



DOI: 10.20103/j.stxb.202312082679

王春晓,李明倩.基于文献计量的土地利用变化与碳汇评估交叉研究进展.生态学报,2024,44(13):5893-5903.

基于文献计量的土地利用变化与碳汇评估交叉研究进展

王春晓^{1,2,*}, 李明倩¹

1 深圳大学建筑与城市规划学院,深圳 518060

2 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室,广州 518060

摘要:在“碳中和”的背景下,土地利用变化与碳汇评估的结合日趋紧密,受到了景观生态学、人文地理学等多个学科的关注,二者的交叉研究已成为当下研究热点。对土地利用变化和碳汇评估进行研究,对于实现碳中和、碳达峰具有重要意义。以 2003—2023 年 Web of Science 的核心数据集 3556 篇英文文献和中国知网 CNKI 数据库 363 篇中文文献为研究对象,采用 CiteSpace 软件制作科学知识图谱,梳理了土地利用变化和碳汇评估交叉研究的概况、研究领域及方向和发展脉络及趋势。研究发现,近 20 年来土地利用变化和碳汇评估交叉研究的刊文量呈逐年增长趋势,根据关键词聚类情况可将文献主要分为三类议题:1)土地利用类型碳汇评估;2)生态系统服务碳汇评估;3)土壤和植被碳汇评估。其中,土地利用类型碳汇评估是土地利用变化和碳汇交叉研究的重点。研究热点从碳汇评估方法研究逐渐向气候变化及土地利用变化下的碳汇预测模拟转变。在研究方法上,遥感数据分析方法得到不断改进,同时人工智能和机器学习方法也逐渐开始为更多学者采用。在未来的研究中,应发挥学科交叉的优势,完善该领域的研究深度和广度,加强综合性的碳汇评估研究,强化对政策的响应并提出合理的国土空间规划建议,为早日实现碳达峰、碳中和目标提供科学依据和参考。

关键词:土地利用变化;碳汇评估;文献计量;CiteSpace

近年来,全球气候正在逐渐变暖,陆地生态系统作为 CO₂ 等温室气体的源与汇,在地表与大气间能量、水和气溶胶交换中发挥着重要的作用^[1]。IPCC 对温室气体的汇的定义为任何能从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前期物的过程、活动、机制等^[2]。陆地生态系统碳库主要由植被和土壤两个分碳库组成,是受人类活动影响最大的碳库,而碳储量是陆地生态系统中储存的碳的累积量。1997 年京都气候大会后,“碳汇”概念被广泛认知。2020 年 9 月中国在第七十五届联合国大会上,宣布 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和的目标^[3]。随着我国“碳达峰、碳中和”目标的确定,国家和社会各个层面对碳汇研究日益重视。

陆地生态系统碳汇的相关研究主要集中在碳汇评估、碳汇评估方法和碳汇时空演变机制及其影响因素等方面,评估方法随着遥感、GIS 及模型的发展和应用,由最开始的样地勘测法转变为 CASA、IBIS 等模型估算。陆地碳汇对气候变化和人类活动十分敏感,土地利用变化导致的生态系统碳储量变化受到广泛重视。相关研究为增强陆地生态系统碳汇功能、实现双碳目标提供了重要借鉴,也为区域生态建设和经济社会可持续发展提供了科学依据^[4]。

土地利用变化改变了地球原有的土地覆被格局,影响范围广、强度大^[5],其通过对生态系统的物质循环

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52008253);广东省高等教育教学改革项目(0000027117)

收稿日期:2023-12-08; **网络出版日期:**2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxw@szu.edu.cn

与能量流动产生较大的影响,改变了生态系统的结构、过程和功能,进而显著影响生态系统各部分的碳分配^[6-7]。人类活动越来越强烈地影响着陆地生态系统碳循环过程,人口增长压力导致的土地利用/覆被变化影响着生态系统地上和地下的碳储量,对人类的生存环境和社会经济的可持续发展可能产生重要的影响^[8]。土地利用变化对陆地碳储量的影响一方面取决于生态系统类型(植被类型)和土地利用类型的变化(地类的变化)^[9];另一方面在于人类活动通过对土地利用类型的改变以及土地利用结构的调整来影响陆地生态系统植被和土壤的碳蓄积量^[10],退化生态系统的恢复或土地利用的有效管理可以蓄积、维持和增大植被及土壤碳库^[11]。

土地利用变化与碳汇评估结合已引起政府和学者得广泛关注。土地利用方式控制温室气体排放技术被中国科技部作为重点任务提出^[12]。目前关于土地利用变化碳效应的研究已从多个层面展开,其中多位学者研究了全球历史时期土地利用变化对陆地生态系统碳循环的影响^[13-16]。不少学者还从国家政策的角度,探讨了土地利用对碳储量的影响^[17-18]。

目前,关于土地利用变化和碳汇的研究综述大多集中在土地利用变化对碳储量的影响研究或者是土地利用变化对碳排的机理和效应的研究,较少有涉及土地利用变化和碳汇评估结合的研究综述。而土地利用变化与碳汇评估结合,能够动态的从时间和空间维度上评价了碳汇的形成机制^[19]。因此,本文基于科学知识图谱对土地利用变化和碳汇评估的交叉研究进行分析,梳理该研究方向在 2003—2023 年 20 年间的发展脉络、研究热点和研究趋势等,为后续的相关研究提供参考依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 数据来源

本文以“土地利用变化”、“碳汇”与“碳储量”等相关概念为主题进行专业检索,时间跨度为 2003—2023 年,检索时间为 2023 年 8 月 1 日,在分析之前去除了重复文献和本主题无关的文献,最终分别得到 CNKI 数据库文献 363 篇, WoS 数据库 3556 篇(图 1)。

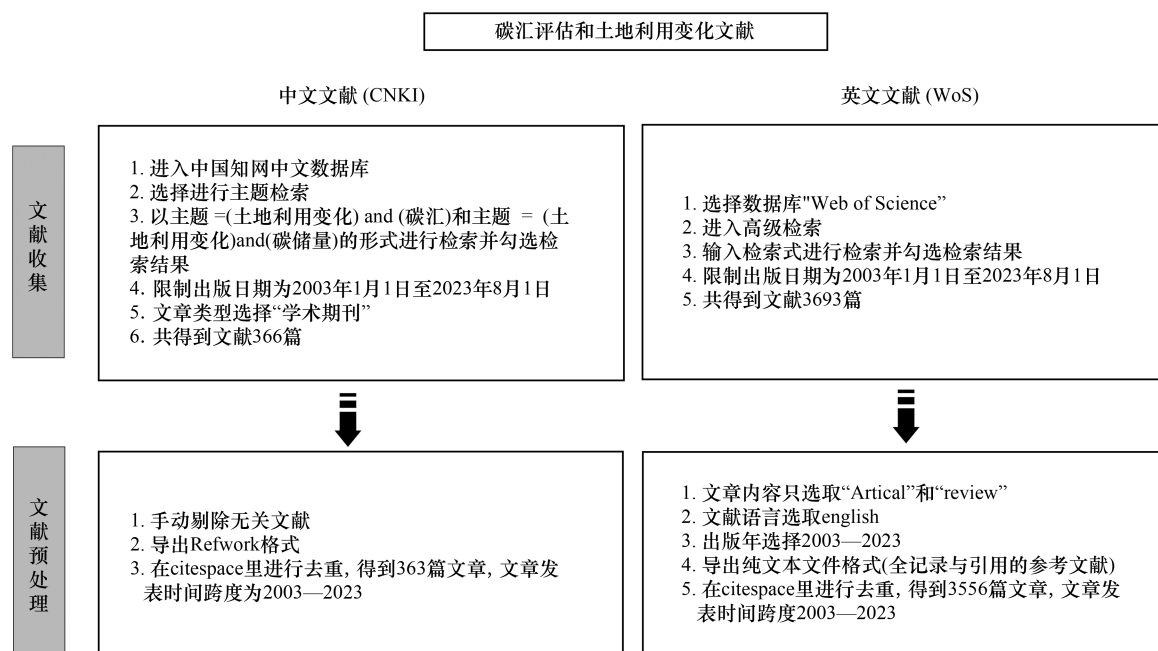


图 1 文献检索与预处理步骤

Fig.1 Literature retrieval and preprocessing steps

1.2 研究方法

知识图谱是以知识域为对象,来描绘某一领域科学知识的发展进程与结构关系的一种图像,具有“图”和“谱”的双重性质^[20]。本研究利用可视化软件 CiteSpace5.7.r5 进行文献信息的挖掘,首先分别对 CNKI 和 WoS 数据库文献进行转换和去重,时间切片 (Time Slicing) 为 2003—2023 年,每个切片的年份 (Years Per Slice) = 1;节点类型 (Node Types) 选择关键词;修建设置上本文选择了“pruning the merged network”和“pathfinder”,其余设置与默认设置保持一致。

2 土地利用变化和碳汇评估交叉研究进展概况

2.1 土地利用变化与碳汇交叉研究文献总体情况

对 CNKI 和 WoS 中检索到的文献进行初步分析,通过趋势线可以看出,该领域发文量整体上均呈现上升趋势 (图 2)。在“碳汇”和“土地利用变化”研究领域近二十年来发文量中, WoS 共计检索到 3556 篇文献,年均 178 篇,相关文献发文量呈现逐年上升趋势,波动幅度较小。CNKI 的刊文量自 2003 年以来整体趋势线呈上升趋势,部分年份存在波动。在 2010 年之前,我国有关土地利用变化和碳汇评估的研究刚刚起步,每年发文量均在 10 篇以下;自 2020 年,中国向世界郑重宣布“双碳”目标以来,国内有关碳汇的研究迅速成长。

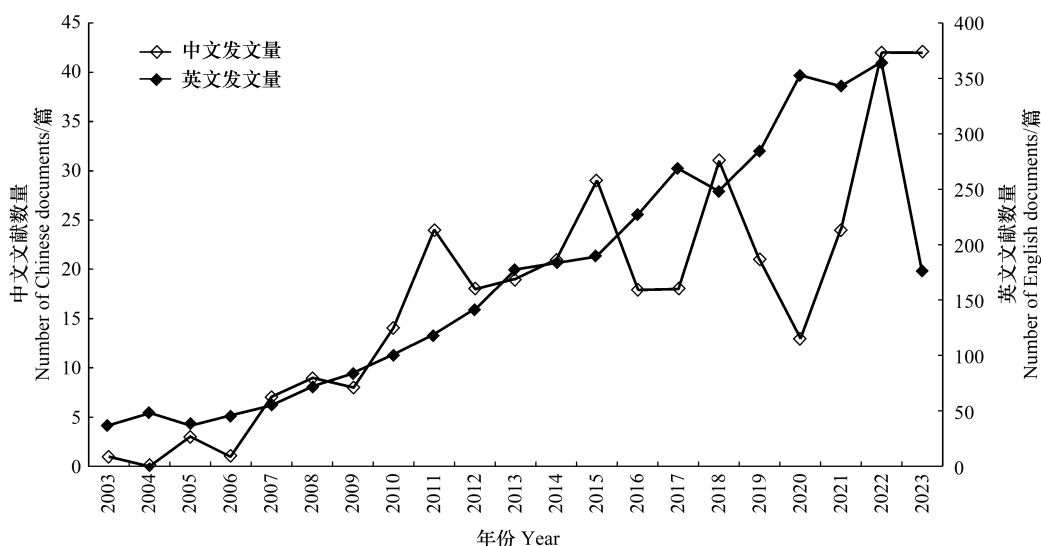


图 2 WoS 和 CNKI 文献 2003—2023 年刊文数量分析图 (统计时间:2023-08-01)

Fig.2 Quantitative Analysis Chart of WoS and CNKI Literature Published in 2003—2023 (Statistics Time : 2023-08-01)

2.2 土地利用变化与碳汇评估交叉研究关键词与热点分析

利用 CiteSpace 对文献的关键词进行共现分析,发现检索词“土地利用变化”“碳汇”“碳储量”中最大的节点是“土地利用变化”,说明基于土地利用变化和碳汇交叉研究中,核心在于土地利用变化 (图 3)。根据“碳汇”和“土地利用变化”领域在 CNKI 和 WoS 中的高频关键词及频次分布可知,除去检索的关键词外, WoS 高频关键词主要有“climate change”、“dynamics”“forest”,有关“climate change”的研究一直呈现波动上升趋势。气候变化被认为是对环境和人类福祉的全球威胁,国际研究主要集中在全球气候背景下碳的排放和存储,以森林生态系统、农业生态系统和草地生态系统研究居多^[21—22],同样也有研究增加碳汇和减少碳排对减缓气候变化的作用^[23],以及利用气候模型来模拟土地利用变化对气候的反馈^[24]等。“dynamics”关键词表明有关碳汇和土地利用变化的研究是一个动态的过程^[25],研究从动力学的角度去理解陆地生态系统碳平衡^[26]。“forest”关键词表明,国外有关土地利用变化和碳汇的研究,主要集中在森林这一研究对象,因为森林生态系统地上和地下部分都具有碳汇和碳排的功能,具有重要的研究价值^[27]。CNKI 高频关键词主要有“碳排放”、

型包括 Markov 模型、系统动力学模型等,用于模拟区域土地利用数量的变化;在空间预测模型中,传统的元胞自动机(CA)是应用最为广泛的模型之一,为实现更为准确的模拟功能,学者们基于 CA 开发了多种土地利用变化模型,如 SLEUTH、GEO-MOD 和 CLUE-S 以及 FLUS 模型等。近年来,机器学习技术(例如决策树、支持向量机、神经网络和随机森林)对土地利用变化的建模得到了扩展,目前机器学习在土地利用变化中仍在探索中,学者们开始集成不同的机器学习方法开发了混合方法,从而获得了更好的性能和评估,提高结果的准确性,比如 CA-ANN、RF-CA-Markov、ANN-CA-Markov 等。目前由于模型的不断改进,研究区域也在不断细化,但是土地利用变化对生态系统碳循环的影响是一个复杂的过程,目前已经有学者开始建立土地利用变化模拟模型与碳汇评估的耦合模型^[60],这也将成为未来重要的研究方向。在研究内容上,主要集中在:1)不同土地利用类型转变下的碳储量的变化^[30,61];2)城市扩张或城市化过程中碳储量的变化^[62-63];3)退耕还林等政策以及自然环境背景影响下,土地利用类型的转换及碳储量变化^[64-65]。

3.2 生态系统服务碳汇评估

生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种惠益,包括有形的物质产品供给与无形的服务提供两方面,主要分为供给服务、调节服务和文化服务,以及维持其他类型服务所必须的支持服务^[66],其中有关陆地生态系统碳储量是表征碳储存服务的重要指标,其变化与土地利用变化存在着密不可分的关系。因此,学者们主要通过探究土地利用变化对生态系统服务的影响,来对碳储量定量估算,将两者的关系主要分为三类:1)土地利用类型变化对生态系统服务的影响^[67];2)土地利用格局变化对生态系统服务的影响^[68-69];3)土地利用强度变化对生态系统服务的影响^[70-71]。生态系统服务碳汇的评估方法多样,从传统的样地清查法到目前遥感监测与模型相结合的方法,其中,生态系统服务评估模型(InVEST)碳储量模块因具有操作相对简单、参数调整灵活、评估结果可动态化和空间化表达等优点,被广泛应用于生态系统碳储量估算^[72-73]。土地利用变化在生态系统服务碳汇评估的研究主要包括:1)预测不同情境下土地利用变化对生态系统服务碳储量的影响^[74-75];2)使用土地详查数据来分析生态系统服务价值的历史性变化^[76]。

3.3 土壤和植被碳汇评估

生态系统碳储量由植被碳和土壤碳构成,土地利用变化通过影响植被碳和土壤碳的固定、排放,从而引起陆地生态系统碳储量的改变^[19]。其植被演替过程以及植被本身生长特性等自然过程和人为收获生物量及对残体的遗留、城市化等行为都会直接或者间接使得植被和土壤碳储量增加或减少^[77],因此,目前国内外都比较重视不同土地利用方式对植被和土壤有机碳的影响研究。主要研究内容是:1)植被和土壤碳储量现状评估以及其碳汇强度的变化,主要以传统的生物量法^[78]、蓄积量法^[79]和生物清单法^[80]为主,以及 CASA 模型^[81]结合遥感数据等方法;2)从不同土地利用方式和不同时间维度下探究土壤和植被碳效应的差异^[82-83],植被和土壤碳储量的变化是生态系统碳汇的重要来源,但二者可能存在巨大差异^[84],目前只有少数研究评估了这些区域差异和影响因素,这对于理解碳汇的区域差异和影响因素具有重要意义。

4 土地利用变化和碳汇评估交叉研究的主要发展脉络及前沿趋势

4.1 土地利用变化和碳汇评估交叉研究发展脉络

关键词时区图谱,反映在一段时间内关键词热点的变化路径,能够从时间维度上把握相关研究领域的热点主题及其演化过程。

4.1.1 国际研究历程

起步阶段:2003—2008 年,自 1997 年《京都议定书》诞生以来,国际上已有近 20 个国家和地区制定了有关应对气候变化、控制温室气体排放、低碳绿色发展和征收减排税方面的国内法律法规,因此在该阶段集中从气候变化的角度对该领域进行研究^[85],在这个阶段里“森林”和“土地利用”受到了重点关注,学术界也更加认识到了土地利用变化与土壤碳汇的联系,其中林地、碳存储是研究的重点^[86]。

发展阶段:2009—2014 年,伴随着生态系统服务概念的国际化,在该阶段的重点是围绕生态系统服务对

碳储量进行评估,除此之外该阶段的研究热点还集中在温室气体排放^[87]、生物燃料^[88]、城市化^[89]等方向,在温室气体排放方面,学者研究表明具有生态效应的土地类型发挥着重要的碳储存作用,能够有效影响土壤有机质的分解和温室气体排放^[90]。随着城市的快速发展,不少学者提出城市化过程对碳储量和生态系统功能产生了深远的影响,并开始从供需平衡的视角提出相应的应对措施^[91]。

深化阶段:2015—至今,在2015年《巴黎协定》出台后,国际社会掀起了第二轮应对气候变化立法高潮,因此有关碳汇的研究又进入了新的阶段,提出了从生态系统服务的角度协调与人类福祉的关系,探讨了碳储量的重要作用^[92]。此阶段量化评估的方法逐渐增多,包括碳储量估算模型、土地利用变化模型以及集成不同机器学习的混合模型等,能够根据不同情景假设进行模拟预测。

4.1.2 国内研究过程与国家政策息息相关

CNKI 的文献以及 WoS 中,中国发表的有关土地利用变化和碳汇评估的研究起步较晚,观察近 20 年土地利用变化和碳汇领域的研究关键词的时区图,并结合国内政策(图 4)可以发现,国内研究与国家政策变化过程息息相关。2003—2009 年,在该阶段国家林业局颁布了一系列有关林业生态的政策,在这个阶段我国主要关注的是林业碳汇,研究森林碳汇的评估以及初步探讨了土地利用变化对碳储量的影响^[93—94]。

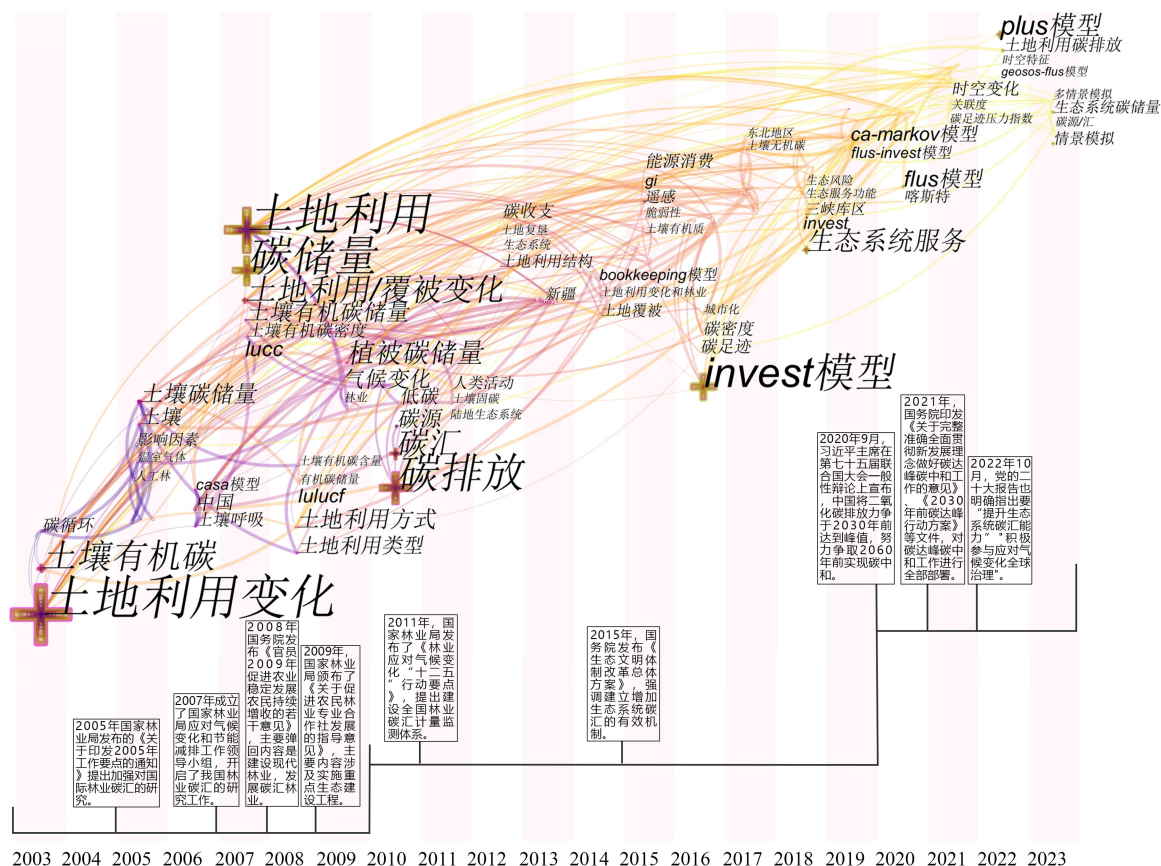


图 4 CNKI 关键词时区图谱——政策耦合图

Fig.4 CNKI keyword time zone map-policy coupling map

2010—2019 年,在该阶段国内研究者开始探索不同土地类型的碳汇评估,2015 年国务院发布《生态文明体制改革总体方案》,强调建立增加生态系统碳汇的有效机制,因此在本阶段前期更加深入探讨了土地利用结构与碳排和碳汇的关系^[95],后期开始从生态系统服务的视角研究碳储量主要运用 InVEST 模型进行碳储量的估算^[96]。

2020—至今,随着习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,中国将力争于 2030 年前达到

峰值,2060 年前实现碳中和,随后引发了学者们的广泛关注,在这一阶段主要关注碳汇的时空演变^[97],并聚焦在土地利用模拟模型与碳储量评估模型进行耦合研究,预测碳储量变化趋势以加快推进生态建设和“双碳”战略规划提供科学参考^[98]。

4.2 土地利用变化和碳汇评估交叉研究前沿趋势

土地利用变化和碳汇交叉的研究方面,研究热点在 2010 年之前集中在土地利用变化、土壤碳储量、管理和模型等方面。近年来,研究热点逐渐转向模型模拟研究、碳储量与生物多样性和生态系统服务的权衡与协同研究。研究内容由土地利用变化、土壤有机碳转变为碳储量评估模型、土地利用变化模拟模型和生态系统服务及管理,可见研究重点由现有现象研究转变为未来模拟预测研究。随着遥感技术的发展,生态系统模型和土地利用预测模型成为了研究热点,与此同时,在模型众多的情况下,选择合适研究区的模型与方法也成为了研究重点。从国际以及国家对碳中和的重视程度,越来越多的政策出台,学者们也将相关政策纳入到定量分析当中,未来有关研究结合研究区相关政策进行定量的情景设置,并进行精细化的分区管理将会成为研究热点;研究对象从单一土地利用类型的碳汇评估转向统一的生态系统服务的供需关系;评估尺度从宏观尺度向中微观尺度转变,从国家尺度、亚热带地区尺度转变为流域、市域和典型区域等尺度。

5 结语

目前国内外关于土地利用变化和碳汇评估的研究热点主要围绕“气候变化”展开,文献的研究对象聚焦于“森林、草地”等自然用地以及“建设用地、耕地”等人为用地。随着时间的发展,研究热点的关键词由“土壤有机碳、碳源/汇”发展到“遥感、生态系统服务、模型”,再到近年来的“情景模拟、预测模型”等。这些关键词之间都有明显的共被引关系,表明研究热点之间存在渐进演变的趋势。同时,对于碳汇的评估也逐渐从静态评估转向动态评估,强调在土地利用变化过程中碳汇的“动态变化”。

土地利用变化和碳汇评估交叉的研究大体包括三大领域:土地利用类型碳汇评估、生态系统服务碳汇评估、土壤和植被碳汇评估。对于“土地利用类型碳汇评估”是土地利用变化和碳汇交叉评估的重点,在研究内容上主要集中在不同土地利用类型和不同土地利用类型的转变所发生的碳汇的变化,研究对象主要集中在某一种土地利用类型的深入研究或综合的土地利用类型碳汇对比研究。“生态系统服务碳汇评估”则是纳入了生态系统服务的概念,将碳汇作为一种服务,学者们多研究土地利用类型变化、土地利用格局变化和土地利用强度变化对生态系统服务的影响来探究土地利用变化与生态系统服务的关系,而有关土地利用变化在生态系统服务碳汇评估上从历史性变化和预测模拟未来变化时间尺度上展开。“土壤和植被碳汇评估”主要研究植被和土壤碳汇现状评估以及其碳汇强度的变化,较为前沿的研究是关于土壤和植被碳效应的差异研究。

随着城市化进程的加快,土地利用变化与碳汇评估交叉研究的尺度逐渐向城市和城市群转变。从研究方法上来看,遥感技术的完善与遥感数据分析方法的改进,越来越多的土地利用变化模型和生态系统过程预测模型得到广泛的应用,包括 Markov 模型、系统动力学模型等“自上而下”的数量关系模型以及 SLEUTH、GEO-MOD、CLUE-S、FLUS 等;而常见的生态系统过程预测模型有 FORCCHN、HASM、InVEST 等。此外,土地利用变化模拟模型与生态系统过程预测模型的耦合模型,未来将成为重要的研究方向。与此同时,机器学习技术在土地利用变化建模上得到了扩展及应用,并出现了多种机器学习与传统模型的整合模型。在碳中和的背景下,有关碳汇的研究未来将持续成为热点,未来应加强多学科交叉,综合社会、生态、技术等多学科进行综合性的碳汇评估研究,以完善该领域的研究深度和广度,为早日实现碳达峰、碳中和目标提供科学依据和参考。

参考文献 (References):

- [1] 李双成, 张雅娟. 陆地生态系统碳汇评估中的若干科学问题. 中国林业产业, 2022(3): 65-77, 79-80.
- [2] Stone J. Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Global Environmental Change, 1997, 7(2): 186-187.
- [3] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, Yue C, Shen H H. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. Science China Earth

- Sciences, 2011, 54(10): 1458-1468.
- [4] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 冯小华, 刘璐媛. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906.
- [5] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, Agbola S B, Angelsen A, Bruce J W, Coomes O T, Dirzo R, Fischer G, Folke C, George P S, Homewood K, Imbernon J, Leemans R, Li X B, Moran E F, Mortimore M, Ramakrishnan P S, Richards J F, Skånes H, Xu J C. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261-269.
- [6] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 189-204.
- [7] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1015-1022.
- [8] Stuiver M. Atmospheric carbon dioxide and carbon reservoir changes. *Science*, 1978, 199(4326): 253-258.
- [9] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. 应用生态学, 2003(8): 1385-1391.
- [10] Solomon A M, Prentice I C, Leemans R, Cramer W P. The interaction of climate and land use in future terrestrial carbon storage and release. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70(1): 595-614.
- [11] 李玉强, 赵哈林, 陈银萍. 陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(1): 37-42.
- [12] 欧阳婷萍, 张金兰, 曾敬, 邹毅, 朱照宇. 土地利用变化的土壤碳效应研究进展. 热带地理, 2008, 28(3): 203-208.
- [13] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B*, 1999, 51(2): 298-313.
- [14] Olofsson J, Hickler T. Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6, 000 years. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2008, 17(5): 605-615.
- [15] Van Minnen J G, Klein Goldewijk K, Stehfest E, Eickhout B, van Drecht G, Leemans R. The importance of three centuries of land-use change for the global and regional terrestrial carbon cycle. *Climatic Change*, 2009, 97(1): 123-144.
- [16] Ramankutty N, Gibbs H K, Achard F, Defries R, Foley J A, Houghton R A. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 51-66.
- [17] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844.
- [18] 岳天, 李永夫, 肖永恒, 李永春, 何洁, 姜培坤, 周国模, 刘娟. 天然常绿阔叶林改造为板栗林对土壤有机碳库的影响. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2181-2188.
- [19] 唐睿, 彭开丽. 土地利用变化对区域陆地碳储量的影响研究综述. 江苏农业科学, 2018, 46(19): 5-11.
- [20] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [21] Li W, MacBean N, Ciais P, Defourny P, Lamarche C, Bontemps S, Houghton R A, Peng S S. Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992-2015). *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 219-234.
- [22] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: results from observation in a small Karst Catchment, Southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 288: 106719.
- [23] Watson J E M, Evans T, Venter O, Williams B, Tulloch A, Stewart C, Thompson I, Ray J C, Murray K, Salazar A, McAlpine C, Potapov P, Walston J, Robinson J G, Painter M, Wilkie D, Filardi C, Laurance W F, Houghton R A, Maxwell S, Grantham H, Samper C, Wang S, Laestadius L, Runting R K, Silva-Chávez G A, Ervin J, Lindenmayer D. The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(4): 599-610.
- [24] Popp A, Calvin K, Fujimori S, Havlik P, Humpenöder F, Stehfest E, Bodirsky B L, Dietrich J P, Doelmann J C, Gusti M, Hasegawa T, Kyle P, Obersteiner M, Tabau A, Takahashi K, Valin H, Waldhoff S, Weindl I, Wise M, Kriegler E, van Vuuren D P. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 331-345.
- [25] Kauffman J B, Adame M F, Arifanti V B, Schile-Beers L M, Bernardino A F, Bhomia R K, Donato D C, Feller I C, Ferreira T O, del Carmen Jesus Garcia M, MacKenzie R A, Megonigal J P, Murdiyaro D, Simpson L, Hernández Trejo H. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 2020, 90(2): e01405.
- [26] Tank S E, Fellman J B, Hood E, Kritzberg E S. Beyond respiration: controls on lateral carbon fluxes across the terrestrial-aquatic interface. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 76-88.
- [27] Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, Poulter B, Arneeth A, Haverd V, Calle L. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 4382-4387.
- [28] 刘学荣, 杨琳, 王颖, 赵婧宇, 李志学, 王静静, 王乾鑫, 周嘉. 基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究. 水土保持通报, 2017, 37(2): 107-114.
- [29] 赵先超, 牛亚文, 肖杰, 张子兮. 基于土地利用变化的岳阳市碳排放时空格局研究. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 10-19.
- [30] 冷红, 肇禹然, 于婷婷. 小城镇土地利用变化对碳排放的影响及优化策略研究——以浙江省长兴县为例. 现代城市研究, 2022, 37(6):

54-60, 66.

- [31] 杨宇萍, 胡文敏, 贾冠宇, 李果, 李毅. 基于 InVEST 与 ANN-CA 模型的环洞庭湖区土地利用碳储量情景模拟. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2023, 47(4): 175-184.
- [32] 金胜昔, 林正军. 国际转喻研究动态的科学知识图谱分析(2007—2016). 外语研究, 2017, 34(3): 18-23.
- [33] Gong J, Liu D Q, Zhang J X, Xie Y C, Cao E J, Li H Y. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, Western China. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 283-293.
- [34] Fu Q, Hou Y, Wang B, Bi X, Li B, Zhang X S. Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain-oasis-desert system: a case study in Altay Prefecture, China. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12939.
- [35] Wei B H, Kasimu A, Reheman R, Zhang X L, Zhao Y Y, Aizizi Y, Liang H W. Spatiotemporal characteristics and prediction of carbon emissions/absorption from land use change in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110329.
- [36] Ghosh S, Dinda S, Das Chatterjee N, Dutta S, Bera D. Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using Pressure-Sensitivity-Resilience framework: an approach towards achieving low carbon cities. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 336: 130417.
- [37] Quegan S, Le Toan T, Chave J, Dall J, Exbrayat J F, Minh D H T, Lomas M, D'Alessandro M M, Paillou P, Papathanassiou K, Rocca F, Saatchi S, Scipal K, Shugart H, Smallman T L, Soja M J, Tebaldini S, Ulander L, Villard L, Williams M. The European Space Agency BIOMASS mission: measuring forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 44-60.
- [38] Jones I L, DeWalt S J, Lopez O R, Bunnefeld L, Pattison Z, Dent D H. Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 133987.
- [39] Feliciano D, Ledo A, Hillier J, Nayak D R. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 117-129.
- [40] 李小军, 车良革, 胡宝清. FLUS-InVEST 模型的北海市生态系统碳储量时空差异分析. 测绘通报, 2023(6): 117-123, 183.
- [41] 李语诗, 夏志业, 张蕾. 基于 SSPs 多情景目标的 2030 年成渝经济圈土地利用碳排放预测及其空间优化. 生态环境学报, 2023, 32(3): 535-544.
- [42] 李春亮, 王翔, 张炜, 曲正钢, 杨菁, 张君. 黄土高原西段表层土壤有机碳储量及时空变化规律. 现代地质, 2022, 36(2): 655-661.
- [43] 黄凯文, 马珍, 苦君月, 张珍明, 姜鑫, 黄先飞. 土壤有机碳损失机制研究进展. 江苏农业科学, 2022, 50(24): 26-32.
- [44] 吕国玮, 周建春, 蔡玉梅, 孟超, 李升发, 陈伟莲. 广东省土地利用及其变化和林业碳核算研究. 地理学报, 2023, 78(3): 640-657.
- [45] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 赵楚, 吴静, 张茂莎. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1607-1616.
- [46] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [47] Cameron C, Hutley L B, Friess D A, Munksgaard N C. Hydroperiod, soil moisture and bioturbation are critical drivers of greenhouse gas fluxes and vary as a function of landuse change in mangroves of Sulawesi, Indonesia. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 365-377.
- [48] Spawn S A, Lark T J, Gibbs H K. Carbon emissions from cropland expansion in the United States. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(4): 045009.
- [49] Creutzig F, Bren d'Amour C, Weddige U, Fuss S, Beringer T, Gläser A, Kalkuhl M, Steckel J C, Radebach A, Edenhofer O. Assessing human and environmental pressures of global land-use change 2000-2010. *Global Sustainability*, 2019, 2: 1.
- [50] 荣月静, 张慧, 赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 447-450, 451.
- [51] Lee S, Lee S, Shin J, Yim J, Kang J. Assessing the carbon storage of soil and litter from national forest inventory data in South Korea. *Forests*, 2020, 11(12): 1318.
- [52] Menéndez-Miguélez M, Álvarez-Álvarez P, Pardos M, Madrigal G, Ruiz-Peinado R, López-Senespleda E, Del Río M, Calama R. Development of tools to estimate the contribution of young sweet chestnut plantations to climate-change mitigation. *Forest Ecology and Management*, 2023, 530: 120761.
- [53] Vaughn R M, Hostetler M, Escobedo F J, Jones P. The influence of subdivision design and conservation of open space on carbon storage and sequestration. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 131: 64-73.
- [54] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, Le Quééré C, Friedlingstein P, Tans P P. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 2000, 290(5495): 1342-1347.
- [55] Piao S L, Liu Z, Wang T, Peng S S, Ciais P, Huang M T, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J F, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X Y, Stohl A, Yao Y T, Zhu Z C, Tans P P. Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 359-363.

- [56] Tao B, Tian H Q, Chen G S, Ren W, Lu C Q, Alley K D, Xu X F, Liu M L, Pan S F, Virji H. Terrestrial carbon balance in tropical Asia: contribution from cropland expansion and land management. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 85-98.
- [57] Leemans R, van Amstel A, Battjes C, Kreileman E, Toet S. The land cover and carbon cycle consequences of large-scale utilizations of biomass as an energy source. *Global Environmental Change*, 1996, 6(4): 335-357.
- [58] Li C, Frohling S, Frohling TA. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D9): 9759-76.
- [59] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 吕泳洁, 王亚丽. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 324-334, 396.
- [60] 毛永发, 周启刚, 王陶, 罗泓然, 伍龙江. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [61] 王丹妮. 基于上海市土地利用方式变化下的土壤有机碳储量核算研究. *上海国土资源*, 2021, 42(3): 1-6.
- [62] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [63] Chen Y M, Li X, Liu X P, Zhang Y, Huang M. Tele-connecting China's future urban growth to impacts on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 765-779.
- [64] Heilmayr R, Echeverría C, Lambin E F. Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 701-709.
- [65] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 174-182.
- [66] 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(04): 441-446.
- [67] Ba Z D, Du H S, Hasi E, Lu X L. Changes in land use and ecosystem service value in desert areas of China after reform and opening up. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1251605.
- [68] Rodríguez-Echeverry J, Echeverría C, Oyarzún C, Morales L. Impact of land-use change on biodiversity and ecosystem services in the Chilean temperate forests. *Landscape Ecology*, 2018, 33(3): 439-453.
- [69] 刘建华, 许峰, 王耀, 李航, 沈文东. 基于土地利用格局变化的生态风险与固碳功能评价——以河北省黄骅市为例. *中国生态农业学报*, 2018, 26(08): 1217-1226.
- [70] Dislich C, Keyel A C, Salecker J, Kisel Y, Meyer K M, Auliya M, Barnes A D, Corre M D, Darras K, Faust H, Hess B, Klasen S, Knohl A, Kreft H, Meijide A, Nurdiansyah F, Otten F, Pe'er G, Steinebach S, Tarigan S, Tölle M H, Tschernitz T, Wiegand K. A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2017, 92(3): 1539-1569.
- [71] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [72] Rimal B, Sharma R, Kunwar R, Keshkar H, Stork N E, Rijal S, Rahman S A, Baral H. Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal. *Ecosystem Services*, 2019, 38: 100963.
- [73] Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, Zhu L Q. Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe Catchment, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(9): 1507-1522.
- [74] Hoque M Z, Cui S H, Islam I, Xu L L, Ding S P. Dynamics of plantation forest development and ecosystem carbon storage change in coastal Bangladesh. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 107954.
- [75] 卿苗, 赵军, 冯超, 黄治化, 温媛媛, 张伟婕. 1980—2030 年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(23): 9525-9536.
- [76] 董孝斌, 刘梦雪. 土地利用/覆盖变化-生态系统服务-人类福祉关系研究进展. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(3): 465-475.
- [77] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. *中国工程科学*, 2003, 5(9): 65-71, 77.
- [78] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320—2322)的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [79] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2007(06): 804-812.
- [80] 刘淑琴, 夏朝宗, 冯薇, 张克斌, 马莉, 刘建康. 西藏森林植被乔木层碳储量与碳密度估算. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3127-3134.
- [81] 吴国伟, 赵艳玲, 付艳华, 倪巍, 张艳, 余建新. 复垦矿区土地利用类型变化对植被碳储量的影响. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11): 1437-1444.
- [82] T M K K, Pal S, Chand P, Kandpal A. Carbon sequestration potential of agroforestry systems in Indian agricultural landscape: a Meta-Analysis. *Ecosystem Services*, 2023, 62: 101537.

- [83] Chuai X, Yuan Y, Zhang X, Guo X, Zhang X, Xie F, Zhao R, Li J. Multiangle land use-linked carbon balance examination in Nanjing City, China. *Land Use Policy*, 2019, 84:305-15.
- [84] Zhang M Y, He H L, Zhang L, Ren X L, Wu X J, Qin K Y, Lv Y, Chang Q Q, Xu Q, Liu W H, Feng L L. Increased forest coverage will induce more carbon fixation in vegetation than in soil during 2015—2060 in China based on CMIP6. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(10): 105002.
- [85] Lewis S L. Tropical forests and the changing earth system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2006, 361(1465): 195-210.
- [86] Houghton R A, Hackler J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1034.
- [87] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, Maestre F T, Tavassoli M, Allen E B, Barrows C W, Belnap J, Ochoa-Hueso R, Ravi S, Allen M F. Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 766-779.
- [88] Johnson E. Goodbye to carbon neutral: getting biomass footprints right. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(3): 165-168.
- [89] Groffman P M, Cavender-Bares J, Bettez N D, Grove J M, Hall S J, Heffernan J B, Hobbie S E, Larson K L, Morse J L, Neill C, Nelson K, O'Neil-Dunne J, Ogden L, Pataki D E, Polsky C, Chowdhury R R, Steele M K. Ecological homogenization of urban USA. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(1): 74-81.
- [90] Ma J J, Ullah S, Niu A Y, Liao Z N, Qin Q H, Xu S J, Lin C X. Heavy metal pollution increases CH₄ and decreases CO₂ emissions due to soil microbial changes in a mangrove wetland: microcosm experiment and field examination. *Chemosphere*, 2021, 269: 128735.
- [91] Yang Y N, Li J, Wang L, Wang Z H, Ling Y, Xu J L, Yao C X, Sun Y Y, Wang Y, Zhao L X. The impact of urbanization on the relationship between carbon storage supply and demand in mega-urban agglomerations and response measures: a case of Yangtze River Delta region, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(21): 13768.
- [92] Cui F Q, Wang B J, Zhang Q, Tang H P, De Maeyer P, Hamdi R, Dai L W. Climate change versus land-use change—what affects the ecosystem services more in the forest-steppe ecotone? *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143525.
- [93] 张小全,武曙红,何英,侯振宏.森林、林业活动与温室气体的减排增汇.林业科学,2005(06):153-159.
- [94] 周涛,史培军.土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响.地球科学进展,2006,21(2):138-143.
- [95] 郑欣,程久苗,郑硕.基于土地利用结构变化的芜湖市碳排放及其影响因素研究.水土保持研究,2012,19(3):259-262,268.
- [96] 吴佩君,刘小平,黎夏,陈逸敏.基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例.地理与地理信息科学,2016,32(05):22-28,36.
- [97] 周伟婷.基于土地利用变化的贵阳市碳排放时空演变和空间关联.湖北农业科学,2023,62(5):8-13.
- [98] 孙方虎,方凤满,洪炜林,罗浩,余健,房莉,苗雨青.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测.水土保持学报,2023,37(1):151-158.