

1990—2018年土地利用/覆盖变化研究的特征和进展

何春阳^{1,2}, 张金茜^{1,2}, 刘志锋^{1,2}, 黄庆旭^{1,2}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室 人环系统可持续研究中心, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部 自然资源学院土地资源与区域发展研究中心, 北京 100875)

摘要: 土地利用/覆盖变化(LUCC)是地表综合集成研究的一个学科基础和前沿领域。本文利用定性定量相结合的方法对1990—2018年的LUCC研究进展进行了系统综述。在回顾LUCC研究历程的基础上, 结合文献分析, 详细总结了不同LUCC研究阶段的基本特征和主要进展。进而阐述了当前LUCC研究面临的主要挑战, 提出了未来LUCC研究的主要发展方向。1990年以来LUCC研究关注度不断提升, 相关英文论文发文量和引文量呈指数增长趋势。LUCC研究正从1990—2004年间的过程研究阶段和2005—2013年间的影响研究阶段迈向2014年以后的可持续性研究阶段。当前LUCC研究正面临着如何借鉴可持续科学框架、整合新兴技术和支撑国土空间规划等挑战。未来LUCC研究需要与景观可持续科学和地理设计紧密结合, 积极面向国土空间规划主战场, 为建设美丽中国和落实联合国可持续发展目标服务。

关键词: 土地利用/覆盖变化; 过程; 影响; 可持续性; 国土空间规划

DOI: 10.11821/dlxb202111010

1 引言

土地利用(Land Use)指人类对土地的开发利用, 如耕地、工业用地和商业用地等^[1]; 土地覆盖(Land Cover)指被自然营造物和人工建筑物所覆盖的地表诸要素的综合体, 如冰川积雪、裸岩裸土及道路等^[2]。土地利用、土地覆盖和生态系统3部分构成的土地系统(Land System)是地球表层系统的基本组成部分^[3]。土地利用/覆盖变化(Land Use/Cover Change, LUCC)不仅再现了地球表层景观的时空动态过程, 而且客观记录了人类活动对地球表层的改造历程, 是揭示人类活动与自然环境相互作用机理的有效途径, 也是地理学进行地表综合集成研究的学科基础和前沿领域^[3]。自20世纪90年代以来, LUCC研究已走过了近30年的历程。当前, 随着人类社会迈入人类世, 气候变化、生物多样性损失和氮循环等过程已经超过了地球系统的安全阈值, 作为地表基本组成部分的土地系统也进入了潜在高风险区^[4-5]。因此, 及时了解LUCC研究的基本特征、存在问题和发展趋势非常必要。

目前, 已有不少学者综述了LUCC研究进展。在国际上, Lambin等系统综述了LUCC的驱动因子^[6]。Foley等全面综述了全球LUCC对粮食生产、淡水资源、森林资源、区域气候和大气质量以及传染病的影响^[7]。Verburg等指出LUCC的研究焦点应该从对土地系统变化及其驱动因子的理解向如何提高土地系统的可持续性转变^[8]。Long等提

收稿日期: 2020-05-28; 修订日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971270); 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0405) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41971270; Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK0405]

作者简介: 何春阳(1975-), 男, 四川射洪人, 教授, 主要从事综合自然地理学、土地利用/覆盖变化和城市景观可持续性研究。E-mail: hcy@bnu.edu.cn

出了区域土地利用转型的理论模型,并论述了土地利用转型和土地管理之间的相互反馈机制^[9];Liu等论述了经济转型下土地利用政策的战略性调整^[10]。在国内,李秀彬首先从全球变化研究的视角,系统介绍了LUCC研究的基本内容、关键问题和研究方法^[11]。蔡运龙阐述了LUCC研究的驱动力、尺度、方法及理论如何综合的问题^[12]。唐华俊等综述了LUCC模型在理论、方法和实践应用等方面的进展^[13]。刘纪远等从LUCC时空过程探测、驱动机理分析和宏观生态效应评价等方面综述了LUCC时空过程研究的方法进展^[14]。傅伯杰等综述了土地利用变化与生态系统服务的相关研究背景、概念、方法与进展^[15]。樊杰基于“人地关系地域系统”理论,论述了土地资源与区域可持续发展研究关系^[16]。傅伯杰等认为系统认知土地资源既是全面、综合、深入理解人地复杂系统的知识需要,也是服务于国家生态文明建设重大战略的实际需求^[17]。这些综述积极推动了LUCC研究的不断拓展和深入。但总体上看,基于文献计量方法,系统分析LUCC研究的基本特征和问题,并展望其未来发展趋势的综述还比较少见,这不利于当前LUCC研究的进一步深入和发展。

为此,本文以文献计量分析为基础,回顾了1990年以来的LUCC研究基本历程,揭示了LUCC研究特征和趋势,综述了主要研究进展,提出了LUCC研究存在的问题、主要挑战和未来发展趋势。目的在于为LUCC研究的深入发展提供借鉴和参考。

2 LUCC研究历程

LUCC研究与该领域国际科学计划的发起密切相关,这些计划引领着LUCC研究的重点发展方向。虽然这些计划的实施成效有所差别,但是本文主要依据每个研究计划的重点内容不同将其历程分为3个阶段,分别是过程(1990—2004年)、影响(2005—2013年)和面向可持续性(2014年至今)阶段(图1)。在过程研究阶段,国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)与国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)于1995年联合发起的LUCC计划起到了纲领性作用,其核心是力图通过对人类驱动力—土地利用/覆盖变化—全球变化—区域响应—环境反馈间相互作用机制的认识,建立可预测未来土地利用/覆盖变化,评价其生态环境后果并提供决策支持的LUCC模型^[11]。在该计划的推动下,LUCC研究在全球开始逐渐兴起^[18]。

在影响研究阶段,IGBP与IHDP于2005年共同推出的全球土地计划(Global Land Programme, GLP)扮演了引领性角色。GLP明确提出综合土地利用、土地覆盖和生态系统的土地系统概念,强调从系统分析的角度,模拟和评估全球土地系统变化的生态环境影响,认识和理解全球土地系统变化的脆弱性和弹性。2007年Turner等明确指出土地变化科学(Land Change Science)对全球环境变化和可持续性的意义^[19]。2010年以“土地系统、全球变化与可持续性”为大会主题的第一届全球土地计划开放科学大会在美国亚利桑那州召开。2013年Verburg等倡导建立土地系统科学(Land System Science)理念。这都对LUCC研究在全球的进一步深入和发展起到了积极的作用^[20]。

在面向可持续性阶段,国际科学理事会和国际社会科学理事会等于2014年正式推出了“未来地球(Future Earth)计划”。在该计划的推动和影响下,相关研究明确以提高全球可持续性为目标,开始重点关注不同尺度下LUCC过程、生态系统服务和人类福祉的耦合关系^[21]。2013年Wu提出了景观可持续科学(Landscape Sustainability Science)的研究理念,强调以景观和区域为基础,认识和理解景观格局、生态系统服务和人类福祉

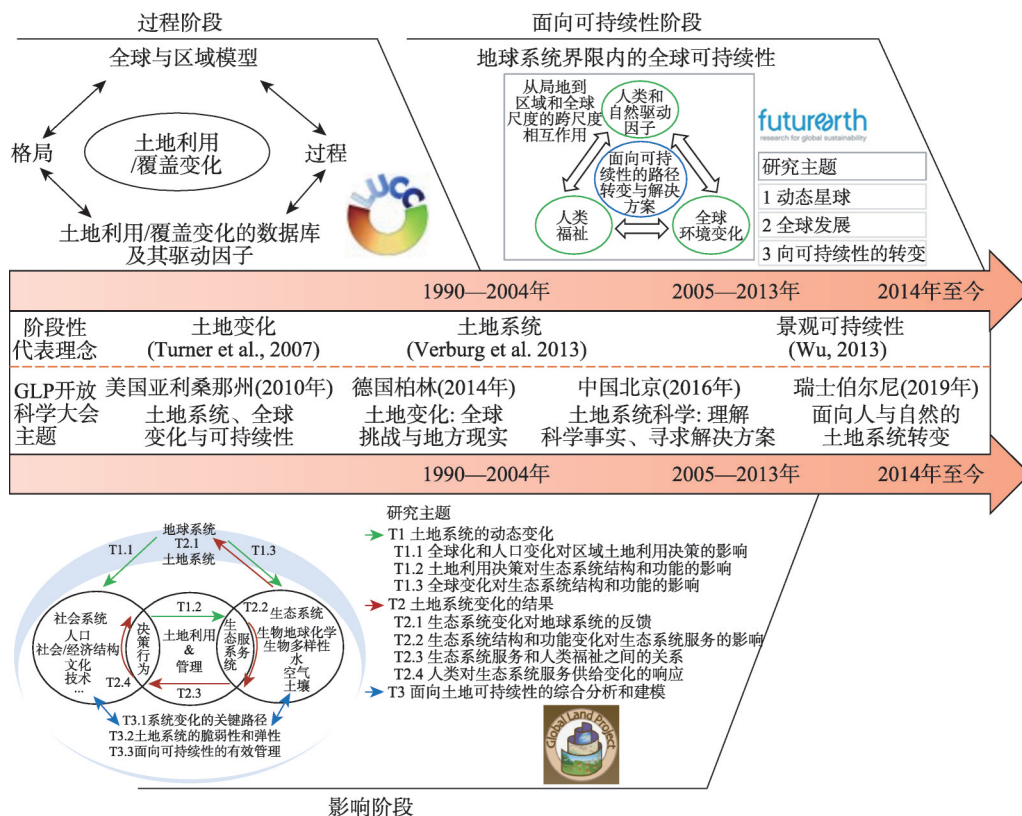


图1 LUCC研究历程

Fig. 1 The history of LUCC research

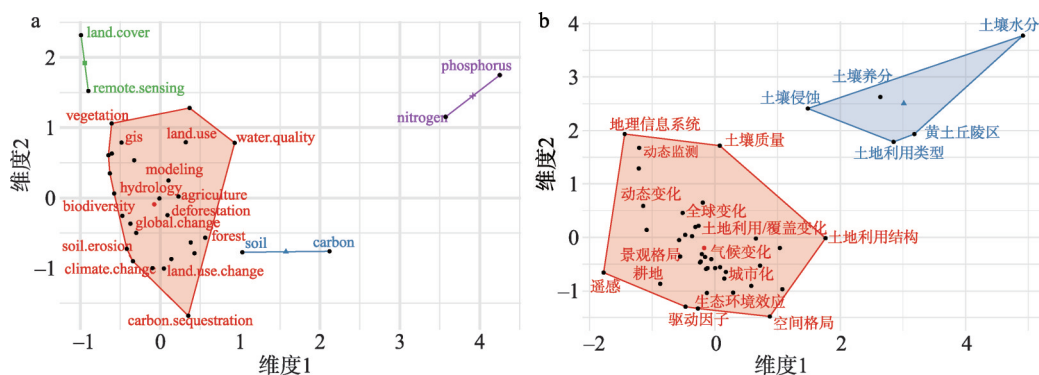
的相互关系, 提高全球可持续性^[22]。随后, 2014年、2016年和2019年连续召开3届全球土地变化计划开放科学大会, 会议主题分别是“土地变化、全球挑战与地方现实”“土地系统科学: 理解科学事实、寻求解决方案”“面向人与自然的土地系统转变”, 进一步推动了LUCC面向可持续性的研究进程。

3 LUCC研究进展

1990—2018年相关中英文论文的发文量和引文量总体上呈现快速增长趋势(图2)。其中, 中文论文在2010年前后有一定下降, 这与更多中国学者选择将成果以英文论文发表有关。在英文论文中, 前10位的高频词分别是“land use”“climate”“land use change”“impact”“management”“biodiversity”“model”“conservation”“dynamics”和“forest”。在中文论文中, 前10位的高频词分别是“土地利用”“土地利用/覆被变化”“土地利用变化”“时空变化”“驱动因子”“遥感”“生态系统服务”“景观格局”“地理信息系统”和“耕地”(图3)。

3.1 1990—2004年的过程研究阶段

基于高频关键词的聚类分析可以看出, 该阶段英文论文的研究内容主要分为5类。第1类是运用遥感技术对土地覆盖变化的动态监测; 第2类涉及LUCC对氮、磷循环的影



注：基于R语言环境的Bibliometrix和Biblioshiny包制作,聚类方法为MCA(multiple corresponding analysis)。

图4 过程研究阶段中英文论文高频关键词的多维分析

Fig. 4 Multidimensional analysis of high-frequency keywords in English and Chinese papers during the process research stage

响；第3类是LUCC对土壤碳的影响；第4类是LUCC模型的建立；第5类主要涉及LUCC的生态环境效应，比如LUCC对水质和土壤侵蚀的影响（图4a）。中文论文主要是LUCC动态监测、LUCC时空变化及其驱动力分析、LUCC对土壤（侵蚀、养分、水分等）的影响研究，耕地是中文论文重点关注的土地利用类型（图4b）。被引频次方面，排名前5的英文论文主要涉及LUCC驱动力、生物多样性、气候和土壤碳等主题，被引频次超1700次。排名前5的中文论文主要是LUCC机制研究、LUCC方法研究、LUCC对生态环境影响的小尺度实例应用研究以及LUCC综述，被引频次超1000次。

（1）在遥感技术、分类系统和分类方法不断发展的基础上，建立和完善了覆盖全球的各种分辨率的LUCC基础数据。典型的主要包括美国马里兰大学的UMD（University of Maryland）数据^[23]、美国地质调查局的IGBP DISCover（International Geosphere-Biosphere Program's Data and Information System Cover）数据^[24]、欧盟联合研究中心的GLC2000（Global Land Cover 2000）数据^[25]、美国波士顿大学的MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）数据^[26]以及欧洲航天局的GlobCover数据和Climate Change Initiative-Land Cover（CCI-LC）数据等^[27-28]。

（2）积极分析LUCC驱动力。LUCC驱动力包括自然驱动力和社会经济驱动力两方面。自然驱动力主要指气候、土壤和水文等^[29]。社会经济驱动力可以分为直接驱动力和间接驱动力。直接驱动力是指对土地产品的需求、对土地的投入、城市化程度、土地利用的集约化程度、土地权属、土地利用政策以及对土地资源的保护态度等。间接驱动力主要包括人口变化、技术发展、经济增长、政治与经济政策、富裕程度和价值取向等方面^[30]。LUCC是自然和社会经济驱动力共同作用的结果。通常在短时间尺度上，社会经济驱动力快速而显著，而自然驱动力主要表现为累积性效应^[29]。

（3）发展了一系列LUCC模型。LUCC模型是认识和理解LUCC过程及其驱动机制、预测LUCC趋势、支持LUCC决策的重要工具。这一阶段的LUCC模型主要包含非空间模型、空间模型和综合性模型3类（图5）。非空间模型主要量化土地利用/覆盖变化的速率和数量特征，比如马尔可夫（Markov）和系统动力学（System Dynamics, SD）模型等^[31-32]。空间模型主要表达土地利用/覆盖变化的空间格局特征^[13]。有的空间模型侧重表达“人类—环境”系统中人类行为，以不同层次的土地利用主体为基本模拟单元，比如基于智能体模型（Agent-based Model, ABM）等^[33-34]。有的空间模型则侧重反映“人类—环境”系统中环境适宜性和约束性，以不同分辨率的土地单元为基本模拟单元，比如

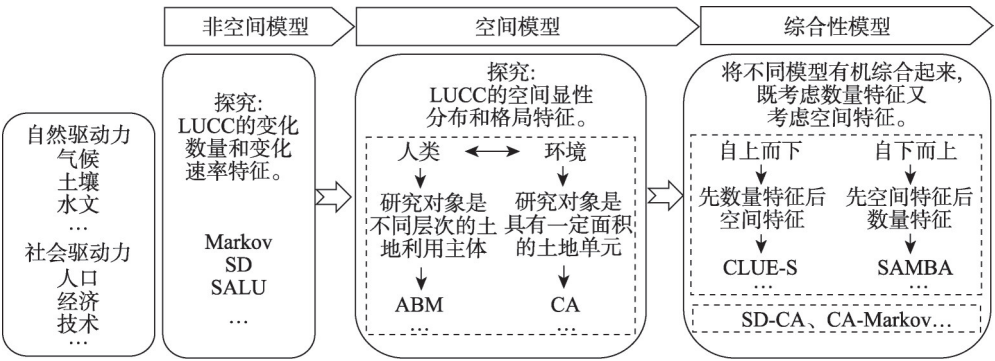


图5 LUCC模型的发展历程
Fig. 5 The history of LUCC model

元胞自动机（Cellular Automata, CA）模型等^[35]。综合性模型是综合非空间模型和空间模型进行多尺度模拟的一类模型。这一类模型通常先从宏观尺度上确定某一区域的LUCC总体速率和数量特征，然后将这些宏观尺度的土地利用总需求变化向低层次的空间单元逐渐进行配置，一直到最小的微观地理单元，比如CLUE-S（Conversion of Land Use and Its Effects at Small Regional Extent）模型和LUSD（Land Use Scenarios Dynamics）模型^[36-37]。也有的综合模型主要从微观尺度出发，先模拟分析特定的土地利用决策者的土地选择行为和过程，再通过尺度推绎反映宏观的LUCC特征，比如SAMBA模型^[38]。

3.2 2005—2013年的影响研究阶段

基于高频关键词的聚类分析可以看出，该阶段英文论文的研究内容主要分为6类。第1类是土地利用变化对气候的影响；第2类涉及LUCC对土壤碳、氮的影响；第3类是LUCC对生物多样性的影响；第4类是LUCC对水质的影响；第5类是LUCC对生态系统服务的影响；第6类是运用遥感和地理信息系统技术对土地覆盖变化进行监测（图6a）。中文论文主要涉及LUCC动态监测、LUCC时空变化及其驱动力分析、LUCC模型模拟、LUCC对土壤的影响、LUCC对径流的影响以及LUCC对生态系统服务价值的影响（图6b）。被引频次方面，排名前5的英文论文聚焦LUCC影响研究，重点关注LUCC对气候影响，被引频次超2400次。排名前5的中文论文主要是LUCC模型模拟、LUCC机制分析以及LUCC对土壤质量的影响研究，被引频次超440次。

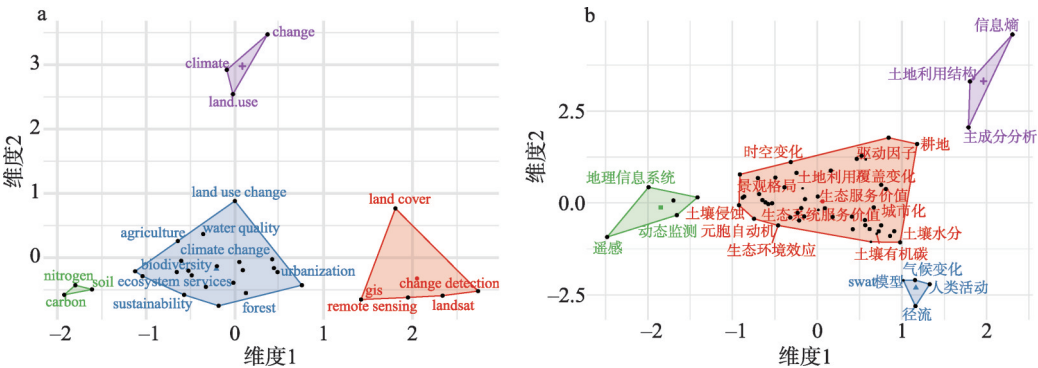


图6 影响研究阶段中英文论文高频关键词的多维分析
Fig. 6 Multidimensional analysis of high-frequency keywords in English and Chinese papers during the impact research stage

(1) 揭示了LUCC对自然生境和生物多样性的影响。首先, LUCC主要通过生境丧失、退化和破碎化3种方式对自然生境产生影响^[39]。研究表明, 大约39%的陆地生境已转变为耕地或建设用地, 还有37%的陆地生境已出现退化和破碎化^[40]。其次, LUCC主要通过影响自然生境进而成为生物多样性损失的主要驱动因子^[41]。研究表明, 随着生境的减少, 全球大约有20%~35%的哺乳动物、爬行动物和两栖动物面临着灭绝的风险^[42-43]。还有研究表明, 至2070年全球物种的适宜生境将显著减少, 土地利用变化将造成大约1700个物种濒临灭绝^[44]。特别是对于陆地生态系统而言, 土地利用变化可能将会对生物多样性产生最大影响, 其次是气候变化、氮沉降、生物交换和CO₂浓度的升高^[45]。

(2) 评估了LUCC对大气的影响, 主要表现在对区域气候和大气质量2个方面。LUCC可以通过对净辐射的影响改变区域气候, 也可以通过影响降水在土壤水分、蒸散和径流间的分配过程改变区域气候^[7]。比如, 热带地区的土地覆盖变化很大程度上通过改变水分平衡来影响气候, 而温带地区的土地覆盖变化主要通过改变地表辐射的影响来改变气候^[46]。在某些情况下, LUCC对气候的影响甚至可能超过温室气体的贡献^[47]。特别是城市化对区域气候的影响。例如, Kishtawal等分析了印度城市化对降水的影响, 发现城市化速度越快的地区强降水事件频率增加的趋势越明显, 并且城区与非城区相比可能具有更大的降水速率^[48]。Kim等根据韩国气候记录开展的研究表明, 1954—2008年城市化对升温起到主要作用, 其作用大于温室效应^[49]。同时, LUCC与大气质量紧密关联^[50], LUCC既可以通过改变气体的排放量影响大气质量, 又可以通过影响反应速率、传输和沉积的大气条件来改变大气质量^[7]。

(3) 评估了LUCC对土壤的影响。LUCC不仅可以改变土壤的物理和化学性质, 也可以改变土壤生态系统的组成, 从而影响土壤质量和土壤肥力, 最终影响土地生产力^[51-52]。例如, 森林向草地和农田的转变会导致地上生物量的减少, 进而降低土壤碳的输入, 同时由于农田的耕种, 会进一步引起土壤碳的减少^[53]。再者, 土地利用变化也对土壤养分含量(比如氮、磷含量等)产生重要影响。例如, 随着农业活动的扩张, 人类对农业用地的利用程度进一步加剧, 化肥、农药的使用量快速增加, 这使得土壤生态系统的人为养分输入远远超过自然养分来源, 最终可能导致土壤退化^[54-55]。更为严重的是, 土地利用变化还会导致土壤侵蚀、土壤荒漠化等土壤环境问题。比如, 中国黄土高原在经过人类社会长期的农耕开垦利用后, 自然森林和草原植被几乎破坏殆尽。根据“中国水土流失与生态安全综合科学考察”, 总面积64万km²的黄土高原, 土壤侵蚀面积达39万km², 土壤侵蚀模数高于15000 t/(a·km²)的剧烈水土蚀面积为3.67万km², 占全国同类面积的89%^[56]。另有观测数据表明, 20世纪70年代黄河输沙量的90%来自黄土高原^[57]。

(4) 评估了LUCC对水循环和水资源的影响。水循环方面, LUCC既可以通过植被冠层截留、根系吸收和气孔蒸腾直接影响水循环, 也可以通过植物群落的垂直结构和水平结构间接影响水循环, 主要包括蒸发、径流、入渗和地下水补给等^[58]。研究表明森林砍伐造成植被冠层截留、蒸发和入渗的能力降低, 地表径流增加, 洪水风险加剧^[59]。还有研究表明, 在全球尺度上土地覆盖变化造成陆地蒸发量减少约5%, 径流增加7.6%^[60]。水资源方面, LUCC主要对水量和水质产生影响。比如, 城市扩展造成不透水面的增加, 使得入渗能力下降, 产流增加^[61]。另外, 与土地利用密切相关的用水需求也会直接影响水资源量, 特别是农业灌溉。研究表明全球取水量总计约3900 km³/a, 消耗性水量(不再返还到流域)大致为1800~2300 km³/a, 其中仅农业便高达约85%^[62]。随着人类用水需求的逐步提高, 很多区域的地下水水位快速下降^[63-64]。不仅如此, 土地利用变化还是造成水质发生变化的重要原因^[65], 尤其是农业用地方式的不合理, 加之农田管理模式的不恰当, 会导致过量氮、磷经径流冲刷形成非点源污染, 影响河流水质^[66]。

3.3 2014—2018年的面向可持续性阶段

该阶段英文论文的聚类结果与影响研究阶段比较相似, 不同之处是该阶段对LUCC与生态系统服务之间关系的研究更加全面和深刻, 并且重点关注可持续发展问题, 尝试从土地利用优化和管理的角度实现区域可持续性(图7)。中文论文在延续影响阶段研究内容的前提下, 更加关注不同情景下LUCC对径流的影响, 城市化进程中的景观、生态、环境效应, 以及LUCC对生态系统服务的影响研究(图7)。被引频次方面, 排名前五的英文论文高度关注全球尺度, 聚焦LUCC对生态系统服务和生物多样性的影响, 以及土地覆盖产品的研制, 被引频次超590次。排名前五的中文论文主要是LUCC机制分析以及LUCC对生态系统服务的影响研究, 被引频次超180次。

(1) 把LUCC过程嵌入人地系统模型中。人地耦合系统指人类和自然相互作用形成的系统, 强调人地关系、自然与人文要素的综合。人地耦合系统模型可以描述人类系统和地球系统之间的反馈关系^[67]。一般情况下, 温室气体排放量或浓度、CO₂排放量或浓度以及LUCC是人类系统进入地球系统的关键要素, 温度、降水和生态系统生产力是地球系统进入人类系统的关键要素^[68-71]。人地耦合系统模型通过单向或双向耦合的方式将人类系统和地球系统联系起来。当前, 单向耦合的人地系统模型较多, 双向耦合的人地系统模型较少。代表性的单向耦合模型主要有CNRM-CM/IMAGE (Centre National de Recherches Météorologiques- Coupled Models/Integrated Model to Assess the Global Environment) 和GOLDMERGE (Complexity Ocean-Atmosphere-Sea Ice Model/Model for Evaluating the Regional and Global Effects) 等^[72-73]。代表性的双向耦合模型主要是iESM (integrated Earth System Model) 和MIT IGSM (MIT Integrated Global System Model)^[68, 74]。以iESM模型为例, 它将综合评估模型(Global Change Assessment Model, GCAM) 和地球系统模式(Community Earth System Model, CESM) 耦合在一起, 通过CO₂排放量、LUCC和生态系统生产力实现人类系统和地球系统的相互联系^[74]。Calvin等基于iESM模型分析了RCP 4.5和RCP 8.5情景下人类系统和地球系统之间不同的反馈特征^[75]。

(2) 揭示了LUCC对生态系统服务的影响。LUCC通过直接或间接地对生态系统格局与过程产生影响, 改变着生态系统服务的提供能力^[15]。千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA) 报告指出, 土地覆盖变化是过去50年导致陆地生态系统服务变化的最重要的两个直接驱动力之一(另一个为新技术的应用), 尤其是自然生态系统向农田生态系统的转化^[76]。生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台

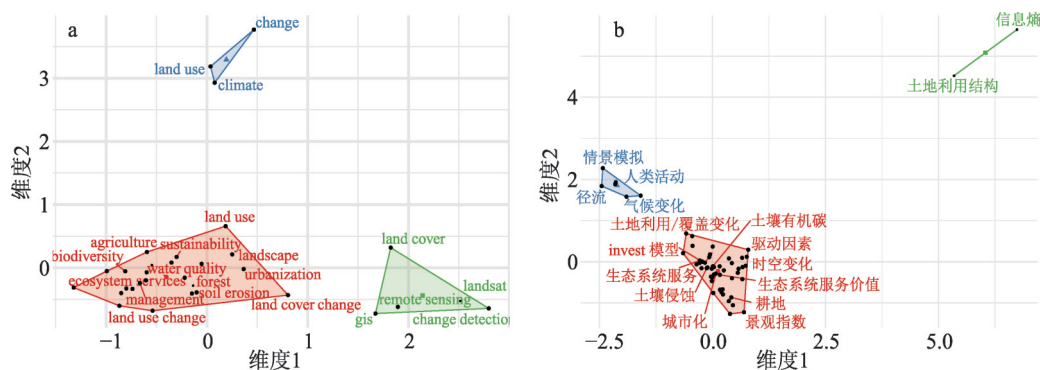


图7 面向可持续性阶段中英文论文的高频关键词的多维分析

Fig. 7 Multidimensional analysis of high-frequency keywords in English and Chinese papers during the sustainability research stage

(Intergovernmental Science- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES) 全球评估报告也指出, 土地利用变化是全球尺度上影响陆地和淡水生态系统的最主要直接驱动因子^[77]。首先, LUCC对供给服务(粮食、淡水和能源等)产生影响。以LUCC影响粮食生产为例, 随着世界人口的持续增长, 预计到2050年粮食需求将增加50%~80%^[78]。研究表明, 近几十年来耕地面积略有增加, 但人均耕地面积呈减少趋势, 从1973年的0.34 hm²/人下降至2008年的0.23 hm²/人^[79]。满足未来粮食需求的战略包括提高现有土地的生产力以及增加粮食生产用地^[80-81]。然而, 土地退化还在持续, 土地资源十分紧缺, 协调土地利用、粮食生产和农业之间的关系面临着巨大挑战^[79,82]。其次, LUCC对调节服务(气候调节、洪水调节和碳固持等)产生影响。以LUCC影响气候调节为例, 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)特别报告详细阐述了LUCC与气候变化之间的复杂关系, 指出在RCP 8.5情景下, 全球土地覆盖变化产生的生物地球化学效应将造成未来气候变暖, 升温范围在0.04~0.35 °C之间, 而生物物理效应对全球气候的影响还未明确, 可能导致升温, 也可能导致降温^[83-86]。多数研究还发现, 森林对气候调节服务的贡献最大, 其次是其它自然生态系统, 再次是农业生态系统^[87-88]。LUCC通过两种可能的途径对文化服务产生影响。一种是直接影响, 例如道路修建和运营使得自然或文化景观的可达性增加, 对更多消费者享受文化服务, 实现其文化价值具有正面效应; 另一种是间接影响, 例如LUCC对大气环境产生影响, 进而对自然或文化景观的赋存环境产生作用^[89]。此外, LUCC也会对多种生态系统服务之间的关系产生影响^[15]。比如在干旱半干旱地区, LUCC下的农业生产和调节服务(比如碳固持、土壤保持服务等)之间常常存在一定权衡关系^[90-93]。

(3) 开始重视LUCC对人类福祉的影响研究。人类福祉的概念众多, 其中, MA报告提出的概念被广泛应用于生态系统服务和人类福祉研究中。MA报告指出, 人类福祉包括5个要素: 维持高质量生活所需要的物质、健康、自由权和选择权、良好的社会关系和安全^[76]。LUCC可以改变生态系统服务的提供能力, 从而影响人类福祉^[15]。但关于LUCC、生态系统服务和人类福祉三者关系的定量研究还处于起步阶段^[92]。例如, Xu等分析了土地利用强度对生态系统服务(粮食生产、土壤保持和气候调节)和人类福祉(特别是在生活水平和粮食安全方面)的影响, 发现土地利用强度与生态系统服务和人类福祉之间的关系密切^[93]。

(4) 开始面向可持续性的土地利用优化和管理研究。可持续发展是必要的, 而非一种选择^[22], 它的最终目的是提高人类福祉, 即满足当代人和后代人的物质和精神需求^[94]。生态系统服务被普遍认为是连接自然资本与人类福祉的重要桥梁^[95], 它为可持续发展研究提供了一个可操作的概念框架^[94]。以生态系统服务为核心是面向可持续性的土地利用优化和管理研究的主要途径。例如, Wu等以黄土高原的延河流域为例, 基于生态系统服务评估开展土地利用优化研究, 提出一种流域最适宜的土地利用优化方案, 不仅可以保证生态系统服务供给能力的提升, 也可以满足一定程度上社会经济活动的需求^[96]。Zhang等模拟了2013—2040年间京津冀城市群在不同生态系统服务保护情景下的城市景观动态变化, 以维持和保护关键生态系统服务为目标来寻找最佳的景观规划方案^[97]。

4 存在问题与主要挑战

4.1 现有研究存在的问题

LUCC研究仍在理论、数据、方法、内容和应用上存在一些瓶颈问题。在理论上,

LUCC研究还需要多学科的理论支撑。可持续发展是LUCC研究的最终目标,为实现这一目标,LUCC研究的对象呈现系统化趋势,例如区域系统、陆表系统、土地系统等。一旦研究对象是某一系统,科学问题则必然综合且复杂,涉及多学科。因此,如何基于多学科的理论框架完善LUCC研究体系是值得思考的问题^[98]。在数据上,多源土地覆盖数据的融合存在不足。目前,单一的土地覆盖数据产品已不能满足LUCC研究日益深入的应用需求,通过数据融合可以解决不同数据之间分类系统的不兼容问题,并在一定程度上提高数据的精度。因此,如何通过有效的融合方法,综合利用当前存在的土地覆盖数据及相关辅助信息,发挥各数据的优势特点,获得时空连续、精确估算的融合结果,是亟待解决的问题^[99-100]。在方法上,首先,LUCC模型的验证存在不足,如何对LUCC模型进行科学地验证以保证其可靠性是需要解决的重要难题^[101]。其次,LUCC模型与生态过程模型的耦合程度不够。模型是揭示LUCC对土壤、气候、水文、生物地球化学循环等诸多自然要素影响的有效方法,但现有模型大多是松散耦合,很难动态地表达LUCC与生态过程之间的作用关系^[102]。因此,构建紧密耦合的LUCC与生态过程综合模型是一个需要迫切解决的问题。在内容上,对不同LUCC下的生态系统服务与人类福祉之间关系的研究还很不够。生态系统服务和人类福祉之间的关系是LUCC研究面向可持续性的焦点问题,但两者关系的复杂性使其成为一个难点领域^[103]。在应用上,LUCC研究成果如何应用于区域的决策管理仍面临着问题。目前,流域被认为是一个理想的区域单元,以流域为单元的LUCC研究成果也很丰富,但将其真正地应用于流域可持续管理的研究还很缺乏。此外,LUCC研究成果在当前国土空间规划中的应用也还不足。

4.2 主要挑战

在当前国际可持续科学快速发展,国内生态文明建设日益深入的背景下,LUCC研究正面临理论、方法和应用上的巨大挑战。在理论上,LUCC研究正面临在可持续科学研究框架下,如何响应联合国2030年可持续发展目标的挑战。可持续科学是“研究自然和社会之间动态关系的科学”,其目的是为可持续发展提供理论基础和技术手段^[94, 104]。在联合国提出的17项可持续发展目标中,消除饥饿、良好的健康与福祉、清洁饮水和卫生设施、可持续城市和社区、气候行动以及陆地生物等目标与LUCC紧密相联^[105-106]。如何在可持续科学的框架下,以联合国可持续发展目标为导向,将研究对象向全要素跨尺度的LUCC系统研究迈进,研究内容向面向可持续的LUCC优化管理拓展,已成为新时代LUCC研究面临的重要挑战。

同时,当前以大数据、云计算和人工智能为代表的新兴技术正方兴未艾,深度融合。大数据通常是指“在用户可接受的时间范围内,使用普通设备不能获取、管理和处理的数据集”,具有体量大、类型多、真实性和变化速度快4项基本特征^[107-108]。大数据为理解LUCC过程和可持续发展的关系提供了新的机遇^[109]。以人工神经网络、贝叶斯网络和深度学习等机器学习算法为代表的人工智能技术以及以云计算为代表的分布式网络并行计算与存储平台的快速发展与应用,为分析和挖掘大数据提供的海量信息提供了两大关键支柱^[110]。在新技术的加持下,虚拟地理环境技术蓬勃发展^[111-112]。这些新的数据和技术为深入理解LUCC过程、影响和可持续性之间的相互作用机制,开展全要素跨尺度的土地系统优化模拟与仿真带来了新的机遇,同时也带来了巨大的挑战。如何有效整合这些新兴数据和技术,发展新的LUCC研究方法体系,已经成为LUCC研究向新时代迈进过程中亟待解决的问题。

此外,国土空间规划是对国土空间有效保护、有序开发、高效利用和高品质建设的整体性谋划和有目的行动,是国家和地方空间发展的指南和实现可持续发展的空间蓝

图。科学的国土空间规划,有助于落实“山水林田湖草”生命共同体系统观念,促进我国生态文明建设和实现美丽中国目标^[113-115]。2019年7月自然资源部办公厅印发《关于开展国土空间规划“一张图”建设和现状评估工作的通知》,明确依托国土空间基础信息平台,全面开展国土空间规划“一张图”建设和市县国土空间开发保护现状评估工作。2020年1月,自然资源部办公厅印发《省级国土空间规划编制指南》(试行)的通知,提出了“生态优先、绿色发展”“以人民为中心、高质量发展”和“区域协调、融合发展”等国土空间规划的基本原则和要求。这标志着我国正在全面推进国土空间规划的进程。国土空间规划与LUCC研究联系密切。如何整合可持续科学理论框架和新兴技术,深入贯彻落实国土空间规划,已成为LUCC研究在实践应用过程中面临的新挑战^[116]。

5 展望

在理论上,LUCC研究需要与景观可持续科学紧密结合。景观可持续科学是聚焦于景观和区域尺度的,通过空间显示方法来研究景观格局、生态系统服务和人类福祉之间相互关系的科学,其最终目的是寻求能够促进生态系统服务和人类福祉长期维系和改善,以实现可持续发展的景观与区域空间格局^[22, 94]。景观可持续科学以可持续科学研究框架为基础,以景观和区域为研究和实现可持续发展的关键尺度,为面向可持续性的LUCC研究提供了重要的理论基础和可操作的实践平台^[117]。景观可持续科学的核心目标是协调人地关系,提高区域可持续性。其基本思路是以景观和区域尺度为基础,通过LUCC过程中土地利用类型、规模、方式和强度的调整,一方面改善自然资源和生态系统服务的供给能力以提高人类福祉,另一方面降低灾害暴露性和脆弱性以减少灾害风险(图8)。未来LUCC研究需要以维持和改善景观/区域可持续性为基本目标,以不同土地利用格局下生态系统服务、人类福祉和灾害风险间的相互关系为研究核心,以空间显示模型模拟和情景分析为主要手段,积极开展“生态系统—景观—区域”的多尺度综合集成研究^[17, 94]。

在方法上,LUCC研究需要在大数据、云计算和人工智能为代表的新兴技术的支撑下,紧密结合地理设计。地理设计是以景观可持续科学为基础,在空间信息技术支撑下的,以区域可持续发展为目标的,强调地理学家、技术专家、设计师和利益相关者密切配合并将规划设计活动与实时的动态环境影响模拟紧密结合的一种规划设计理念和方法^[117-119]。

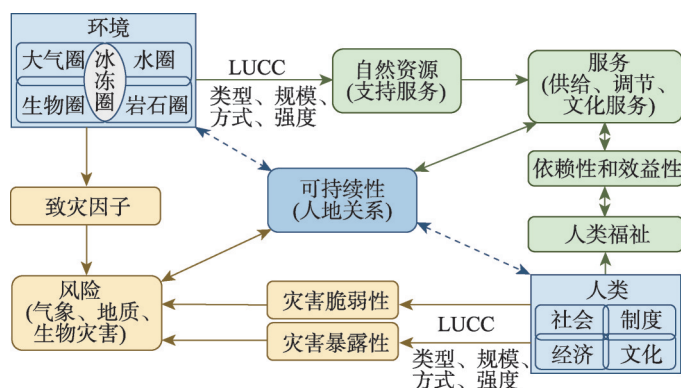
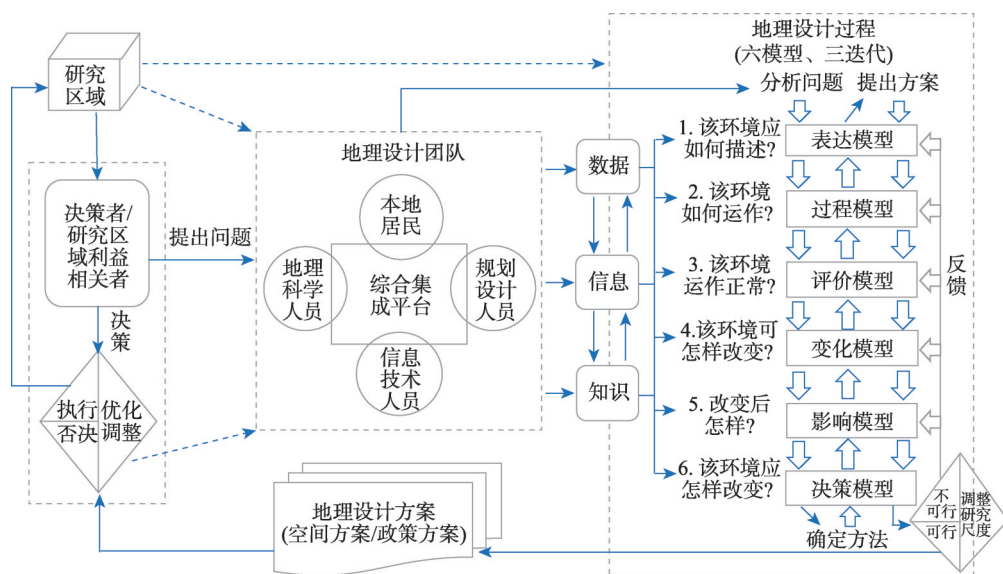


图8 LUCC与景观可持续性

Fig. 8 LUCC and landscape sustainability

地理设计框架主要包括研究区域、决策者/利益相关者、地理设计团队、地理设计过程和地理设计方案等5个组成部分。其核心部分是地理设计过程，它主要回答6个问题，每个问题可以由对应的模型回答。比如，该研究区域是否运作正常？对该问题的回答可以通过评价模型来实现。在整个地理设计过程中，采用自上而下（顺序）明确项目的背景和范围（提出问题）、自下而上（逆序）明确项目的方法论（确定方法）和自上而下（顺序）进行整个项目直至给出结论（回答问题）的三迭代式工作模式（图9）。基于地理设计框架，LUCC研究可以有效地融合大数据、人工智能、云计算、区块链和虚拟现实等新兴技术，并通过表达模型、过程模型、评价模型、变化模型、影响模型和决策模型的有效集成以产出空间化、定量化和人性化的设计方案^[120]。2010年由全球最大的GIS技术供应商——美国环境系统研究所（Environmental Systems Research Institute, ESRI）公司主办的首届地理设计峰会在美国南加州召开。之后，地理设计峰会每年举办一次。在每次峰会上，ESRI公司不仅会带来最新的GIS相关技术，还会展示来自世界各地的利用新兴技术开展的地理设计案例，为LUCC研究的技术革新带来了广阔的空间和展示的平台。因此，LUCC研究与地理设计的紧密结合不仅有益于LUCC研究技术与方法的提升，而且能够为LUCC研究提供实践应用框架与平台。

在实践上，LUCC研究需要积极面向国土空间规划主战场。国土空间规划是促进城乡融合与乡村振兴、建设美丽中国和落实联合国可持续发展目标的关键途径^[122-123]。LUCC研究能够在土地利用空间格局的优化和管理方面与国土空间规划交叉融合，从而在理论上和方法上为国土空间规划提供支撑（图10）。在理论上，LUCC研究聚焦格局、服务和人类福祉三者之间的动态关系，通过格局和过程的多尺度耦合研究、生态系统服务制图与模拟以及服务与福祉复杂关系的探究，强调过程机理、区域集成和面向可持续发展研究的深入融合，可以为国土空间规划提供有效的理论支撑。在方法上，LUCC研究通过结合遥感技术、模型模拟和情景分析已形成了一套涵盖LUCC数据库、LUCC模



注：修改自文献[118]和[121]。

图9 LUCC与地理设计

Fig. 9 LUCC and geodesign

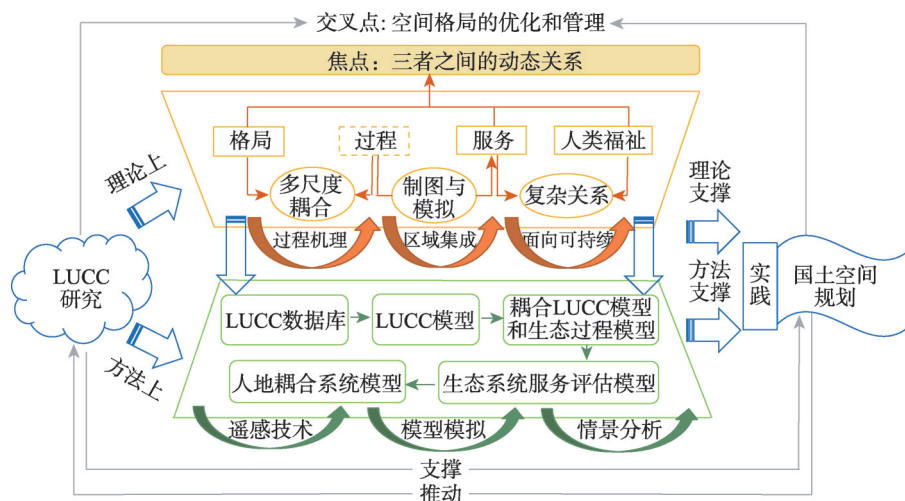


图 10 LUCC 与国土空间规划

Fig. 10 LUCC and spatial planning of national territory

型、LUCC 与生态过程耦合模型、生态系统服务评估模型和人地耦合系统模型的完整技术路线，可以为国土空间规划提供基础数据和技术支撑。LUCC 研究与国土空间规划的密切结合，必将推动 LUCC 研究的进一步提升。

6 结论

1990—2018 年 LUCC 相关英文论文发文量和引文量呈指数增长趋势，正从过程和影响研究阶段迈向可持续性研究阶段。LUCC 过程研究阶段的进展主要集中于 LUCC 数据库建立、LUCC 驱动力分析与 LUCC 模型的发展上。LUCC 影响研究阶段的主要进展表现在揭示了 LUCC 对自然生境和生物多样性、区域气候和空气质量、土壤理化性质以及水文过程的综合影响上。LUCC 可持续研究阶段的突出进展主要表现在将 LUCC 过程嵌入人地系统模型、揭示 LUCC 对生态系统服务影响、重视 LUCC 对人类福祉影响以及面向可持续性的土地利用优化管理 4 个方面。

在国际可持续科学快速发展，国内生态文明建设日益深入的背景下，LUCC 研究正面临理论、方法和应用上的巨大挑战。在理论上，LUCC 研究正面临如何在可持续科学研究框架下为联合国 2030 年可持续发展目标服务的问题。在方法上，如何整合大数据、云计算、人工智能和虚拟现实等新兴技术发展新的 LUCC 研究方法体系已成为当务之急。在应用上，如何整合可持续科学理论框架和新兴技术，深入贯彻落实国土空间规划，已成为 LUCC 研究面临的新挑战。因此，LUCC 研究需要与景观可持续科学紧密结合，以不同土地利用格局下的生态系统服务、人类福祉和灾害风险之间相互关系为研究核心，开展综合集成研究。同时还需要紧密结合地理设计，促进新兴技术与 LUCC 研究的深度融合。此外，还需要积极面向国土空间规划的主战场，从理论、方法和实践上支撑国土空间规划，为建设美丽中国和落实联合国可持续发展目标服务。

致谢：感谢史培军教授和邬建国教授在成文过程中的启发和指点。

参考文献(References)

- [1] Meyer W B, Turner II B L. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [2] Zuo Dakang. *A Dictionary of Modern Geography*. Beijing: The Commercial Press, 1990. [左大康, 主编. 现代地理学辞典. 北京: 商务印书馆, 1990.]
- [3] Global Land Project (GLP). *Science Plan and Implementation Strategy*. Stockholm: IGBP Secretariat, 2005.
- [4] Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461: 472-475.
- [5] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347: 736-747.
- [6] Lambin E F, Turner II B L, Geist H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11: 261-269.
- [7] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [8] Verburg P H, Crossman N, Ellis E C, et al. Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 2015, 12: 29-41.
- [9] Long H L, Qu Y. Land use transitions and land management: A mutual feedback perspective. *Land Use Policy*, 2018, 74: 111-120.
- [10] Liu Y S, Li J T, Yang Y Y. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation. *Land Use Policy*, 2018, 74: 5-14.
- [11] Li Xiubin. A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 553-558. [李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.]
- [12] Cai Yunlong. A study on land use/cover change: The need for a new integrated approach. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 645-652. [蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径. 地理研究, 2001, 20(6): 645-652.]
- [13] Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 456-468. [唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展. 地理学报, 2009, 64(4): 456-468.]
- [14] Liu Jiyuan, Deng Xiangzheng. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(21): 3251-3258. [刘纪远, 邓祥征. LUCC时空过程研究的方法进展. 科学通报, 2009, 54(21): 3251-3258.]
- [15] Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446. [傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.]
- [16] Fan Jie. "Territorial System of Human-environment Interaction": A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607. [樊杰. "人地关系地域系统"是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. 地理学报, 2018, 73(4): 597-607.]
- [17] Fu Bojie, Liu Yanxu. The theories and methods for systematically understanding land resource. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(21): 2172-2179. [傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法. 科学通报, 2019, 64(21): 2172-2179.]
- [18] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, et al. *Land-Use and Land-Cover Change: Implementation Strategy*. Stockholm and Bonn: Scientific Steering Committee and International Project Office of LUCC, 1999.
- [19] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *PNAS*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [20] Verburg P H, Erb K H, Mertz O, et al. Land system science: Between global challenges and local realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 433-437.
- [21] Future Earth. *Future earth initial design: Report of the transition team*. Paris: International Council for Science (ICSU), 2013.
- [22] Wu J G. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28: 999-1023.
- [23] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6-7): 1331-1364.
- [24] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al. Development of a global land cover characteristics database and IGBP

- DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6-7): 1303-1330.
- [25] Roy P S, Agrawal S, Joshi P, et al. The land cover map for Southern Asia for the year 2000: GLC2000 database. European Commission Joint Research Centre, 2003.
- [26] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 287-302.
- [27] Bicheron P, Leroy M, Brockmann C, et al. GlobCover: A 300 m Global Land Cover Product for 2005 Using ENVISAT MERIS Time Series. Valencia: Publishing Services, University of Valencia, 2006.
- [28] ESA. CCI-LC Product User Guide v2.4, 2014.
- [29] Bai Wanqi, Zhao Shidong. An analysis on driving force system of land use changes. *Resources Science*, 2001, 23(3): 39-41. [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.]
- [30] Fischer G, Ermoliev Y, Keyzer M A, et al. Simulating the socio-economic and biogeophysical driving forces of land-use and land-cover change: The IIASA land-use change model. WP-96-010. Laxenburg: IIASA, 1996.
- [31] Muller M R, Middleton J. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 1994, 9(2): 151-157.
- [32] Portela R, Rademacher I. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2001, 143(1-2): 115-146.
- [33] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314-337.
- [34] Valbuena D, Verburg P H, Bregt A K, et al. An agent-based approach to model land-use change at a regional scale. *Landscape Ecology*, 2010, 25(2): 185-199.
- [35] Li Xia, Ye Jia'an. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 19-27. [黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. *地理研究*, 2005, 24(1): 19-27.]
- [36] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [37] He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jin, et al. Land use scenario model study based on system dynamics model and cellular automata model. *Science in China: Series D*, 2005, 35(5): 464-473. [何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(5): 464-473.]
- [38] Boissau S, Castella J C. Constructing a common representation of local institutions and land use systems through simulation-gaming and multiagent modeling in rural areas of northern Vietnam: The SAMBA-week methodology. *Simulation & Gaming*, 2003, 34(3): 342-357.
- [39] Fischer J, Lindenmayer D B. Landscape modification and habitat fragmentation: A synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(3): 265-280.
- [40] Ellis E C, Klein Goldewijk K, Siebert S, et al. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 589-606.
- [41] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [42] Schipper J, Chanson J S, Chiozza F, et al. The status of the world's land and marine mammals: Diversity, threat, and knowledge. *Science*, 2008, 322(5899): 225-230.
- [43] Böhm M, Collen B, Baillie J E M, et al. The conservation status of the world's reptiles. *Biological Conservation*, 2013, 157: 372-385.
- [44] 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.
- [45] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [46] Snyder P K, Delire C, Foley J A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics*, 2004, 23: 279-302.
- [47] Dirmeyer P A, Niyogi D, Noblet-Ducoudré N, et al. Impacts of land use change on climate. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 1905-1907.
- [48] Kishitawar C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 1908-1916.

- [49] Kim M, Kim S K. Quantitative estimates of warming by urbanization in South Korea over the past 55 years (1954-2008). *Atmospheric Environment*, 2011, 45(32): 5778-5783.
- [50] Kume A, Charles K, Berehane Y, et al. Magnitude and variation of traffic air pollution as measured by CO in the city of Addis Ababa, Ethiopia. *Ethiopian Journal of Health Development*, 2010, 24(3): 156-166.
- [51] Batlle-Aguilar J, Brovelli A, Porporato A, et al. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 251-274.
- [52] Geissen V, Sánchez-Hernández R, Kampichler C, et al. Effects of land-use change on some properties of tropical soils—An example from Southeast Mexico. *Geoderma*, 2009, 151(3/4): 87-97.
- [53] Houghton R A. Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(6): 597-603.
- [54] Thampi S G, Raneesh K Y, Surya T V. Influence of scale on SWAT model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics. *Water Resources Management*, 2010, 24(15): 4567-4578.
- [55] Manson S M. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the Southern Yucatán Peninsular region of Mexico. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1-4): 47-62.
- [56] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. *Water Loss and Soil Erosion and Ecological Security of China: The Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2010: 28-59. [水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(西北黄土高原区卷). 北京: 科学出版社, 2010: 28-59.]
- [57] Yao Wenyi, Ran Dachuan, Chen Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 607-616. [姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.]
- [58] Bradshaw C J A, Sodhi N S, Peh K S H, et al. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2379-2395.
- [59] Laurance W F. Forests and floods. *Nature*, 2007, 449(7161): 409-410.
- [60] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [61] Hurkmans R T W L, Terink W, Uijlenhoet R, et al. Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin. *Water Resources Research*, 2009, 45: W06405. DOI: 10.1029/2008WR007574.
- [62] Gleick P H. Water use. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28: 275-314.
- [63] Grafton R Q. Addressing China's water scarcity: Recommendations for selected water resource management issues. *Asian Pacific Economic Literature*, 2009, 23(2): 124-125.
- [64] Yu C Q, Gong P, Yin Y Y. China's water crisis needs more than words. *Nature*, 2011, 470(7334): 307.
- [65] Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu Q T, et al. Assessment of seasonal variations in surface water quality. *Water Research*, 2006, 40(20): 3800-3810.
- [66] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [67] Calvin K, Bond-Lamberty B. Integrated human-earth system modeling-state of the science and future directions. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 063006. DOI: 10.1088/1748-9326/aac642.
- [68] Reilly J, Paltsev S, Strzepek K, et al. Valuing climate impacts in integrated assessment models: The MIT IGSM. *Climatic Change*, 2013, 117(3): 561-573.
- [69] Leng G Y, Tang Q H. Modeling the impacts of future climate change on irrigation over China: Sensitivity to adjusted projections. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(5): 2085-2103.
- [70] Thornton P E, Calvin K, Jones A D, et al. Biospheric feedback effects in a synchronously coupled model of human and Earth systems. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 496-500.
- [71] Yang S L, Dong W J, Chou J M, et al. A brief introduction to BNU-HESM1.0 and its earth surface temperature simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(12): 1683-1688.
- [72] Voldoire A, Eickhout B, Schaeffer M, et al. Climate simulation of the twenty-first century with interactive land-use changes. *Climate Dynamics*, 2007, 29(2-3): 177-193.
- [73] Bahn O, Drouet L, Edwards N R, et al. The coupling of optimal economic growth and climate dynamics. *Climatic Change*, 2006, 79(1-2): 103-119.
- [74] Collins W D, Craig A P, Truesdale J E, et al. The integrated Earth system model version 1: Formulation and

- functionality. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 2203-2219.
- [75] Calvin K, Bond-Lamberty B, Jones A, et al. Characteristics of human-climate feedbacks differ at different radiative forcing levels. *Global and Planetary Change*, 2019, 180: 126-135.
- [76] Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [77] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). The global assessment report on biodiversity and ecosystem services: Summary for policymakers. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. [2019-11-22]. [https://ipbes.net/system/tdf/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf?file=1&ty](https://ipbes.net/system/tdf/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf?file=1&type=node&id=36213)
- [78] Keating B A, Herrero M, Carberry P S, et al. Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 2014, 3(3-4): 125-132.
- [79] Grundy M J, Bryan B A, Nolan M, et al. Scenarios for Australian agricultural production and land use to 2050. *Agricultural Systems*, 2016, 142: 70-83.
- [80] Fischer R A, Byerlee D, Edmeades G O. Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2014.
- [81] Springer N P, Duchin F. Feeding nine billion people sustainably: Conserving land and water through shifting diets and changes in technologies. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(8): 4444-4451.
- [82] Odegard I Y R, van der Voet E. The future of food-scenarios and the effect on natural resource use in agriculture in 2050. *Ecological Economics*, 2014, 97: 51-59.
- [83] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019. [2019-09-16]. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summaryfor-policymakers>.
- [84] Simmons C T, Matthews H D. Assessing the implications of human land-use change for the transient climate response to cumulative carbon emissions. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 035001. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/035001.
- [85] Davies-Barnard T, Valdes P J, Singarayer J S, et al. Full effects of land use change in the representative concentration pathways. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 114014. DOI:10.1088/1748-9326/9/11/114014.
- [86] Boysen L R, Brovkin V, Arora V K, et al. Global and regional effects of land-use change on climate in 21st century simulations with interactive carbon cycle. *Earth System Dynamics*, 2014, 5(2): 309-319.
- [87] Vauhkonen J, Packalen T. Uncertainties related to climate change and forest management with implications on climate regulation in Finland. *Ecosystem Services*, 2018, 33: 213-224.
- [88] Edwards D P, Socolar J B, Mills S C, et al. Conservation of tropical forests in the Anthropocene. *Current Biology*, 2019, 29(19): R1008-R1020.
- [89] Li Shuangcheng, et al. *The Geography of Ecosystem Services*. Beijing: Science Press, 2014. [李双成, 等. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [90] Wang Z M, Mao D H, Li L, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992-2012 in the Sanjiang Plain of China. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 119-130.
- [91] Kragt M E, Robertson M J. Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices. *Ecological Economics*, 2014, 102(2): 147-157.
- [92] Wang X C, Dong X B, Liu H M, et al. Linking land use change, ecosystem services and human well-being: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 113-123.
- [93] Xu Y, Tang H P, Wang B J, et al. Effects of land-use intensity on ecosystem services and human well-being: A case study in Huailai County, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5): 416-426.
- [94] Wu Jianguo, Guo Xiaochuan, Yang Jie, et al. What is sustainability science? *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 1-11. [鄧建国, 郭晓川, 杨劫, 等. 什么是可持续性科学? *应用生态学报*, 2014, 25(1): 1-11.]
- [95] Leviston Z, Walker I, Green M, et al. Linkages between ecosystem services and human wellbeing: A Nexus Webs approach. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 658-668.
- [96] Wu X T, Wang S, Fu B J, et al. Land use optimization based on ecosystem service assessment: A case study in the Yanhe watershed. *Land Use Policy*, 2018, 72: 303-312.
- [97] Zhang D, Huang Q X, He C Y, et al. Planning urban landscape to maintain key ecosystem services in a rapidly urbanizing area: A scenario analysis in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 559-571.

- [98] Wu J G. A landscape approach for sustainability science//Weinstein M, Turner R. Sustainability Science. New York: Springer, 2012. 59-77.
- [99] Bai Yan, Feng Min. Data fusion and accuracy evaluation of multi-source global land cover datasets. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2223-2235. [白燕, 冯敏. 全球尺度多源土地覆被数据融合与评价研究. *地理学报*, 2018, 73(11): 2223-2235.]
- [100] Song Hongli, Zhang Xiaonan, Chen Yijin. Land cover mapping using multi-sources data based on Dempster-Shafer theory. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 132-139. [宋宏利, 张晓楠, 陈宜金. 基于证据理论的多源遥感产品土地覆被分类精度优化. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 132-139.]
- [101] Wu Wenbin, Yang Peng, Shibasaki R, et al. Agent-based model for land use/cover change: A review. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 573-578. [吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 等. 基于 Agent 的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展. *地理科学*, 2007, 27(4): 573-578.]
- [102] Robinson D T, Vittorio A D, Alexander P, et al. Modelling feedbacks between human and natural processes in the land system. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 895-914.
- [103] Agarwala M, Atkinson G, Fry B P, et al. Assessing the relationship between human well-being and ecosystem services: A review of frameworks. *Conservation & Society*, 2014, 12(4): 437-449.
- [104] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development: Sustainability science. *Science*, 2001, 292(5517): 641-642.
- [105] United Nations (UN). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Seventieth Session of the United Nations General Assembly Resolution A/RES/70/1. New York: UN, 2015.
- [106] Gao L, Bryan B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, 544(7649): 217-222.
- [107] Mayer-Svöhnberger V, Cukier K. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work and Think. New York: Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company, 2013.
- [108] Guo Huadong, Wang Lizhe, Chen Fang, et al. Scientific big data and Digital Earth. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(12): 1047-1054. [郭华东, 王力哲, 陈方, 等. 科学大数据与数字地球. *科学通报*, 2014, 59(12): 1047-1054.]
- [109] Runting R K, Phinn S, Xie Z Y, et al. Opportunities for big data in conservation and sustainability. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-4.
- [110] Bergen K J, Johnson P A, de Hoop M V, et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 2019, 363(6433): 1299.
- [111] Lv Guonian. Geographic analysis-oriented virtual geographic environment: Framework, structure and functions. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(4): 549-561. [阚国年. 地理分析导向的虚拟地理环境: 框架、结构与功能. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(4): 549-561.]
- [112] Lin Hui, Hu Mingyuan, Chen Min. Research progress and prospect of Virtual Geographic Environments (VGEs). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(4): 361-368. [林珏, 胡明远, 陈旻. 虚拟地理环境研究与展望. *测绘科学技术学报*, 2013, 30(4): 361-368.]
- [113] Wu Cifang, Ye Yanmei, Wu Yuzhe, et al. Spatial Planning of National Territory. Beijing: Geological Publishing House, 2019. [吴次芳, 叶艳妹, 吴宇哲, 等. 国土空间规划. 北京: 地质出版社, 2019.]
- [114] Chen Mingxing, Liang Longwu, Wang Zhenbo, et al. Geographical thinking on the relationship between beautiful China and land spatial planning. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2467-2481. [陈明星, 梁龙武, 王振波, 等. 美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考. *地理学报*, 2019, 74(12): 2467-2481.]
- [115] Fan Jie. Spatial organization pathway for territorial function-structure: Discussion on implementation of major function zoning strategy in territorial spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2373-2387. [樊杰. 地域功能—结构的空间组织途径: 对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. *地理研究*, 2019, 38(10): 2373-2387.]
- [116] Zhen Feng, Zhang Shanqi, Qin Xiao, et al. From informational empowerment to comprehensive empowerment: Exploring the ideas of smart territorial spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2060-2072. [甄峰, 张姗姗, 秦潇, 等. 从信息化赋能到综合赋能: 智慧国土空间规划思路探索. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2060-2072.]
- [117] Wu J G. Linking landscape, land system and design approaches to achieve sustainability. *Journal of Land Use Science*, 2019, 14(2): 173-189.
- [118] Steinitz C. A Framework for Geodesign. California: Esri Press, 2012.
- [119] Ma Jinwu. An introduction to geodesign: Concept, framework and practice. *Landscape Architecture*, 2013, 1: 26-32. [马劲武. 地理设计简述: 概念、框架及实例. *风景园林*, 2013(1): 26-32.]

- [120] Huang L, Xiang W N, Wu J G, et al. Integrating geodesign with landscape sustainability science. *Sustainability*, 2019, 11: 833-849.
- [121] Zhang Yuan, Jin Xianfeng, Zhang Zeli, et al. *Geodesign Theory, Technology and Practice*. Beijing: Science Press, 2016. [张远, 金贤锋, 张泽烈, 等. 地理设计理论、技术与实践. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [122] 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.]
- [123] Fang Chuanglin, Wang Zhenbo, Liu Haimeng. Exploration on the theoretical basis and evaluation plan of Beautiful China construction. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 619-632. [方创琳, 王振波, 刘海猛. 美丽中国建设的理论基础与评估方案探索. 地理学报, 2019, 74(4): 619-632.]

Characteristics and progress of land use/cover change research during 1990-2018

HE Chunyang^{1,2}, ZHANG Jinxi^{1,2}, LIU Zhifeng^{1,2}, HUANG Qingxu^{1,2}

(1. Center for Human-Environment System Sustainability (CHESS), State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Land use/cover change (LUCC) is the foundation and frontier for integrating multiple land surface processes. This paper aims to systematically review LUCC research from 1990 to 2018. Based on qualitative and quantitative analyses, we delineated the history of LUCC research and summarized their characteristics and major progress at different stages. We also identified main challenges and proposed future directions for LUCC research. We found that the number of publications on LUCC research and their total citations grew exponentially. The research foci shifted from the process of LUCC during 1990-2004 to the impact of LUCC during 2005-2013, and then to the sustainability of LUCC from 2014 onwards. Currently, LUCC research is facing theoretical, methodological and practical challenges ranging from integrating the framework of sustainability science, adopting emerging technologies to supporting territorial spatial planning. To move forward, LUCC research should be closely integrated with landscape sustainability science and geodesign, and take the leading role in territorial spatial planning to achieve the related Sustainable Development Goals.

Keywords: land use/cover change; process; impact; sustainability; territorial spatial planning