of arable land-use intensity in China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104845.
- [11] YE S, REN S, SONG C, et al. Spatial patterns of county-level arable land productive-capacity and its coordination with land-use intensity in mainland China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107757.
- [12] 叶思菁, 宋长青, 程锋, 等. 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 66-78. YE Sijing, SONG Changqing, CHENG Feng, et al. Cultivated land health-productivity comprehensive evaluation and its pilot evaluation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(22): 66-78. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郎文聚, 汤怀志, 桑玲玲. 树立耕地系统认知, 完善最严格耕地保护制度[J]. *中国土地*, 2022(5): 4-7.
- [14] 郭仁忠, 罗婷文. 土地资源智能管控[J]. *科学通报*, 2019, 64(21): 2166-2171. GUO Renzhong, LUO Tingwen. Intelligent management and control for land resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(21): 2166-2171. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 等. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评价[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 64(7): 1126-1139. YANG Qiong, YANG Zhongfang, ZHANG Qizhuan, et al. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7): 1126-1139. (in Chinese with English abstract)
- [16] 宋长青. 地理学研究范式的思考[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 1-3. SONG Changqing. On paradigms of geographical research[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [17] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合[J]. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059. FU Bojie. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋长青, 张国友, 程昌秀, 等. 论地理学的特性与基本问题[J]. *地理科学*, 2020, 40(1): 6-11. SONG Changqing, ZHANG Guoyou, CHENG Changxiu, et al. Nature and basic issues of geography[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 6-11. (in Chinese with English abstract)
- [19] 宋长青. 地理学要义[M]. 北京: 商务印书馆, 2022.
- [20] 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务[J]. *地理科学*, 2015, 35(8): 939-945. FU Bojie, LENG Shuying, SONG Changqing. The characteristics and tasks of geography in the new era[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 939-945. (in Chinese with English abstract)
- [21] 傅伯杰, 刘焯序. 系统认知土地资源的理论与方法[J]. *科学通报*, 2019, 64(21): 2172-2179. FU Bojie, LIU Yanxu. The theories and methods for systematically understanding land resource[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(21): 2172-2179. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭仁忠, 罗平, 罗婷文. 土地管理三维思维与土地空间资源认知[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 649-658. GUO Renzhong, LUO Ping, LUO Tingwen. Three-dimensional thinking for land management and land space resources recognition[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 649-658. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学[J]. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221-1234. LIU Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234. (in Chinese with English abstract)
- [24] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348. FU Bojie, YU Dandan, LV Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 341-348. (in Chinese with English abstract)
- [25] 龙花楼, 屠爽爽. 乡村重构的理论认知[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(5): 581-590. LONG Hualou, TU Shuangshuang. Theoretical thinking of rural restructuring[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(5): 581-590. (in Chinese with English abstract)
- [26] 龙花楼, 陈坤秋. 基于土地系统科学的土地利用转型与城乡融合发展[J]. *地理学报*, 2021, 76(2): 295-309. LONG Hualou, CHEN Kunqiu. Urban-rural integrated development and land use transitions: A perspective of land system science[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 295-309. (in Chinese with English abstract)
- [27] 于贵瑞, 张黎, 何洪林, 等. 大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2653-2665. YU Guirui, ZHANG Li, HE Honglin, et al. A process-based model and simulation system of dynamic change and spatial variation in large-scale terrestrial ecosystems[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2653-2665. (in Chinese with English abstract)
- [28] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 等. 农业土地系统研究及其关键科学问题[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 900-910. TANG Huajun, WU Wenbin, YU Qiangyi, et al. Key research priorities for agricultural land system studies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(5): 900-910. (in Chinese with English abstract)
- [29] 宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1204-1213. SONG Changqing, CHENG Changxiu, SHI Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213. (in Chinese with English abstract)
- [30] 燕琴, 刘纪平, 董春, 等. 地理空间视角下自然资源认知探讨[J]. *测绘科学*, 2022, 47(8): 9-17. YAN Qin, Liu Jiping, DONG Chun, et al. Natural resources cognition from the perspective of geographic space[J].

- Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(8): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孙敏轩, 焦心, 冀正欣, 等. 草地系统认知理论与光谱融合量化策略[J]. 中国土地科学, 2022, 36(2): 84-95.
SUN Minxuan, JIAO Xin, JI Zhengxin, et al. Grassland system cognitive theory and its spectral identification method[J]. China Land Science, 2022, 36(2): 84-95. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1130-1140.
CHEN Jun, WU Hao, LIU Wanzeng, et al. Technical connotation and research agenda of natural resources spatiotemporal information[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1130-1140. (in Chinese with English abstract)
- [33] 方利, 姚敏, 于忠伟, 等. 三区三线统筹划定中永久基本农田布局优化方法与实证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 42-50.
FANG Li, YAO Min, YU Zhongwei, et al. Optimization method and empirical study on the layout of permanent basic farmland in the overall delimitation of "three land spaces and three control lines"[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- [34] 卫新东, 林良国, 罗平平, 等. 耕地多功能耦合协调发展时空格局与驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 260-269.
WEI Xindong, LIN Liangguo, LUO Pingping, et al. Spatiotemporal pattern and driving force analysis of multifunctional coupling coordinated development of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 260-269. (in Chinese with English abstract)
- [35] 宋小青, 欧阳竹, 柏林川. 中国耕地资源开发强度及其演化阶段[J]. 地理科学, 2013, 33(2): 135-142.
SONG Xiaoqing, OUYANG Zhu, BAI Linchuan. Evaluation and evolution of exploitative intensity of cultivated land resources in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(2): 135-142. (in Chinese with English abstract)
- [36] 郎文聚, 宇振荣. 中国农村土地整治生态景观建设策略[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 1-6.
YUN Wenju, YU Zhenrong. Ecological landscaping strategy of rural land consolidation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [37] 赵海乐, 徐艳, 张国梁, 等. 基于限制因子改良与耕地质量潜力耦合的耕地整治分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 272-282.
ZHAO Haile, XU Yan, ZHANG Guoliang, et al. Farmland consolidation zoning based on coupling of improved limiting factors and farmland quality potential[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 272-282. (in Chinese with English abstract)
- [38] 孙瑞, 金晓斌, 赵庆利, 等. 集成“质量-格局-功能”的中国耕地整治潜力综合分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 264-275.
SUN Rui, JIN Xiaobin, ZHAO Qingli, et al. Comprehensive zoning of cultivated land consolidation potential integrating "quality-pattern-function" in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 264-275. (in Chinese with English abstract)
- [39] 陈艳林, 韩博, 金晓斌, 等. 长江经济带耕地产能变化及土地整治影响分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 182-193.
CHEN Yanlin, HAN Bo, JIN Xiaobin, et al. Analysis of the cropland productivity change and the impact of land consolidation in the Yangtze River Economic Zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 182-193. (in Chinese with English abstract)
- [40] 胡月明, 杨颢, 邹润彦, 等. 耕地资源系统认知的演进与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 937-945.
HU Yueying, YANG Hao, ZOU Runyan, et al. Evolution and prospect of systematic cognition on the cultivated land resources[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 937-945. (in Chinese with English abstract)
- [41] ERB K, HABERL H, JEPSEN M, et al. A conceptual framework for analysing and measuring land-use intensity[J]. [Current Opinion in Environmental Sustainability](#), 2013, 5(5): 464-470.
- [42] 宋恒飞, 辛良杰. 中国耕地利用强度分化特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 212-222.
SONG Hengfei, XIN Liangjie. Differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land use intensity in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 212-222. (in Chinese with English abstract)
- [43] 温良友, 孔祥斌, 张蚌蚌, 等. 基于可持续发展需求的耕地质量评价体系构建与应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 234-242.
WEN Liangyou, KONG Xiangbin, ZHANG Bangbang, et al. Construction and application of arable land quality evaluation system based on sustainable development demand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(10): 234-242. (in Chinese with English abstract)
- [44] 程锋, 王洪波, 郎文聚. 中国耕地质量等级调查与评定[J]. 中国土地科学, 2014, 28(2): 75-82, 97.
CHENG Feng, WANG Hongbo, YUN Wenju. Study on investigation and assessment of cultivated land quality grade in China[J]. China Land Science, 2014, 28(2): 75-82, 97. (in Chinese with English abstract)
- [45] 孙晓兵, 孔祥斌, 张青璞, 等. 基于指标综合特征的耕地遗传质量和动态质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 254-265.
SUN Xiaobing, KONG Xiangbin, ZHANG Qingpu, et al. Evaluation of inherent quality and dynamic quality of cultivated land based on comprehensive characteristics of indexes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 254-265. (in Chinese with English abstract)
- [46] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.
FU Bojie, LIU Shiliang, MA Keming. The contents and

- methods of integrated ecosystem assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885-1892. (in Chinese with English abstract)
- [47] 刘焱序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 5920-5930.
LIU Yanxu, PENG Jian, WANG An, et al. New research progress and trends in ecosystem health[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 5920-5930. (in Chinese with English abstract)
- [48] YAN H, LIU J, HUANG H, et al. Assessing the consequence of land use change on agricultural productivity in China[J]. *Global Planet Change*, 2009, 67(1/2): 13-19.
- [49] KUANG W, LIU J, TIAN H, et al. Cropland redistribution to marginal lands undermines environmental sustainability[J]. *National Science Review*, 2022, 9: nwab091.
- [50] ZINGG S, GRENZ J, HUMBERT J. Landscape-scale effects of land use intensity on birds and butterflies[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 267: 119-128.
- [51] KLEIJN D, KOHLER F, BALDI A, et al. On the relationship between farmland biodiversity and land-use intensity in Europe[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 276(1658): 903-909.
- [52] 龙明顺, 赵宇鸾, 张东丽. 山区耕地细碎化对农户耕地撂荒的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 231-239.
LONG Mingshun, ZHAO Yuluan, ZHANG Dongli. Impacts of mountainous land fragmentation on cultivated land abandonment of farmers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 231-239. (in Chinese with English abstract)
- [53] YANG S, ZHAO W, LIU Y, et al. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: Dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644(10): 556-566.
- [54] GREEN R, CORNELL S, SCHARLEMANN J, et al. Farming and the fate of wild nature[J]. *Science*, 2005, 307(5709): 550-555.
- [55] HERTEL T, RAMANKUTTY N, BALDOS U. Global market integration increases likelihood that a future African Green Revolution could increase crop land use and CO₂ emissions[J]. *PNAS*, 2014, 111(38): 13799-13804.
- [56] ZHAO H, CHANG J, HAVLÍK P, et al. China's future food demand and its implications for trade and environment[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1-10.
- [57] 龙花楼. 论土地利用转型与土地资源管理[J]. *地理研究*, 2015, 34(9): 1607-1618.
LONG Hualou. Land use transition and land management[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(9): 1607-1618. (in Chinese with English abstract)
- [58] LIU F, WU H, ZHAO Y, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67,3(15): 328-340.
- [59] 孙瑞, 金晓斌, 项晓敏, 等. 土地整治对耕地细碎化影响评价指标适用性分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 279-287.
SUN Rui, JIN Xiaobin, XIANG Xiaomin, et al. Applicability analysis of indices in assessment on effect of land consolidation on cultivated land fragmentation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(13): 279-287. (in Chinese with English abstract)
- [60] 程旭东, 陈美球, 赖昭豪, 等. 山区县耕地"非粮化"空间分异规律及关联因素[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 203-211.
CHENG Xudong, CHEN Meiqiu, LAI Zhao hao, et al. Spatial differentiation pattern and correlation factors of "non-grain" cultivated land in mountainous counties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(2): 203-211. (in Chinese with English abstract)
- [61] HAYNES R, NAIDU R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-137.
- [62] WU Y, XI X, TANG X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. *PNAS*, 2018, 115(27): 201806645.
- [63] 马瑞明, 马仁会, 韩冬梅, 等. 基于多层级指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 249-257.
MA Ruiming, MA Renhui, HAN Dongmei, et al. Construction of cultivated land quality evaluation system in provincial level based on multilevel indicators[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(16): 249-257. (in Chinese with English abstract)
- [64] 付娟, 马仁明, 贾燕锋, 等. 机械压实对农田土壤性质及土壤侵蚀的影响研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(Supp.): 27-36.
FU Juan, MA Renming, JIA Yanfeng, et al. Research progress in the effects of mechanical compaction on soil properties and soil erosion in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(Supp.): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- [65] 岳文泽, 韦静娴, 陈阳. 国土空间开发适宜性评价的反思[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(10): 1-10.
YUE Wenze, WEI Jingxian, CHEN Yang. Rethinking suitability evaluation of territorial space development[J]. *China Land Science*, 2021, 35(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [66] 傅伯杰, 陈利顶, 马诚. 土地可持续利用评价的指标体系与方法[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 17-23.
FU Bojie, CHEN Liding, MA Cheng. The index system and method of land sustainable use evaluation[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 17-23. (in Chinese with English abstract)
- [67] 倪绍祥, 黄杏元, 胡友元, 等. 地理信息系统在土地适宜性评价中的应用[J]. *科学通报*, 1992(15): 1403-1404.
- [68] 关小克, 张凤荣, 郭力娜, 等. 北京市耕地多目标适宜性评价及空间布局研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 580-587.
GUAN Xiaoke, ZHANG Fengrong, GUO Lina, et al. A suitability evaluation of cultivated land in Beijing for multi-purposes use and its spatio-temporal investigation[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3): 580-587. (in Chinese with English abstract)
- [69] 翁睿, 金晓斌, 张晓琳, 等. 集成"适宜性-集聚性-稳定性"

- 的永久基本农田储备区划定[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 269-278.
- WENG Rui, JIN Xiaobin, ZHANG Xiaolin, et al. Delimitating permanent prime farmland reserve areas on the perspective of suitability-cluster-stability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 269-278. (in Chinese with English abstract)
- [70] 张甘霖, 吴运金, 赵玉国. 基于 SOTER 的中国耕地后备资源自然质量适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 1-8.
- ZHANG Ganlin, WU Yunjin, ZHAO Yuguo. Physical suitability evaluation of reserve resources of cultivated land in China based on SOTER[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [71] 杨绪红, 金晓斌, 盛修深, 等. 综合适宜性与迫切性的非粮化耕地整治分区方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 287-296.
- YANG Xuhong, JIN Xiaobin, SHENG Xiushen, et al. Consolidation zoning method for non-grain cropland integrating suitability and urgency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(15): 287-296. (in Chinese with English abstract)
- [72] 毕玮, 党小虎, 马慧, 等. 藏粮于地视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 235-243.
- BI Wei, DANG Xiaohu, MA Hui, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of "Food Crop Production Strategy based on Farmland Management" in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 235-243. (in Chinese with English abstract)
- [73] 邱炳文, 池天河, 王钦敏. 基于 GIS 和多目标评价方法的果树适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 96-100.
- QIU Bingwen, CHI Tianhe, WANG Qinmin. Fruit tree suitability assessment using GIS and multi-criteria evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 96-100. (in Chinese with English abstract)
- [74] 秦喜文, 张树清, 李晓峰, 等. 基于证据权重法的丹顶鹤栖息地适宜性评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1074-1082.
- QIN Xiwen, ZHANG Shuqing, LI Xiaofeng, et al. Assessment of Red-crowned Crane's habitat suitability based on weights of evidence[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1074-1082. (in Chinese with English abstract)
- [75] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395.
- FENG Zhiming, YANG Yanzhao, YAN Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395. (in Chinese with English abstract)
- [76] 康艳, 闫亚廷, 杨斌. 基于 LMDI-SD 耦合模型的绿色发展灌区水资源承载力模拟[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 150-160.
- KANG Yan, YAN Yating, YANG Bin. Simulation of water resource carrying capacity based on LMDI-SD model in green development irrigation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 150-160. (in Chinese with English abstract)
- [77] 方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望[J]. 地理学报, 2004, 59(S1): 21-32.
- FANG Chuanglin. Recent progress of studies on man-land relationship and its prospects in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(S1): 21-32. (in Chinese with English abstract)
- [78] 郭秀锐, 毛显强, 冉圣宏. 国内环境承载力研究进展[J]. 中国人口资源与环境, 2000, 10(S1): 29-31.
- GUO Xiurui, MAO Xianqiang, RAN Shenghong. Research progress in environmental carrying capacity in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2000, 10(S1): 29-31. (in Chinese with English abstract)
- [79] 樊杰. 国家汶川地震灾后重建规划: 资源环境承载能力评价[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [80] 樊杰. 芦山地震灾后恢复重建资源环境承载能力评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [81] 黄自立. 黄土高原土地资源适宜性评价及分类[J]. 土壤, 1982(2): 18-22.
- [82] 倪绍祥. 土地类型与土地评价概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [83] 刘友兆, 马欣, 徐茂. 耕地质量预警[J]. 中国土地科学, 2003, 17(6): 9-12.
- LIU Youzhao, MA Xin, XU Mao. Preliminary study on the early warning of cultivated land quality[J]. China Land Science, 2003, 17(6): 9-12. (in Chinese with English abstract)
- [84] 赵登辉, 郭川. 对耕地定级与估价几个问题的思考[J]. 中国土地, 1997(12): 18, 25.
- [85] 李丹, 刘友兆, 李治国. 耕地质量动态变化实证研究——以江苏省金坛市为例[J]. 中国国土资源经济, 2004, 17(6): 24-27.
- LI Dan, LIU Youzhao, LI Zhiguo. Positive study on dynamic change of farmland quality-taking the city of Jintan in Jiangsu Province as example[J]. Natural Resource Economics of China, 2004, 17(6): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- [86] 陈印军, 肖碧林, 方琳娜, 等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3557-3564.
- CHEN Yinjun, XIAO Bilin, FANG Linna, et al. The quality analysis of cultivated land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3557-3564. (in Chinese with English abstract)
- [87] 沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1210-1217.
- SHEN Renfang, CHEN Meijun, KONG Xiangbin, et al. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for its management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1210-1217. (in Chinese with English abstract)
- [88] 付国珍, 摆万奇. 耕地质量评价研究进展及发展趋势[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 226-236.
- FU Guozhen, Bai Wanqi. Advances and prospects of evaluating cultivated land quality[J]. Resources Science, 2015, 37(2): 226-236. (in Chinese with English abstract)
- [89] 杜国明, 刘彦随, 于凤荣, 等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 243-249.

- DU Guoming, LIU Yansui, Yu Fengrong, et al. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 243-249. (in Chinese with English abstract)
- [90] 杜国明, 闫佳秋, 张娜, 等. 面向多元主体需求的耕地质量体系新认知[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 212-222. DU Guoming, YAN Jiaqiu, ZHANG Na, et al. New cognition of the cultivated land quality system for the needs of multiple subjects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(1): 212-222. (in Chinese with English abstract)
- [91] 杨邦杰, 郦文聚, 程锋. 论耕地质量与产能建设[J]. 中国发展, 2012, 12(1): 1-6. YANG Bangjie, YUN Wenju, CHENG Feng. On farmland quality and productivity construction[J]. China Development, 2012, 12(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [92] 王国强, 郦文聚. 土地质量评价研究的简要回顾与展望[J]. 中国土地科学, 2011, 25(7): 92-97. WANG Guoqiang, YUN Wenju. A briefly review and prospects on the land quality evaluation research[J]. China Land Science, 2011, 25(7): 92-97. (in Chinese with English abstract)
- [93] 孔祥斌, 张蚌蚌, 温良友, 等. 基于要素—过程—功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J]. 中国土地科学, 2018, 32(9): 14-20. KONG Xiangbin, ZHANG Bangbang, WEN Liangyou, et al. Theoretical framework and research trends of cultivated land quality based on elements-process-function[J]. China Land Science, 2018, 32(9): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [94] 俞奉庆, 蔡运龙. 耕地资源价值探讨[J]. 中国土地科学, 2003, 17(3): 3-9. YU Fengqing, CAI Yunlong. A new insight of cultivated land resource value[J]. China Land Science, 2003, 17(3): 3-9. (in Chinese with English abstract)
- [95] 唐莹, 穆怀忠. 我国耕地资源价值核算研究综述[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(5): 73-79. TANG Ying, MU Huaizhong. Literature review of value accounting for arable land in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(5): 73-79. (in Chinese with English abstract)
- [96] 霍雅勤, 蔡运龙. 耕地资源价值的评价与重建——以甘肃省会宁县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 5: 81-85. HUO Yaqin, CAI Yunlong. Assessment and restoration of the value of cultivated land resources: A case study of Huining county, Gansu province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 5: 81-85. (in Chinese with English abstract)
- [97] MALYHUS T. An Essay on the Principle of Population[M]. London: Oxford University Press, 1798.
- [98] BROOKFIELD. Notes on the theory of land management[J]. PLEC News and Views, 1993, 1: 28-32.
- [99] FOLEY J, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. Nature, 2011, 478: 337-342.
- [100] ERB K. How a socio-ecological metabolism approach can help to advance our understanding of changes in land-use intensity[J]. Ecological Economics, 2012, 76: 8-14.
- [101] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- FU Bojie, YU Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [102] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259. DAI Erfu, WANG Xiaoli, ZHU Jianjia, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(11): 1250-1259. (in Chinese with English abstract)
- [103] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016. DAI Erfu, WANG Xiaoli, ZHU Jianjia, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J]. Geographical Research, 2016, 35(6): 1005-1016. (in Chinese with English abstract)
- [104] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973. PENG Jian, HU Xiaoxu, ZHAO Mingyue, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 960-973. (in Chinese with English abstract)
- [105] 宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 等. 理解地理“耦合”实现地理“集成”[J]. 地理学报, 2020, 75: 3-13. SONG Changqing, CHENG Changxiu, YANG Xiaofan, et al. Understanding geographic coupling and achieving geographic integration[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75: 3-13. (in Chinese with English abstract)
- [106] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 504-509. FU Bojie, WANG Shuai, SHEN Yanjun, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 504-509. (in Chinese with English abstract)
- [107] 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[J]. 地理学报, 2018, 73(8): 1397-1406. CHENG Changxiu, SHI Peijun, SONG Changqing, et al. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(8): 1397-1406. (in Chinese with English abstract)
- [108] 杨建宇, 岳彦利, 宋海荣, 等. 基于空间模拟退火算法的耕地质量布样及优化方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 253-261. YANG Jianyu, YUE Yanli, SONG Hairong, et al. Sampling and optimizing methods of cultivated land quality based on spatial simulated annealing algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 253-261. (in Chinese with English abstract)
- [109] 杨建宇, 岳彦利, 宋海荣, 等. 基于空间平衡法的县域耕地质量监测布样方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 274-280. YANG Jianyu, YUE Yanli, SONG Hairong, et al. Sampling distribution method for monitoring quality of arable land in county area based on spatial balanced[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2015, 31(24): 274-280. (in Chinese with English abstract)
- [110] WAN C, KUZYAKOV Y, CHENG C, et al. A soil sampling design for arable land quality observation by using SPCOSA-CLHS hybrid approach[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(17): 4889-4906.
- [111] YE S, ZHU D, YAO X, et al. Development of a highly flexible mobile GIS-based system for collecting arable land quality data[J]. *IEEE J-STARS*, 2014, 7(11): 4432-4441.
- [112] 叶思菁, 朱德海, 姚晓闯, 等. 基于移动 GIS 的作物种植环境数据采集技术[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 325-334.
- YE Sijing, ZHU Dehai, YAO Xiaochuang, et al. Mobile GIS based approach for collection of crop planting environment data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 325-334. (in Chinese with English abstract)
- [113] 叶思菁, 张超, 王媛, 等. GF-1 遥感大数据自动化正射校正系统设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(S1): 266-273.
- YE Sijing, ZHANG Chao, WANG Yuan, et al. Design and implementation of automatic orthorectification system based on GF-1 big data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(S1): 266-273. (in Chinese with English abstract)
- [114] 王媛, 叶思菁, 岳彦利, 等. 面向高分一号遥感影像的自动几何配准算法对比[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(S1): 260-266.
- WANG Yuan, YE Sijing, YUE Yanli, et al. Contrast of automatic geometric registration algorithms for GF-1 remote sensing image[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(S1): 260-266. (in Chinese with English abstract)
- [115] YE S, YAN T, YUE Y, et al. Developing a reversible rapid coordinate transformation model for the cylindrical projection[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 89: 44-56.
- [116] WANG K, YE S, GAO P, et al. Optimization of numerical methods for transforming UTM plane coordinates to Lambert plane coordinates[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2056.
- [117] XIONG Q, WANG Y, LIU D, et al. A cloud detection approach based on hybrid multispectral features with dynamic thresholds for GF-1 remote sensing images[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 450.
- [118] YAO X, MOKBEL M, YE S, et al. LandQv2: A MapReduce-based system for processing arable land quality big data[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(7): 271.
- [119] YAO X, MOKBEL M, ALARABI L, et al. Spatial coding-based approach for partitioning big spatial data in Hadoop[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 106: 60-67.
- [120] XIONG Q, ZHANG X, LIU W, et al. An efficient row key encoding method with ASCII code for storing geospatial big data in HBase[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(11): 625.
- [121] YE S, LIU D, YAO X, et al. RDCRMG: A raster dataset clean & reconstitution multi-grid architecture for remote sensing monitoring of vegetation dryness[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1376.
- [122] 叶思菁. 大数据环境下遥感图谱应用方法研究——以作物干旱监测为例[J]. *测绘学报*, 2018, 47(6): 892.
- YE Sijing. Research on application of remote sensing tuputake monitoring of meteorological disaster for example[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(6): 892. (in Chinese with English abstract)
- [123] REN S, SONG C, YE S, et al. The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150322.
- [124] Liu C, Song C, Ye S, et al. Estimate provincial-level effectiveness of the arable land requisition-compensation balance policy in mainland China in the last 20 years[J]. *Land Use Policy*, 2023, 131: 106733.
- [125] LU S, YE S. Using an image segmentation and support vector machine method for identifying two locust species and instars[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(5): 1301-1313.
- [126] YE S, LU S, BAI X, et al. ResNet-Locust-BN network-based automatic identification of East Asian migratory locust species and instars from RGB images[J]. *Insects*, 2020, 11(8): E458.
- [127] YE S, SONG C, GAO P, et al. Visualizing clustering characteristics of multidimensional arable land quality indexes at the county level in mainland China[J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2022, 54(2): 222-225.
- [128] GAO P, XIE Y, SONG C, et al. Exploring detailed urban-rural development under intersecting population growth and food production scenarios: Trajectories for China's most populous agricultural province to 2030[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33: 222-244.
- [129] ZHENG W, LI S, KE X, et al. The impacts of cropland balance policy on habitat quality in China: A multiscale administrative perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116182.
- [130] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 等. 复杂系统理论与 Agent 模型在土地变化科学中的研究进展[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1518-1530.
- YU Qiangyi, WU Wenbin, TANG Huajun, et al. Complex system theory and agent-based modeling: Progresses in land change science[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1518-1530. (in Chinese with English abstract)
- [131] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于改进型 NSGA-II 算法的西安市土地利用多目标优化[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(6): 84-89.
- WANG Haoyu, GAO Peichao, XIE Yiru, et al. Multi-objective optimization of land use in Xining City based on improved NSGA-II [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(6): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [132] 王昊煜, 高培超, 宋长青, 等. 基于遗传算法的土地利用优化研究进展: 文献计量分析 [J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 1286-1293.
- WANG Haoyu, GAO Peichao, SONG Changqing, et al. Land use optimization using genetic algorithms: Bibliometric analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1286-1293. (in Chinese with English abstract)
- [133] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于遗传算法的土地利用优化: NSGA-II 和 NSGA-III 的对比研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 639-649.
- WANG Haoyu, GAO Peichao, XIE Yiru, et al. Land-use optimization based on genetic algorithm: A comparison between NSGA-II and NSGA-III[J]. *Acta Ecologica Sinica*,

2023, 43(2): 639-649. (in Chinese with English abstract)
[134] FOLBERTH C, KHABAROV N, BALKOVIĆ J, et al. The

global cropland-sparing potential of high-yield farming[J].
Nature Sustainability, 2020(3): 281-289.

Construction of the new cognitive system for arable land resources from geospatial perspective

YE Sijing^{1,2}, SONG Changqing^{1,2*}, GAO Peichao^{1,2}, CHENG Feng³, REN Shuyi², DU Bin²

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University Beijing 100875, China;

3. China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China)

Abstract: Arable land is a multiple complex system with food production as its core function and multiple functions such as living, ecology and culture, under the combined effect of natural resource elements and human activities. Currently, the spatial pattern and utilization of arable land in China are changing, showing five phenomena: "non-agricultural", "non-grain", "fragmentation", "marginalization" and "ecological degradation". Previous studies on cultivated land resources cognition emphasize the explicit use of arable land, and mainly focus on state assessment. To a certain extent, they ignore the explicit and implicit comprehensive use of arable land and their mutual feed mechanism with arable land ecosystem, which makes it difficult to quantitatively represent the "regional suitable arable land use intensity and pattern"; early warning "order parameters and their triggering mechanism and inflection point affecting regional arable land health"; trade-off the spatial pattern of arable land production, living and ecological function. The essence of arable land as a kind of resource is its "spatial availability". The unique geographic perspective of the interplay of elements, space and time provides a significant support for understanding the spatial patterns, spatial-temporal dynamic changes, impacts and driving factors of arable land resources. The development of theories and methods for the cognition of arable land resource from a geospatial perspective is the key to exploring a coupled synergistic path of arable land conservation and utilization. In this study, we explored the connotations of arable land resources, based on existing research on the quality and value of arable land resources, including analyzing the "element-function-value" cascade of the natural, livelihood, institutional and consciousness layers, combing the multi-scale, holistic, regional and dynamic characteristics. On this basis, we proposed a theoretical framework for the cognition of arable land resources, suggesting a comprehensive cognition of the pattern of arable land resources from three aspects of arable land resource utilization-noumenon attributes-benefit; developing a coupled utilization-noumenon attributes-benefit model of arable land resources process; and analyzing the influencing mechanism of cultural traditions and socio-economic development on the future demand for crop production. The theoretical basis for the cognition of arable land resources contains a series of theories such as resource carrying capacity, arable land quality, geographical trade-offs and synergies, geographical coupling and integration, and complex geosystems. These theories provide theoretical and methodological support for quantitatively describing the state of utilization, noumenon attributes and benefit of arable land resources, and clarifying the reciprocal effect among them. In particular, the theory of complex geographic systems provides a new way to recognize the evolution of cultivated land systems. Finally, the key technical system and challenges of the cognition of arable land resources have been discussed from four aspects, including space-air-ground integrated arable land resource perception, high-performance spatial-temporal data processing, spatial-temporal pattern and process analysis, and multi-scenario spatial simulation and optimization. China's 2023 "No. 1 central document" sets out goals in terms of strengthening arable land protection and use control, strengthening high-standard farmland construction, and promoting green agricultural development. The theoretical framework of comprehensive cognition of arable land resources proposed in this study can provide support for the realization of these goals in terms of optimizing the spatial pattern of arable land, delimiting the red line of arable land protection, warning the degradation of farmland ecosystem, analyzing the core short board factors of regional high-standard farmland construction, and evaluating the potential of regional arable land to reduce fertilizer (and pesticide) inputs and increase outputs. In the future work, empirical studies on the feed-back mechanism of arable land resources utilization, noumenon attributes and benefit under specific scenarios should be carried out in different regions and scales. Another important direction is to integrate dissipative structure, synergetic, self-organization, catastrophe theory and other complex system theories and methods to study the measurement method of "entropy" and "order" of arable land complex system; and explore the emergence process, order parameters and critical conditions of "entropy change" and "phase change" of macroscale arable land system by micro-scale utilization and its change.

Keywords: land use; arable land; resource description framework; geographic space; intensive use; complex geographic system