

DOI: 10.5846/stxb202106201639

乔治, 蒋玉颖, 贺瞳, 卢应爽, 徐新良, 杨俊. 土地利用变化模拟研究进展. 生态学报, 2022, 42(13): 5165-5176.

Qiao Z, Jiang Y Y, He T, Lu Y S, Xu X L, Yang J. Land use change simulation: progress, challenges, and prospects. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5165-5176.

土地利用变化模拟研究进展

乔 治¹, 蒋玉颖¹, 贺 瞳¹, 卢应爽¹, 徐新良², 杨 俊^{3,*}

¹ 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

² 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

³ 东北大学江河建筑学院, 沈阳 110169

摘要: 土地利用变化研究经历了近 30 年的快速发展, 学者基于不同建模目标构建出多种土地利用变化模型, 实现了从数量模拟到时空格局模拟, 从单一模型向多种模型耦合的跨越。当前研究主要在元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 模型和 CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent) 模型的基础上进行改进, 马尔科夫模型、系统动力学 (System Dynamics, SD) 模型、Logistic 回归和随机森林等均可计算 CA 模型和 CLUE-S 模型中所需的土地利用需求, 多标准评价、地理加权回归、多主体模型以及人工神经网络等方法也多被用于 CA 模型的扩展, 而 CLUE-S 的改进则存在模型本身系列的升级。这些模型广泛应用于各种区域和尺度土地利用变化预测实例研究并研发软件系统和数据集。驱动力分析主要从自然因素与人文因素两方面进行, 人文因素是引发土地利用变化的主要因素。在目前的研究中, 由于技术手段的限制, 仍然存在时空尺度、数据误差、数据整合的不确定性等问题。未来土地利用变化模拟研究应进一步发挥大数据技术优势, 推动土地利用变化模拟研究朝向精细化、多元化方向发展。结合生态环境领域实际问题, 深挖土地利用变化与其生态环境效应之间的互馈机制, 将研究视角从探究人类活动对土地利用变化的影响逐渐转向二者相互作用, 最终促进人地关系协调发展。

关键词: 土地利用变化模拟; 模型; 驱动因素; 时空尺度; 未来发展

Land use change simulation: progress, challenges, and prospects

QIAO Zhi¹, JIANG Yuying¹, HE Tong¹, LU Yingshuang¹, XU Xinliang², YANG Jun^{3,*}

¹ School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Beijing 100101, China

³ Jiangho Architecture College, Northeastern University, Shenyang 110169, China

Abstract: Land use change research has achieved remarkable results through rapid development in recent three decades. Various models have been constructed based on different research objectives of land use change. These models have been developed from quantitative simulation to spatial pattern simulation, from single model to multiple models. Cellular Automata model and the CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effect at Small region extent) model are combined with other models or methods to improve the performance. Markov Chain, System Dynamics (SD), Logistic regression, and Random Forest are all able to calculate the land use requirements in the CA (Cellular Automata) model and CLUE-S model. Multi-criteria evaluation, geographically weighted regression, multi-agent model and Artificial Neural Network are also used to optimize the CA model, and the improvement of CLUE-S includes the upgrade of the CLUE series. These combined models are widely used to the case study of land use change in various regions, and to develop some software

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971389, 41771178); 天津市科技重大专项与工程 (18ZXSZSF00240); 国家高分辨率对地观测重大科技专项项目 (05-Y30B01-9001-19/20-4)

收稿日期: 2021-06-20; 网络出版日期: 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjun@lnnu.edu.cn

systems and datasets. The driving force analysis is mainly carried out from two aspects: natural factors and human factors, and the latter is the main factor that causes land use changes. In the current research, there are still problems of spatiotemporal scale, data error, uncertainties in data integration. In the future, land use change simulation research should further utilize the technological advantages of the big data and promote it to become more refined and diversified. In addition, future research should combine relevant knowledge in the field of ecological environment and dig deeper into the mutual feedback mechanism between land use change and its ecological environment effects. The research perspective can shift from exploring the impact of human activities on land use changes to the interaction between land use change and human activities for promoting the coordinated development of human-land relationships.

Key Words: land use change simulation; model; driving factors; spatiotemporal scale; future development

土地利用变化是改变生态环境质量的重要因素,也是人类活动对自然环境施加影响的显著表现形式。快速的城市扩张以及持续的经济和人口增长,迫使土地利用方式发生了巨大变化。土地利用格局不断演变,进而对区域乃至全球生态环境造成影响,如耕地流失、城市热岛效应、空气污染、森林面积和生物多样性减少^[1-4]。因此,研究土地利用变化是生态环境保护 and 可持续发展的必然要求。国际地圈与生物圈计划和全球环境变化人文计划共同提出的“土地利用与土地覆被变化”计划和《土地利用与土地覆被变化研究实施战略》为研究土地利用变化提供了方向。该计划和实施战略特别指出要进一步探究土地利用变化机制,分析影响土地利用变化的自然及人文驱动因素;其次,要提高模拟和预测土地利用变化的能力,构建区域和全球土地利用变化综合预测模型^[1]。本文总结众多学者的研究成果,综述近年来国内外土地利用变化模拟的研究趋势,从多模型耦合角度归纳了当前常用土地利用变化模型及产品,对各种影响因子的驱动作用进行归纳分析,提出当前研究中所面临的挑战,并进一步对未来土地利用模拟工作进行展望。

1 研究趋势

本研究以 Web of Science“核心合集”数据库以及中国知网“CSSCI”和“CCSD”数据库为文献来源,对近年来所开展的土地利用变化预测模拟主题研究进行统计。分别设置检索规则为“TS=(("land use change" OR "land cover change" OR LUCC) AND (model * OR predict * OR simulat *))”以及“(SU=土地利用变化 OR SU=土地利用演变 OR SU=土地利用/覆被变化 OR SU=LUCC OR SU=土地利用时空变化) AND (SU=模拟 OR SU=预测)”,截止时间为 2020 年。以“利用模型方法对土地利用变化进行模拟和预测”为依据,在检索出的结果中进一步筛选出 1172 篇英文文章以及 404 篇中文文章。图 1 表示 1998—2020 年中英文文章发表数量动态。从全球范围看,2000 年之前是土地利用变化模拟研究的初始阶段,该阶段关于模型模拟和预测的研究相对较少;进入 21 世纪,随着地理信息技术的发展和多源遥感数据的使用,土地利用变化模拟研究呈现明显的上升趋势;2013 年之后,遥感云平台 and 机器算法等技术的快速发展在极大程度上促进了土地利用变化模型研究。针对国内研究,2005—2010 年是我国土地利用变化模拟研究发展最为迅速的时期,尽管 2010 年后中文文章数量有所波动,但该时期我国学者所发表英文文章数量显著增加。图 2 是 1998—2020 年不同国家和我国不同机构所发表文章状况。按第一作者所在国家或单位进行统计,选取发表文章数量最多的 20 个进行展示。在全球范围内,中国是发表土地利用变化模拟主题文章最多的国家,发表相关英文文章 386 篇,占比达到 32.94%;其次是美国(296 篇,占比 25.26%)。中国科学院地理科学与资源研究所(21 篇)、南京大学(18 篇)和北京师范大学(17 篇)在该领域处于领跑地位。

2 土地利用变化模型及成果

2.1 土地利用变化模拟的研究范式

土地利用变化模拟已发展出四种研究范式,包括实证主义范式、科学人文主义范式、结构功能主义范式以

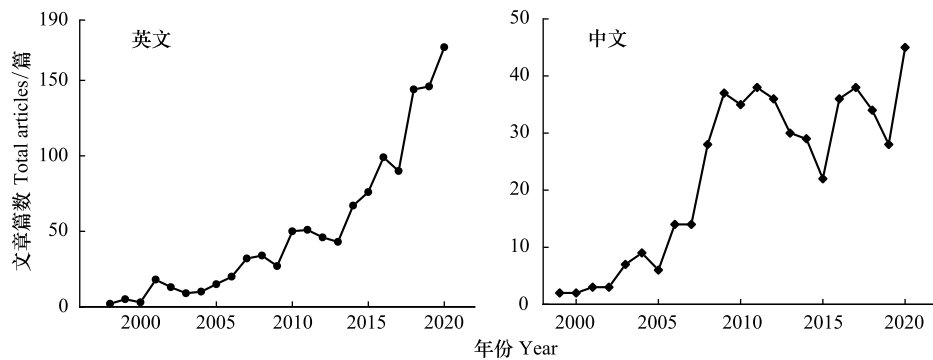


图 1 1998—2020 年中/英文文章发表数量时序图

Fig.1 Number of English/Chinese articles published in 1998—2020

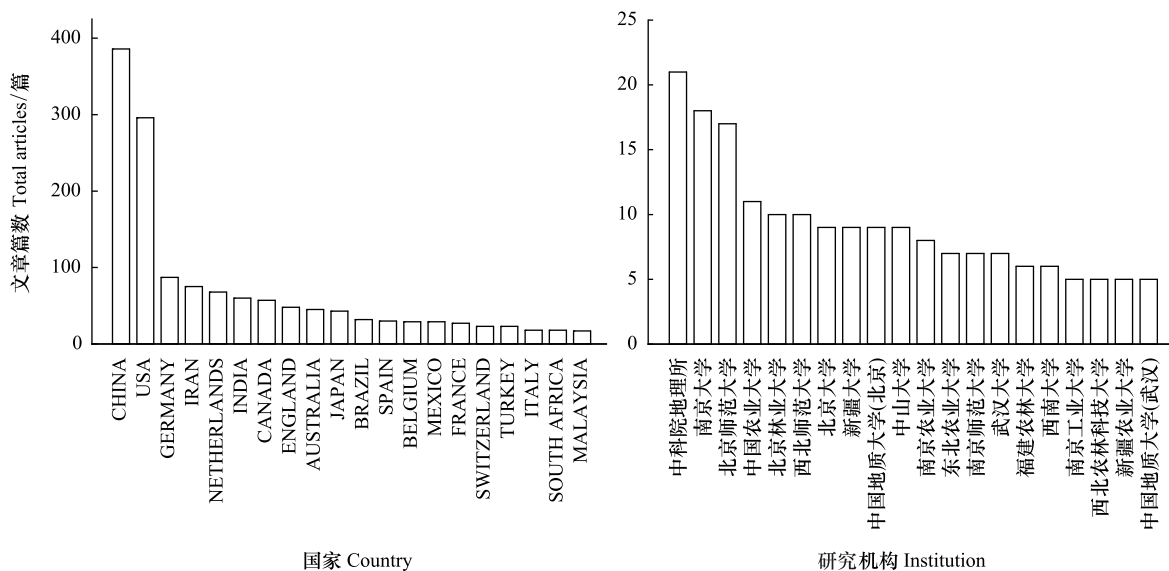


图 2 1998—2020 年不同国家/研究机构发表文章状况

Fig.2 Number of articles published by different countries/institutions from 1998 to 2020

及复杂性范式,各范式之间并非简单地替代或否定,而是从主体论、认识论和方法论的角度不断进行修正^[5]。当前土地利用变化模拟研究主要以实证主义范式为主,并向复杂性范式过渡,即以土地利用变化模型为研究工具,结合复杂性科学的理论方法,探究土地利用变化内部的特征以及驱动因素的作用^[5-6]。通过对比分析众多土地利用变化研究,梳理出当前研究的基本范式(图 3)。

首先根据研究目标以及研究地区的实际情况,选择合适的土地利用变化模型。通过遥感技术解译长时间序列土地利用数据;利用地理信息系统对自然因子和社会经济因子空间化,对于无法量化的政策、技术等因子可以作为土地利用类型转换的限制条件。在此基础上,探讨土地利用时空变化的驱动机制并建立多种驱动因子对于土地利用变化的驱动规则。通过单步长模拟,将模拟结果与真实土地利用数据对比,利用 Kappa 系数或总精度判定该驱动规则是否达到精度要求。如满足精度要求,则可设置不同发展情景(如基准发展情景、快速发展情景、生态保护发展情景、耕地保护发展情景等),预测未来多情景下土地利用的非空间需求和空间分配。

2.2 常见土地利用变化模型

现阶段土地利用变化模型主要包括马尔科夫模型(Markov)、系统动力学模型(System dynamics, SD)、元

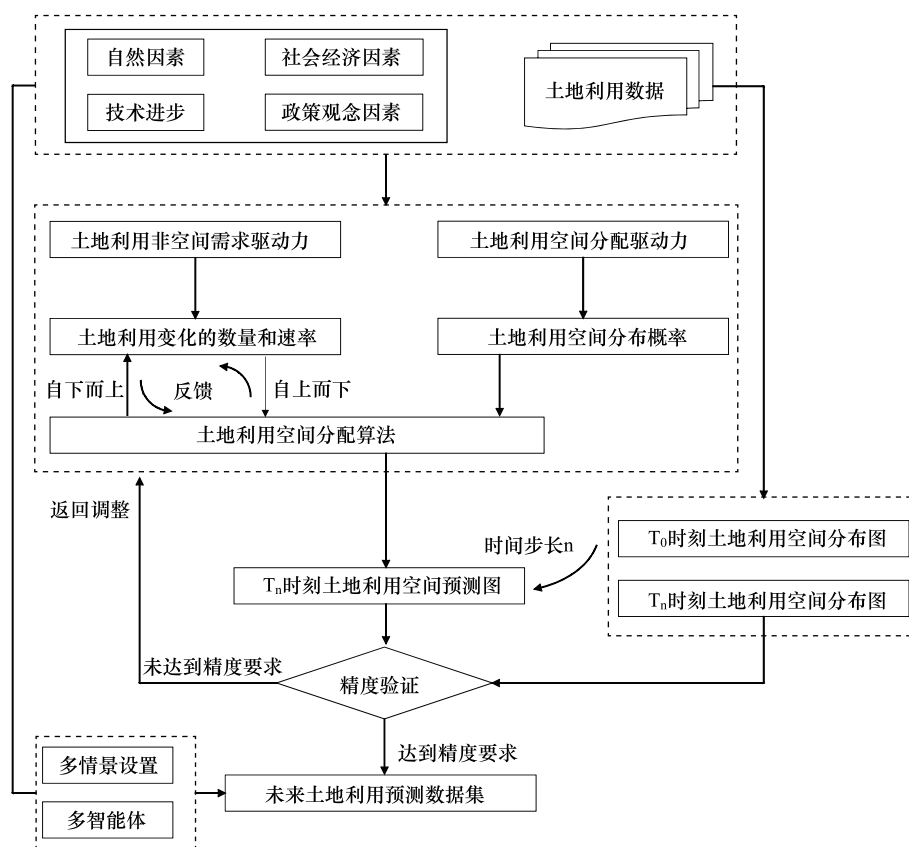


图3 土地利用变化预测模拟范式图

Fig.3 Flow chart of land use change prediction and simulation

胞自动机 (Cellular Automata, CA)、SLEUTH 模型 (Slope-Land use-Exclusion-Urban extent-Transportation-Hill shade model)、CLUE-S 模型 (Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent model)、多主体模型 (Agent-Based Model, ABM)、FLUS 模型 (Future Land Use Simulation) 和 GeoSOS (Geographical Simulation and Optimization System) 等。各模型在土地利用变化模拟过程中有其明显的优势和限制 (表 1)。目前, 几乎没有单一的模型能够捕捉土地利用变化的所有复杂特征。因此, 多模型耦合或综合其他方法改进模型成为土地利用变化模型发展的主要趋势^[7]。

2.2.1 CA 模型及其拓展

CA 模型是一种基于栅格邻域关系的时间、空间、状态都离散的动态模拟模型, 主要包括元胞、元胞状态、元胞空间、邻域和转换规则等 5 个基本元素。确定转换规则是 CA 模型的核心, 通常“自下而上”的转换规则要体现出复杂系统局部的个体行为产生全局、有序模式。利用不同的模型或方法挖掘 CA 模型的转换规则, 能够提高模型的预测模拟能力和科学性。通过 Markov 过程得到的土地利用类型转移概率矩阵可以作为 CA 全局转换规则, 进一步利用层次分析法、加权线性合并、频率比等提取限制因子并计算其权重, 结合约束条件生成适宜性图集^[9-11], 有效提高 CA 模型模拟精度。与 Logistic-CA 相比, 许多学者还发现利用地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR) 计算非城市用地向城市用地转换的概率, 能够使 CA 模型转换规则具备空间非平稳性驱动机制, 且整体精度更高, 适用于快速城市化地区土地利用变化和城市扩展模拟^[12-15]。ABM 模型与 CA 模型结合, 以元胞邻域为主体的空间环境, 主体的决策和行为对元胞状态产生影响, ABM 层和 CA 层分别计算得到转移概率, 并在 GIS (Geographic Information System) 环境下得到综合结果, 从而体现出人类活动对土地利用变化的多主体影响过程^[16-18]。除上述方法, 利用机器学习方法确定 CA 模型转换规则和相关参数有利于避免人为设置转换规则而产生的不确定性。随机森林算法对于异常值和噪声

具有很好的容忍度且不易出现过拟合现象,因此可以用来提高 CA 模型模拟性能^[19–20]。人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 是挖掘 CA 模型转换规则时应用最广泛的机器学习方法之一,包括 BP (Back Propagation) 神经网络^[21–22] 和多层感知器 (Multi-Layer Perceptron, MLP)^[23–24] 等。刘小平等^[25] 在 CA 模型中引入自适应惯性系数和轮盘赌竞争机制,结合 ANN 提出了 FLUS 模型并通过实例证明 FLUS 模型在土地利用变化预测研究中精度较高。Chen 等^[26] 用 Markov-FLUS 模型预测了北海道三种不同发展情景下的土地利用变化。张经度等^[27] 在 FLUS 模型中引入空间自相关因子,探究土地利用数据中可能存在的空间自相关效应。黎夏等^[28] 耦合 CA、多智能体系统、生物智能等研发了地理模拟与优化系统 (GeoSOS) 用于模拟、预测和优化复杂地理格局和过程。

表 1 常用土地利用变化模型
Table 1 The popular land use change models

模型 Model	特征 Feature	主要优势 Main advantage	主要限制 Main limiting
马尔科夫模型 Markov model	数量模型;具有稳定性和无后效性;通过土地利用转移矩阵计算转移概率。	能够进行长期预测;能够量化土地利用类型的转换状态和转换速率。	无法描述空间尺度上的变化。
系统动力学 System dynamics	以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为手段,获得不同因素下的土地利用需求。	能够反映复杂系统的结构、功能和动态行为之间的相互作用关系,进行情景模拟。	难以处理空间信息,缺少对土地利用空间格局描述的能力。
元胞自动机 Cellular automata	通过局部简单的规则改变元胞状态,从而产生宏观的土地利用变化结果。	易与其他模型集成提高模拟能力;强大的空间运算能力;易与 GIS 环境和遥感数据结合;较好地表示邻域作用。	转换规则需要依靠经验统计或专家知识;不容易将社会经济因素纳入整个模拟过程。
SLEUTH 模型 SLEUTH model	基于 CA 模型发展而来;校正不同参数组合得到合适的结果替代历史数据,模拟和预测土地利用变化。	操作简单、开放式存取、精度高,适用于城市增长模拟及长期预测。	较少考虑社会经济因素的影响。
CLUE-S 模型 CLUE-S model	将不同土地利用类型需求分配到空间位置上。	能够同时模拟多种土地利用变化。	非空间模块需要借助独立的数学模型进行计算;忽视非主导地类转化的可能性。
多主体模型 Agent-Based Model	模拟异构主体的决策和行为,解释主体对土地利用变化的作用。	能够模拟主体之间、主体与环境间相互作用;能够将社会过程和非经济因素纳入决策 ^[8] 。	根据案例情况定义规则,其规则不具普适性;难以表现主体空间行为。
FLUS 模型 FLUS model	基于 ANN、SD 模型和 CA 模型,引入自适应惯性系数和轮盘赌竞争机制,确定最终用地类型。	非主导地类转化存在可能;能模拟跳跃式土地利用变化情形。	难以清楚反映不同区位上土地利用变化的空间差异。
GeoSOS 模型 GeoSOS model	一种融合 CA、多智能体和生物智能的综合分析平台。	具有自主知识产权,形成独立的操作系统,将地理模拟和优化有机结合。	对于识别非线性转换规则和转换规则的空间变异性具有局限性

表中英文缩写全称为, SLEUTH 模型:其名称为输入层的首字母缩写,坡度图层 Slope,土地利用图层 Land Use,排除图层 Exclusion,城市空间范围 Urban Extent,交通图层 Transportation,山体阴影图层 Hill Shade, Slope-Land use-Exclusion-Urban extent-Transportation-Hill shade model; CLUE-S 模型:小尺度土地利用变化及其空间效应 Conversion of Land use and its Effect at Small region extent; GIS:地理信息系统 Geographic Information System; FLUS 模型:未来土地利用变化情景模拟模型 Future Land Use Simulation; ANN:人工神经网络 Artificial Neural Network; GeoSOS:地理模拟优化系统 Geographical Simulation and Optimization System

2.2.2 CLUE-S 模型及其拓展

CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学 Peter H. Verburg 团队在其开发的 CLUE 模型基础上改进的适用于小尺度土地利用变化模拟的经验统计模型。CLUE-S 模型的理论框架包括非空间需求模块和空间分配模块。非空间需求模块计算不同类型用地需求总量,这一部分需要借助独立的数学模型完成。采用 Logistic 回归分析土地利用类型和驱动因子之间的关系,并生成各用地类型的空间分布概率适宜图;通过调整转换弹性系数来设置各用地类型的稳定程度(调整转换弹性系数值越大,则该用地类型越稳定);空间分配模块根据空间分布

概率适宜图、用地类型的调整转换弹性系数和迭代变量,经过多次迭代,把用地需求总量全部分配到研究区域的空间位置上^[29]。Markov 模型^[30]、SD 模型^[31]以及随机森林算法^[32]等可用于计算 CLUE-S 模型非空间模块用地需求总量。Verburg 等^[33]在 CLUE-S 模型的基础上改进得到 Dyna-CLUE 模型,在总概率中引入邻域适宜性,将“自上而下”的用地需求空间分配和“自下而上”的总适宜性和转换设置相结合,适用于大尺度过程与局部动力学相互作用的其他区域和过程。严冬等^[34]利用 SD 模型计算 Dyna-CLUE 模型中非空间模块的土地利用需求,考虑土地利用类型与驱动因子的非线性关系,通过级联前馈神经网络模型计算空间适宜性,预测了 2030 年岷江上游地区不同发展情景下的土地利用变化;Yang 等^[35]则选择 Markov 模型计算土地利用需求,输入 Dyna-CLUE 模型,预测了京津冀城市群在自然发展、农田保护和生态安全等三种发展情景下的 2030 年土地利用状况。Asselen 和 Verburg^[36]开发的 CLUMondo 模型是 CLUE 系列的最新版本,CLUMondo 模型以土地系统作为基本建模单元,以粮食生产、住房等需求驱动土地利用变化,且允许一种需求对应多个不同的土地系统,基于驱动力分析动态模拟土地利用系统竞争,且该模型多用于不同发展情景下的土地利用变化预测研究中^[37-40]。

2.3 土地利用变化模型开发产品

通过设置不同社会经济发展情景,不同学者和团队研发了未来土地利用变化预测数据集(表 2)。这些数据集大多都基于政府间气候变化专门委员会推出的与温室气体排放相关的全球社会经济发展情景,包括共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)和代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)。SSPs 包括 SSP1 (Sustainability, 可持续路径)、SSP2 (Middle of the Road, 中间路径)、SSP3 (Regional Rivalry, 区域竞争路径)、SSP4 (Inequality, 不均衡路径)和 SSP5 (Fossil-fueled Development, 化石燃料为主发展路径)等 5 种典型路径;RCPs 中 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5 最为常用。模拟得到的这些数据集可直接获取并应用于其他研究中,为土地利用预测模拟提供数据支撑。

表 2 部分土地利用变化预测数据集
Table 2 The predicted land use change datasets

成果 Product	开发团队 Team	时间跨度 Time	情景设置 Scenario	来源 Source
高精度的全球未来 100 年土地利用模拟产品 Global land-use and land cover change (LUCC) simulation product at a 1 km resolution	黎夏 ^[41]	2010—2100 年	根据 IPCC 排放情景特别报告设置了 4 种情景	http://geosimulation.cn/download/GlobalSimulation/
全球未来土地利用预测数据集 FROM-GLC 系列 Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover	宫鹏 ^[42]	2050—2100 年	四种 RCP 情景包括 RCP2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5	http://www.geodata.cn
Global 1/8-Degree Urban Land Fraction Grids, SSP-Consistent Projections and Base Year, v1 (2000—2100)	Jing Gao 和 Brian C. O'Neill ^[43]	2000—2100 年	对应 SSPs 设置的城市化、稳定城市化和快速城市化情景	https://dataverse.harvard.edu/dataverse/geospatial_human_dimensions_data
GCAM-Demeter land use dataset at 0.05-degree resolution	Min Chen 等 ^[44]	2015—2100 年	基于 SSPs 和 RCPs 设计的 15 种情景	https://www.nature.com/articles/s41597-020-00669-x#Sec5
AIM-SSP/RCP Gridded Emissions and Land-use data	Fujimori 等 ^[45]	200—2100 年	五种 SSPs 情景	https://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/aimssp/aimssp.html
Land Use Harmonization	George C. Hurtt 等 ^[46]	850—2100 年、2100—2300 年	基于 SSPs 和 RCPs 设计的 8 种情景	https://luh.umd.edu/data.shtml

IPCC:联合国政府间气候变化专门委员会 Intergovernmental Panel on Climate Change;SSPs:共享社会经济路径 Shared Socioeconomic Pathways;RCPs:典型浓度路径 Representative Concentration Pathways,其中 RCP2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5 为不同浓度情景;GCAM:Global Change Analysis Model;AIM:Asia-Pacific Integrated Model

3 驱动力分析

土地利用变化是一种空间现象,具有高度的空间异质性,在类型、结构、功能以及机制上还具有高度的复杂性。驱动力分析有利于深入探索土地利用变化的原因、内部机制以及基本过程,预测未来土地利用变化的发展趋势,为制定相关政策、优化土地利用格局提供支持,同时也是 LUCC(Land Use and Land Cover Change)研究中的核心内容之一^[47]。驱动力研究首先要在多种因子中识别出对土地利用变化起主导作用的驱动因子,常用 Logistic 回归、层次分析法、主成分分析法等方法;在识别主导驱动因子的基础上,进一步探究驱动力作用并模拟驱动过程。当前研究中影响土地利用变化的驱动力主要包括自然因素、社会经济因素以及政策、观念因素,并可以进一步细化出不同的驱动因子,如表 3 中所示。自然因素在长时间序列上对土地利用变化的影响效果明显;但在短时间内,自然因素相对稳定,社会经济、政策、观念等人文因素相对活跃,因此后者成为引发土地利用变化的主要因素^[48]。

表 3 常用土地利用变化驱动因子
Table 3 The popular drivers of land use change

类型 Type	驱动因子 Driving factor	举例 Example	部分(开源)数据来源 Partial (Open Source) data sources
自然因素 Natural factor	地形	海拔、坡度、坡向、地形地貌等	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	气候	气温、积温、降水、日照、风速等	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
	土壤性质	土壤 pH、土壤盐分、土壤有机质、土层厚度等	中国土壤科学数据库(http://vdb3.soil.csdb.cn/)、 国家地球系统科学数据中心(http://soil.geodata.cn/data/) 世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database) (http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/)
社会经济因素 Social and economic factor	经济发展	城镇化程度、国内生产总值、夜间灯光数据等	各省《统计年鉴》 夜间灯光数据(https://eogdata.mines.edu/products/vnl/) 珞珈一号(http://59.175.109.173:8888/app/login.html)
	人口	人口密度、年龄结构、教育水平等	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/tjsj/pcsj/) 全球人口密度数据(https://www.worldpop.org/) 全球人口动态统计分析数据库 (https://www.satpalda.com/product/landscan/)
	区位条件	到市中心、道路、海岸线、河流、生活设施(如医院、学校等)等的距离	百度地图开放平台(https://lbsyun.baidu.com/) 高德开放平台(https://lbs.amap.com/) Open Street Map (https://www.openstreetmap.org)
	技术发展	农业科技技术、轮作制度、建筑技术等	行业统计年鉴
政策和观念因素 Policies and awareness factor	政策	退耕还林还草、《基本农田保护条例》、《土地管理法》、设立自然保护区等	各级政府官网
	价值观念	生态环境保护观念、土地资源保护理念、消费理念等	

地理现象的时空动态变化过程往往比其最终形成的空间格局更为重要。例如,温度、降水等气候因子的变化直接影响植被的生长条件以及种植适宜性,进而决定了该地区能否发展为耕地,如全球变暖导致我国稻田种植区北移,因此东北地区黑龙江和吉林省出现由沼泽地甚至是草地转向农田的现象^[49];年平均降水量的增加促进了张家口市农牧交错带耕地向园林地转换^[50]。海拔、坡度、坡向等地形因子一方面与温度、光照等条件有一定关系,决定了植被的分布和生长状况,从而影响耕地数量;另一方面,地形的平坦度限制了机械运作能力,特别是农业耕作和机械化建设,地形起伏大还会导致耕地破碎化严重,因此耕地和建设用地的开发受

到限制。如青藏高原地区的建设用地和耕地的扩张集中在河湟谷地和“一江两河”相对低海拔地区^[51]。此外,土壤是作物生产的载体,土壤肥力、土壤 pH、土壤含氮量等性质变化,影响土地利用决策者判断该地块是否能够用作耕地。由此可见,自然因素驱动力往往通过影响土地种植潜力及可开发性来限制耕地和建设用地的面积,间接地推动或抑制二者与其他地类之间的转换。

社会经济发展极大程度上改变了土地利用变化方式。经济发展和人口增长往往是城市增长边界以及人文社会极为活跃的“热点地区”最重要的驱动因子。经济快速发展,产业结构调整,在追求经济利益最大化的同时,城镇建设用地面积不断扩大,其与耕地等农用地之间的冲突更为明显。人口增长导致粮食的需求量增加,对耕地的面积和产量提出更高要求;但人口增长无疑也需要更多的居民住宅用地。这种矛盾推动各领域在技术层面不断地发展和革新,如高层建筑以及立体交通等建筑技术的发展,既能够满足发展需求,又能够在一定程度上控制建设用地的扩张;高密度种植的发展、灌溉方式的改进、新型肥料的研发等,在提高农作物的产量的同时有效减缓了其他用地类型(林地、水域等)向耕地转换。区位条件对土地利用变化的驱动作用在一定程度上取决于城市土地租金。例如,工业企业由市区迁至靠近各级交通线路的城市边缘,而第三产业逐渐进驻市中心,这种产业间对区位条件的响应促进了城市内商贸用地的增加。另一方面,区位条件对土地利用变化的驱动作用还表现在土地利用主体对于便利性的追求。例如,在学校、地铁站、医院、公园等公共场所附近,住宅用地相对聚集;耕地分布更集中于农业灌溉水源、主要河流、主要道路等开展农业活动更为便利的地区。

国家或各级政府颁布的相关政策通常对土地利用变化起到强制性作用。比如,退耕还林还草政策的实施,加速了生态脆弱区耕地向林地、草地的转换;《基本农田保护条例》的颁布和《土地管理法》的修订严格限制了耕地向其他地类转化。随着人们受教育程度的增加以及传媒方式的改变,生态环境保护观念以及土地资源保护理念逐渐普及,农业工作者愿意选择保护土地资源的耕作方式和技术手段,促进耕地保护。因此,社会经济和政策观念等人文因素对土地利用变化的驱动作用主要来源于土地利用主体对土地资源经济利益最大化的追求。

4 研究挑战

4.1 土地利用变化尺度问题

时空尺度问题仍然是土地利用变化研究的难点之一,包括驱动力尺度问题以及不同时空尺度下土地利用变化特征。土地利用变化驱动力作用以及影响效果是动态的,同一驱动因子在不同时间或空间上会有不同表现。并且,在不同的时空尺度上,驱动因子的细化程度不一样。小尺度的研究区所选取的驱动因子要比大尺度驱动因子的精细化程度更高^[52-53]。同样,土地利用格局在不同时空尺度上也表现出不同变化规律。尺度过大,容易忽略局部重要的细节变化;尺度过小,难以掌握全局变化规律。当前研究中,在空间尺度上的选择取决于研究者的目的或偏好;时间尺度的选择往往取决于数据的可选择性或是经验判断。因此,如何选择最佳时空尺度并分析其内在规律及驱动作用,厘清土地变化的格局和过程,暂未形成系统的理论依据。另外,由于土地利用变化具有高度的时空异质性,单一尺度的研究不能充分反映不同时空尺度土地利用变化的特点,不同尺度上获得的结论并不能简单上推或下推,需要通过局地、区域、全球等尺度分析和尺度效应研究掌握土地利用变化的内在规律和尺度依赖性,最终实现尺度综合。但如何进行尺度综合,如何找到不同尺度间的“联结点”仍然存在一定难度。

4.2 数据误差问题

土地利用变化模拟研究中常使用的数据包括两大类:土地利用历史数据和驱动因子数据。其中土地利用历史数据主要来源于遥感技术产品和野外调查数据,这些数据本身存在的误差和不确定性在一定程度上降低了预测结果的准确性。此外,驱动因子数据需要与土地利用数据在时空分辨率上相统一,这一过程可能会导致数据失真,从而影响模拟精度。人文驱动因子的定量化与空间化依然需要进一步探究。目前,国内外对社

会经济因子的空间化主要集中在人口数据空间化和 GDP (Gross Domestic Product) 数据空间化两方面,如应用广泛的全球栅格人口分布数据 WorldPop、LandScan 等。政策实施、价值观念、技术发展程度等因素对土地利用变化也有显著的影响,且对于不同地方或区域的影响程度不同,但目前研究中这些因素仍然难以定量表示,在空间上的可视化表现为“地方”均一性,无法考虑像元空间差异。

4.3 系统理论体系问题

当前土地利用变化模拟研究主要围绕在模型模拟、驱动力分析以及未来土地利用时空格局等方面,其最终目的在于通过模拟探索土地利用朝着有利于人类社会发展方向进行的途径,并为土地利用决策主体提供理论支撑。了解土地利用变化的环境效应,促进社会经济可持续发展是土地利用变化模拟研究的重要命题。但由于研究中存在不同空间尺度,各种研究范围和空间尺度存在较大差异,且数据和模型的选择均取决于数据来源和研究者偏好,最终输出结果的精度又受到数据是否规范以及模型适配性的影响,亟需构建较为严谨的土地利用变化模拟研究理论和技术体系,应对土地利用变化产生的负面环境影响,最终形成科学的研究范式。

5 研究前景

5.1 强化土地利用高时空分辨率探测

未来土地利用变化模拟将朝向精细化、多元化的方向发展,势必对数据量、数据源、数据精度以及计算能力提出更高要求。当前处于信息技术发展的新阶段,在应用 3S 技术的基础上,发挥大数据、人工智能等新技术在数据获取和数据挖掘上的优势,建立大容量、多尺度、高精度的时空地理数据库。在此基础上,进一步强化定量方法体系,在土地利用变化模拟中引入机理模型,以处理更复杂的地理数据。此外,精细化探测还包括土地系统细微变化的研究。如同一地类上植被、建筑类型等的更替导致土地利用强度和方式的改变。基于地下空间、立体交通以及高层建筑等的应用,土地利用变化预测研究可逐渐发展到三维立体空间。

5.2 细化系统要素时空协同关系研究

土地利用变化不仅是区域社会经济要素主导下的主动选择过程,同时也是全球变化、国家政策变化等宏观因素作用下的适应过程。其中,土地利用变化的环境效应是全球变化研究和可持续发展关注的重点,已有环境效应研究主要侧重于大气环境、水环境、土壤环境、生物多样性以及生态系统服务等方面的模拟评估,发展出多种相关模型,如 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)等,这些模型将土地利用变化作为变量之一,分析其他环境要素或指标对土地利用变化的响应;同时,这些环境效应又会反作用于驱动力系统,从而限制土地利用变化强度和方向,表明土地利用变化与生态环境效应之间存在互馈作用。另外,各环境要素之间存在着复杂的非线性关系,不同环境要素之间相互影响,土地利用格局显现出空间自相关和空间互相关。因此,在各种环境要素综合作用背景下,挖掘土地利用变化与环境效应之间的互馈机制,探讨自组织系统的邻域时空协同关系,可为土地系统与生态环境保护提供理论支撑。

5.3 深化人地系统相互驱动认知

科学地认识和协调人地关系是实现可持续发展的必要条件,而土地利用是人地关系的核心问题,土地利用变化也是研究人地关系的重要途径。近年来,不断有研究考虑了人类活动对土地利用变化产生的影响,并以驱动因子的形式体现在土地利用变化模拟过程中。然而,土地利用变化的方向和强度也对人类的活动和认知产生了一定的影响,但是这一点很少出现在模拟研究工作中。未来土地利用变化模拟有望从人地相互驱动视角进行,通过挖掘土地利用变化与人类活动之间的相互影响,促进建立科学的土地利用观念,调整和约束人类行为。

6 总结

当前土地利用变化模型向多模型耦合方向发展,在一定程度上能够回答土地利用/覆被在何时、何地、为

何以及发生怎样的变化并导致何种特别的生态环境效应,并且研发出多套土地利用预测数据集。驱动力分析已经由自然因素分析转向自然因素与人文因素相结合。但是,时空尺度、数据误差、数据整合的不确定性以及难以形成系统的理论体系等问题,使得土地利用变化模拟研究仍然需要不断发展新的技术手段和大量的研究案例。未来土地利用变化模拟研究需要利用多元数据和多尺度数据融合、数据挖掘、空间制图等技术,朝向精细化、多元化方向发展。同时更深层次地考虑土地利用变化的生态环境效应,实现生态目标和经济效益相结合的目标;要将研究视角逐渐扩大至土地利用变化对人类活动的反馈作用,促进人地关系协调发展。最终,期望将土地利用变化研究成果应用于实际工作中,如以实际社会经济发展状况为基础,明确土地利用空间格局以及土地利用类型的转化方向,推进统筹协调、建设用地集约化、优化土地资源配置等工作开展,从而贯彻落实国土空间规划要求;或在当前政策导向下,以保证生态安全、粮食安全为前提,模拟预测未来土地利用变化,为及时调整国家发展战略以及修订或补充相关政策提供理论依据,实现生态保护和经济发展协同共进的生态文明建设和可持续发展目标。

参考文献 (References):

- [1] Pielke R A Sr. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310(5754): 1625-1626.
- [2] Sun W, Liu Z H, Zhang Y, Xu W X, Lv X T, Liu Y Y, Lyu H, Li X D, Xiao J S, Ma F L. Study on land-use changes and their impacts on air pollution in Chengdu. *Atmosphere*, 2020, 11(1): 42.
- [3] Hu Y F, Batunacun, Zhen L, Zhuang D F. Assessment of land-use and land-cover change in Guangxi, China. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2189.
- [4] Powers R P, Jetz W. Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4): 323-329.
- [5] 高江波, 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究范式的转变. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 114-120.
- [6] 何志超, 赵春红, 李国煜, 郭青海. 从空间规划到土地利用变化——差异、现状、挑战和未来方向. *城市规划*, 2020, 44(10): 9-19.
- [7] Rounsevell M D A, Pedrolí B, Erb K H, Gramberger M, Busck A G, Haberl H, Kristensen S, Kuemmerle T, Lavorel S, Lindner M, Lotze-Campen H, Metzger M J, Murray-Rust D, Popp A, Pérez-Soba M, Reenberg A, Vadineanu A, Verburg P H, Wolflechner B. Challenges for land system science. *Land Use Policy*, 2012, 29(4): 899-910.
- [8] 贺增红. 土地利用变化模型方法评述. *环境科学导刊*, 2019, 38(S2): 15-21.
- [9] Gidey E, Dikinya O, Sebege R, Segosebe E, Zenebe A. Cellular automata and Markov Chain (CA-Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015 - 2033) in Raya, northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2017, 3(4): 1245-1262.
- [10] 徐睿择, 孙建国, 韩惠, 周亮, 杨维涛. 基于 MCE-Markov-CA 的郑州市土地利用时空变化模拟研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(1): 93-99.
- [11] Aburas M M, Ho Y M, Ramli M F, Ash'aari Z H. Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 59: 65-78.
- [12] Wang H, Stephenson S R, Qu S J. Modeling spatially non-stationary land use/cover change in the lower Connecticut River Basin by combining geographically weighted logistic regression and the CA-Markov model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(7): 1313-1334.
- [13] Mirbagheri B, Alimohammadi A. Improving urban cellular automata performance by integrating global and geographically weighted logistic regression models. *Transactions in GIS*, 2017, 21(6): 1280-1297.
- [14] Feng Y J, Tong X H. Dynamic land use change simulation using cellular automata with spatially nonstationary transition rules. *Giscience & Remote Sensing*, 2018, 55(5): 678-698.
- [15] 朱慧, 舒帮荣, 蔡成瑞, 袁秀. 顾及空间非平稳性驱动的城市增长边界划定. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(5): 46-55.
- [16] Xia M, Zhang Y Y, Zhang Z H, Liu J J, Ou W X, Zou W. Modeling agricultural land use change in a rapid urbanizing town: linking the decisions of government, peasant households and enterprises. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104266.
- [17] 陈宝芬, 张耀民, 江东. 基于 CA-ABM 模型的福州城市用地扩张研究. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 626-634.
- [18] Liu D Y, Zheng X Q, Wang H B. Land-use Simulation and Decision-Support system (LandSDS): seamlessly integrating system dynamics, agent-based model, and cellular automata. *Ecological Modelling*, 2020, 417: 108924.

- [19] Gounaridis D, Chorianopoulos I, Symeonakis E, Koukoulas S. A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 320-335.
- [20] Zhou L, Dang X W, Sun Q K, Wang S H. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102045.
- [21] Azari M, Tayyebi A, Helbich M, Reveshty M A. Integrating cellular automata, artificial neural network, and fuzzy set theory to simulate threatened orchards: application to Maragheh, Iran. *GIScience & Remote Sensing*, 2016, 53(2): 183-205.
- [22] Xu T T, Gao J, Coco G. Simulation of urban expansion via integrating artificial neural network with Markov chain - cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(10): 1960-1983.
- [23] Tajbakhsh A, Karimi A, Zhang A L. Modeling land cover change dynamic using a hybrid model approach in Qeshm Island, Southern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(5): 303.
- [24] Basse R M, Omrani H, Charif O, Gerber P, Bódis K. Land use changes modelling using advanced methods: cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. *Applied Geography*, 2014, 53: 160-171.
- [25] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [26] Chen Z Z, Huang M, Zhu D Y, Altan O. Integrating remote sensing and a Markov-FLUS model to simulate future land use changes in Hokkaido, Japan. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2621.
- [27] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 陈进钊. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 531-542.
- [28] 黎夏, 李丹, 刘小平, 劳春华, 张亦汉, 何晋强, 黄康宁. 地理模拟优化系统 GeoSOS 软件构建与应用. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49(4): 1-5, 15-15.
- [29] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [30] Chang X Y, Zhang F, Cong K L, Liu X J. Scenario simulation of land use and land cover change in mining area. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12910.
- [31] He X D, Mai X M, Shen G Q. Delineation of urban growth boundaries with SD and CLUE-s models under multi-scenarios in Chengdu metropolitan area. *Sustainability*, 2019, 11(21): 5919.
- [32] Peng K F, Jiang W G, Deng Y, Liu Y H, Wu Z F, Chen Z. Simulating wetland changes under different scenarios based on integrating the random forest and CLUE-S models: a case study of Wuhan Urban Agglomeration. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106671.
- [33] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1167-1181.
- [34] 严冬, 李爱农, 南希, 雷光斌, 曹小敏. 基于 Dyna-CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例. *地球信息科学学报*, 2016, 18(4): 514-525.
- [35] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Scenario simulation of land system change in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Land Use Policy*, 2020, 96: 104677.
- [36] Van Asselen S, Verburg P H. Land cover change or land-use intensification: simulating land system change with a global-scale land change model. *Global Change Biology*, 2013, 19(12): 3648-3667.
- [37] Domingo D, Palka G, Hersperger A M. Effect of zoning plans on urban land-use change: a multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102833.
- [38] Jin X L, Jiang P H, Ma D X, Li M C. Land system evolution of Qinghai-Tibetan Plateau under various development strategies. *Applied Geography*, 2019, 104: 1-9.
- [39] Zhu W J, Gao Y, Zhang H B, Liu L L. Optimization of the land use pattern in Horqin Sandy Land by using the CLUMondo model and Bayesian belief network. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139929.
- [40] 郭瑞琦, 陆波, 陈恺霖. 基于 CLUMondo 模型的多情景土地利用变化动态模拟——以广西沿海城市为例. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 176-183.
- [41] Li X, Chen G Z, Liu X P, Liang X, Wang S J, Chen Y M, Pei F S, Xu X C. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human - environment interactions. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5): 1040-1059.
- [42] Li X C, Yu L, Sohl T, Clinton N, Li W Y, Zhu Z L, Liu X P, Gong P. A cellular automata downscaling based 1 km global land use datasets (2010 - 2100). *Science Bulletin*, 2016, 61(21): 1651-1661.

- [43] Gao J, O'Neill B C. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2302.
- [44] Chen M, Vernon C R, Graham N T, Hejazi M, Huang M Y, Cheng Y Y, Calvin K. Global land use for 2015 – 2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 320.
- [45] Fujimori S, Hasegawa T, Ito A, Takahashi K, Masui T. Gridded emissions and land-use data for 2005—2100 under diverse socioeconomic and climate mitigation scenarios. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 180210.
- [46] Hurtt G C, Chini L, Sahajpal R, Frolking S, Bodirsky B L, Calvin K, Doelman J C, Fisk J, Fujimori S, Goldewijk K K, Hasegawa T, Havlik P, Heinemann A, Humenöder F, Jungclauss J, Kaplan J O, Kennedy J, Krisztin T, Lawrence D, Lawrence P, Ma L, Mertz O, Pongratz Pongratz J, Popp A, Poulter B, Riahi K, Shevliakova E, Stehfest E, Thornton P, Tubiello F N, Van Vuuren D P, Zhang X. Harmonization of global land use change and management for the period 850 – 2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(11): 5425-5464.
- [47] 摆万奇, 赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析. *资源科学*, 2001, 23(3): 39-41.
- [48] 杨梅, 张广录, 侯永平. 区域土地利用变化驱动力研究进展与展望. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 95-100.
- [49] Wang Z M, Liu Z M, Song K S, Zhang B, Zhang S M, Liu D W, Ren C Y, Yang F. Land use changes in Northeast China driven by human activities and climatic variation. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(3): 225-230.
- [50] Liu C, Xu Y Q, Sun P L, Huang A, Zheng W R. Land use change and its driving forces toward mutual conversion in Zhangjiakou City, a farming-pastoral ecotone in Northern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(10): 505.
- [51] 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [52] 邵景安, 李阳兵, 魏朝富, 谢德体. 区域土地利用变化驱动力研究前景展望. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 798-809.
- [53] 何英彬, 姚艳敏, 唐华俊, 陈佑启, 陈仲新, 杨鹏, 于士凯. 土地利用/覆盖变化驱动力机制研究新进展. *中国农学通报*, 2013, 29(2): 190-195.