

引用格式: 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559. [Yi D, Ou M H, Guo J, et al. Progress and prospect of research on land use carbon emissions and low-carbon optimization[J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1545-1559.] DOI: 10.18402/resci.2022.08.02

土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望

易丹¹, 欧名豪^{1,2,3}, 郭杰^{1,2,3}, 韩逸⁴, 易家林¹, 丁冠乔¹, 吴文俊¹

(1. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学中国资源环境与发展研究院, 南京 210095; 3. 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095; 4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 土地作为陆地生态系统的自然空间载体以及人类生产生活的社会经济载体, 在不同利用方式下扮演着碳源/碳汇的角色。开展土地利用碳排放研究, 制定土地利用低碳优化策略, 对维持自然生态系统与社会经济系统平衡、引导社会经济的低碳转型与可持续发展、助力碳达峰与碳中和目标的实现具有重要意义。本文基于“理论-方法-实践”的范式, 梳理了土地利用碳排放及低碳优化的研究脉络, 从土地利用碳排放效应、土地利用碳排放核算方法、低碳目标导向的土地利用结构优化及其模式与政策4方面总结现有研究进展, 并对未来研究趋势进行了展望。本文认为未来应围绕“从全生命周期视角出发构建土地利用低碳优化研究的系统框架、基于全域全要素管控设计低碳国土空间规划的实现路径、统筹‘规模-结构-布局-强度’以优化碳排放约束下的建设用地空间格局、以基于自然的解决方案为原则制定差别化的生态系统碳汇提升方案和耦合多元要素以探索土地利用低碳优化的多学科交叉应用”等方面展开研究, 以期编制低碳目标导向的国土空间规划和制定科学合理的低碳管理策略提供理论基础。

关键词: 土地利用碳排放; 低碳优化; 碳达峰; 碳中和; 研究脉络; 研究进展; 趋势展望

DOI: 10.18402/resci.2022.08.02

1 引言

气候变暖因其引发的海平面上升、灾害频发、生物多样性减少等一系列生态环境问题, 被视为全球十大环境危机之首^[1,2]。人类活动排放的CO₂、甲烷等温室气体是造成全球气候变暖的主要原因^[3], 为减缓全球变暖趋势, 1992年和1997年先后通过的《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change)^[4]与《京都议定书》(Kyoto Protocol)^[5]制定了减少温室气体排放的目标。2009年哥本哈根大会就各国减排责任展开

了激烈辩论, 2015年巴黎协议对全球应对气候变化的行动作出了统一安排, 旨在为全球“降温”。2018年IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)就《全球升温1.5℃特别报告》形成了碳达峰、碳中和(以下简称“双碳”)以及1.5℃控温目标的共识^[6]。在2020年的第75届联合国大会一般性辩论会上, 中国提出分两个阶段实现“双碳”目标^[7]。可见, 控制温室气体排放, 早日实现“双碳”目标是全球为应对气候变暖所达成的共识。

土地利用是造成温室气体排放的主要人类活

收稿日期: 2022-03-02; 修订日期: 2022-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(72174089; 71774085); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_0790); 国家重点研发计划重点专项(2018YFD1100103)。

作者简介: 易丹, 女, 江西宜春人, 博士研究生, 主要从事土地利用变化及其生态效应研究。E-mail: reneyd@126.com

通讯作者: 郭杰, 男, 湖南南县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事国土空间规划与管制研究。E-mail: guojie@njau.edu

动之一^[8],土地利用变化通过改变原有的土地覆被类型及其所承载的社会经济活动,进而影响陆地生态系统的碳循环过程^[9]。有研究表明,从第二次工业革命初到20世纪末,全球人类活动碳排放总量中,超过30%是由土地利用变化引起的^[10],而在2000—2009年这一比例也达12.5%^[11]。2016年,全球碳计划项目(Global Carbon Project)统计结果显示,在1870—2015年全球累计碳排放中,土地利用变化累计排放531 Gt(1Gt=10亿t)CO₂,占总量的26.1%^[12]。国土空间规划被认为是助力实现“双碳”目标的重要型政策工具,可视为减少土地利用碳排放、缓解全球气候变暖的有效着力点^[13]。土地是开展国土空间规划的主要载体,关联着自然生态系统和社会经济系统^[14]。一方面,作为陆地生态系统碳源/碳汇的自然空间载体,土地利用规模、结构、布局、强度的改变,直接或间接造成了碳排放/碳吸收的变化^[15]。另一方面,作为人类生产生活的社会经济载体,土地所承载的社会经济活动导致了大量的碳排放^[16]。国土空间规划的编制与实施,将影响未来国土空间的结构与布局,从而影响城市结构^[17]、交通建筑^[18]、工业能源^[19]、生态资源^[20]等领域。总体而言,土地利用碳排放研究为了解社会-生态系统的碳循环提供了综合视角,而国土空间规划则为开展土地利用低碳优化提供了现实契机,为人类减缓和适应全球气候变暖提供了解决路径。

近年来,土地利用碳排放效应^[21-23],核算方法^[24-26]以及土地利用低碳优化^[27-29]是土地利用碳排放及低碳优化研究的主要内容。相关研究促进了土地利用碳排放理论体系的完善与深化,并在具体的实践

应用中发挥了重要作用,为区域碳减排和可持续发展提供了重要的参考依据^[27]。但是由于土地利用及其变化受地形、气候、土壤等自然因素和社会结构、经济状况、政策制度等人为因素的共同影响^[14],土地利用及其变化驱动的碳排放研究存在着较多的不确定性,导致土地利用碳排放效应的内在机制较为复杂,其作用机理尚未完全明晰^[30],且土地利用碳排放核算方法仍未统一。此外,现有的土地利用低碳优化多从规模结构视角出发,对土地利用空间布局关注不够。因此,有关土地利用碳排放及低碳优化的研究仍存在探索的空间。本文尝试在梳理土地利用碳排放及低碳优化研究脉络的基础上,总结当前研究进展,并对未来研究趋势进行展望,旨在进一步认识其内在机制,为合理编制低碳目标导向的国土空间规划和制定科学合理的低碳管理策略提供理论基础,从而引导社会经济的低碳转型与可持续发展,助力“双碳”目标的实现。

2 研究脉络

土地利用碳排放影响着自然生态过程和社会经济的可持续发展,同时也受到自然生态过程和社会经济活动的制约,本质上可视为自然生态系统与社会经济系统相互作用的结果^[14]。为实现土地利用活动对自然生态系统的影响最小化,并达到社会效益的最大化,有必要开展以低碳目标为导向的土地利用优化。梳理土地利用碳排放及低碳优化的研究脉络可为实现以低碳目标为导向的土地利用优化提供理论基础。因此,本文尝试按照“理论—方法—实践”一般范式,梳理当前研究脉络(图1)。

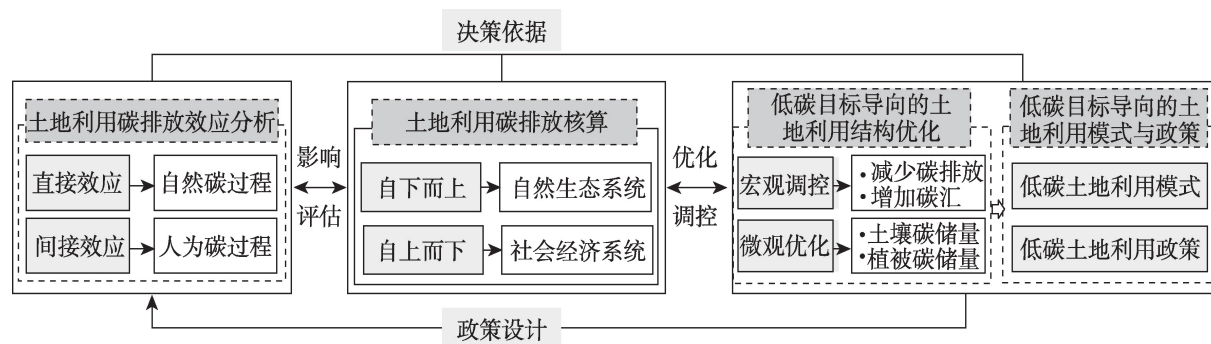


图1 土地利用碳排放及低碳优化研究脉络

Figure 1 Research framework of land use carbon emissions and low-carbon land use optimization

首先,从理论上系统分析土地利用及其变化向大气释放碳的过程与机制,即土地利用碳排放效应^[31]。考虑到其过程与机制不同,将土地利用碳排放效应分为直接效应与间接效应^[30]。其中,直接效应表现为土地利用及其变化对自然碳过程的影响,间接效应则表现为对人为碳过程的影响^[14]。基于土地利用碳排放效应的理论分析,有必要核算土地利用碳排放数量,以期识别其时空变化特征并加深对土地利用碳排放效应的理解。研究尝试从社会-生态系统视角出发,将当前土地利用碳排放核算方法概括为以自然生态系统为主的“自下而上”方法和以社会经济系统为主的“自上而下”方法。而后,基于土地利用碳排放效应的理论分析与土地利用碳排放核算的方法概括,从宏观调控和微观优化两方面总结当前低碳目标导向的土地利用优化措施,并分析其配套的土地利用模式与政策。这类模式与政策进而又会作用于土地利用碳排放的过程与机制,并影响土地利用碳排放的核算结果,因此,从整体上形成了土地利用碳排放及低碳优化研究的逻辑闭环。总的来说,结合“理论-方法-实践”一般范式,从土地利用碳排放效应、土地利用碳排放核算和低碳目标导向的土地利用结构优化及其模式与政策4方面梳理现有研究,可以有效厘清土地利用碳排放及低碳优化的研究脉络,为土地利用低碳优化的管理决策提供参考,推动社会经济的低碳转型与可持续发展。

3 研究进展

基于土地利用碳排放及低碳优化的研究脉络,现有研究可以概括为以下4方面:

3.1 土地利用碳排放效应分析

土地利用碳排放效应包括直接效应和间接效应^[30],分别对应对自然碳过程和对人为碳过程的影响^[14](图2)。

3.1.1 土地利用碳排放直接效应

从土地利用视角出发,土地利用类型变化与土地经营管理方式转变影响着植物生物量、土壤呼吸速率和植被固碳效率等,且有着不同的影响路径^[14]。其中,土地利用类型变化对自然碳过程的影响较为明显,如植树造林、退耕还林、森林砍伐等方面影响了植物生物量,改变了植被碳储量;另一方面也改变了土壤有机物的输入以及土壤条件,影响了土壤有机碳的分解速率,进而改变土壤碳储量^[9]。多数情况下,土地利用类型变化同时对植被碳储量和土壤碳储量产生影响^[16]。近年来,城市扩张和农用地内部转化是土地利用类型变化的主要代表^[32]。作为土地利用变化研究的热点,城市扩张对植被碳储量和土壤碳储量的影响逐步得到关注。以往的研究多表明城市扩张具有碳源效应^[33,34],而有趣的是,Zhang等^[35]的研究发现,中国城市化和农村人口减少带来了巨大但短暂的碳汇,这是因为城市扩张尽管在初期会导致明显的碳储量损失,但是中国城市逐渐变绿的趋势弥补了这部分损失,并形成了碳汇。农用地内部转化是土地利用变化的普遍现象,多指森林、草地、农田和湿地之间的相互转化^[36]。森林生态系统是全球最大的陆地碳库,其面积的微小波动有可能导致碳排放的巨大变化^[14]。如单位面积的林地转化较其他地类的转化对碳储量的损失贡献最大^[37],主要原因是林地的地上植被和地下根系

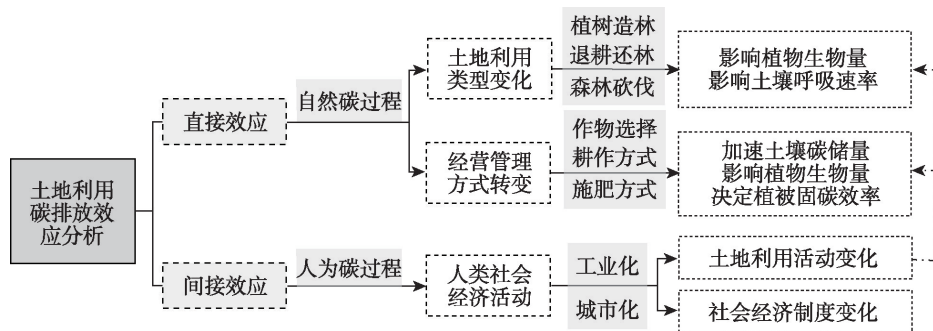


图2 土地利用碳排放效应研究脉络

Figure 2 Research framework of land use carbon emission effect

生物量均高于其他地类^[9],因此,当林地发生转变时表现为明显的碳源效应。

不同的土地利用类型具有不同的经营管理方式,且不同经营管理方式对碳排放的影响机制不同。目前,多从农田和森林两大生态系统分析管理方式转变所引起的土地利用碳排放的变化。农田生态系统受人类活动的影响最为剧烈,管理措施的变化对农田生态系统碳排放有明显的促进或抑制作用^[9]。一方面,高强度的农业生产活动会增加土壤呼吸强度,导致土壤有机质加速分解并释放大气中^[38]。另一方面,传统的耕作方式也会降低碳素在土壤中的留存时间,导致土壤碳流失^[14]。森林生态系统主要由森林植被、凋落物和土壤有机质三部分组成^[9],相较于农田生态系统具有更高的地上植被和地下根系生物量,而影响它们的主要经营管理方式有树种选择、轮伐期以及施肥方式确定。其中,阔叶林由于在生长过程中能够分配较多的生物量到根部,因此土壤碳储量较针叶林更高^[39]。林木生长“顶点”的存在决定着林分的生产力^[40],因此,不同的轮伐期影响着森林生态系统的固碳效率。关于施肥对森林枯枝落叶层和土壤有机碳含量的影响机制较为复杂,已有研究可以确定的是适量施肥可提高林木生长量和净生态系统生产力^[41],但详细作用路径有待进一步探究。

3.1.2 土地利用碳排放间接效应

土地利用碳排放间接效应主要是受工业化和城市化驱动,通过影响人类社会经济活动的方式和强度以影响区域碳排放。不同土地利用类型承载着不同形式的社会经济活动。其中,城市用地虽然仅占全球陆地面积的2.4%,却排放了全球80%的温室气体^[42],因此,关于城市用地所承载的工业能源消费等活动如何影响碳排放值得探究。目前对这方面的探索主要是从城市化的“过程”视角进行分析,概括来讲分为两类:①直接分析城市化导致的土地利用变化对碳排放的影响,其本质仍是通过影响植物生物量、土壤呼吸速率和植被固碳效率等进而影响碳排放^[43],具体表现为城市扩张对耕地、林地等生态用地的侵占^[44]。②分析城市化所驱动的社会、经济和制度等变化对碳排放的影响^[45]。有学者从形态

学视角分析城市用地的空间布局如何作用于区域资源要素配置进而影响区域碳排放^[46],结果表明空间集聚与交通可达性对碳排放具有正效应,这是因为区域资源要素聚集导致资源与能源消耗增多。也有学者指出城市化通过人力资本积累和清洁生产技术推广,进而弱化其引致的碳排放效应^[47]。总的来说,由工业化和城市化驱动的土地利用类型变化与社会经济制度变化显著地影响着人类社会经济活动的方式和强度,进而影响区域碳排放。

3.2 土地利用碳排放核算方法

土地利用碳排放受到自然生态过程和社会经济活动的共同影响,而自然生态过程的不确定性和社会经济活动的复杂性导致尚未形成统一的土地利用碳排放核算方法。结合土地利用碳排放所具有的自然和社会双重属性,将土地利用碳排放核算方法归纳为以自然生态系统为主的自下而上(Bottom to Up)方法和以社会经济系统为主的自上而下(Top to Down)方法(表1),对不同核算方法的适用尺度和适用对象及其优缺点进行总结。值得注意的是,自然生态系统与社会经济系统是相互作用的,因此,自下而上与自上而下的土地利用碳排放核算方法之间并无明显界线。

3.2.1 自下而上的土地利用碳排放核算方法

模型模拟法、样地清查法和遥感估算法是用于核算自然生态系统中因土地利用类型转变而引起的碳排放的主要方法。①模型模拟法包括簿记模型和空间模型。其中,簿记模型最早由Houghton^[48]提出,是模拟自然生态系统碳循环的代表模型,多用于估算因土地利用变化而产生的碳排放^[49],但该模型由于忽视了碳循环的反馈机制而导致估算结果偏高^[12]。空间模型主要是通过气候因子构建统计回归模型,模型使用参数少且实现过程简单,简化了土地利用碳排放的影响因素,但估算精度不高,且模拟结果存在较大的不确定性。②样地清查法主要是依据现状地类,测算不同陆地植被或土壤碳密度,进而推算不同阶段因蓄积量变化而产生的碳排放量,目前多用于测算森林生态系统的碳储量^[50]。③遥感估算法是根据有限的碳排放数据,构建其与遥感数据之间的关联模型以估算未来碳排放数量

表1 土地利用碳排放核算方法比较

Table 1 Comparison of land use carbon emission accounting methods					
类型	具体方法	适用尺度	适用对象	优点	缺点
自下而上	模型模拟法	宏观 中观	适用于自然排放源相对简单的情况	强调理论与方法体系的规范性与统一性	需大量样本验证模型的可靠性,数据多为定性资料,很难实现区域尺度碳排放的时空模拟
	样地清查法	微观	适用于单一自然排放源的观测调查	数据精确,计算结果可靠	所需仪器设备较多,需要多点布测,观测成本较高
	遥感估算法	宏观 中观	适用于自然排放源相对复杂的情况	适用范围较广,有利于实现不同区域碳排放的时空差异对比	尚处于起步阶段中,估算结果精度有待进一步提升
自上而下	物料平衡法	宏观 中观	适用于社会经济发展较快,排放源较为复杂的情况	可实现各类排放源的区分;实现方法途径较多;成本消耗低	中间过程较多,容易有误差;方法论尚不统一,未形成标准化的操作流程,不具备权威性
	排放系数法	宏观 中观	适用于社会经济来源稳定的情况	计算方法成熟,数据易获取,应用简单,可操作性强	多以行政区为研究单元,掩盖了区域内的差异
	实测法	微观	适用于小范围内的碳排放测算	计算过程严谨,方法缺陷较小,精度较高	要求采集的样品具有代表性,持续观测时间较长,应用范围较窄
	因素分解法	宏观	适用于减排政策实施后对社会经济发展的影响模拟与评估	应用广泛,可定量分析影响碳排放的各类因素,并解释其关系	尚未考虑碳源本身的排放特征,中微观尺度的数据较难获取,且在估算精度方面有欠缺

的方法^[51]。其中,应用最广泛的两种遥感数据为DMSP-OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据^[52]。起初,较多学者运用DMSP-OLS数据开展碳排放研究^[53,54];而后,考虑到NPP-VIIRS较DMSP-OLS数据具有更高的空间分辨率和更宽的辐射范围^[55],故DMSP-OLS逐渐被NPP-VIIRS所替代,这在一定程度上提高了数据精度,加强了研究结果的可靠性。

3.2.2 自上而下的土地利用碳排放核算方法

物料平衡法、排放系数法、实测法和因素分解法是用于计算土地所承载的社会经济活动而产生的碳排放的主要方法^[56]。①物料平衡法是一种基于质量守恒定律,定量分析在生产过程中因物质材料使用而产生CO₂的科学方法^[57]。②排放系数法是指在常规管理条件和技术经济水平下,以生产单位产品所排放的气体数量的平均值为标准来计算碳排放的系统方法^[58]。IPCC发布的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[59]以及中国发布的《省级温室气体清单编制指南》^[60]均属于排放系数法的具体实践,它们被广泛用于全球^[25]、国家^[61]、省级^[62]等大范围尺度,这是因为排放系数法中的排放因子有缺省值,在应用于小尺度时存在一定误差。③实测法是基于一定的技术和设备支撑,通过测算排放气体的流量、浓度和流速等,进而计算区域CO₂的排放总

量^[63]。考虑到基于实测法测算碳排放的成本相对较高,且应用范围较窄,所以目前通过实测法对碳排放进行核算的案例较为有限。④因素分解法多用于碳减排政策实施后对社会发展影响的碳排放模拟评估,常见的有IPAT(Human Impact, Population, Affluence and Technology)公式^[64]、STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)模型^[65]、Kaya等式^[66]和LMDI(Logarithmic Mean Divisia Index)分解法^[67]等,该方法在当前“双碳”战略背景下的研究中应用广泛。

3.3 低碳目标导向的土地利用结构优化

土地利用结构优化在一定程度上可以改变碳源/碳汇格局,从而引导区域社会经济的低碳转型与可持续发展^[68]。在对碳源/碳汇进行分析的基础上,提出以低碳目标为导向的土地利用结构优化方案是当前研究热点之一^[30]。总结现有研究,主要从宏观调控和微观优化两方面构建低碳目标导向的土地利用结构优化方案(图3)。

3.3.1 宏观土地利用低碳优化

宏观上的土地利用低碳优化主要是在分析土地利用与社会经济、能源消费等驱动机制的相互关系的基础上,优化土地利用结构以增加碳汇、减少碳源。现有研究多通过结合多学科、多技术的研究

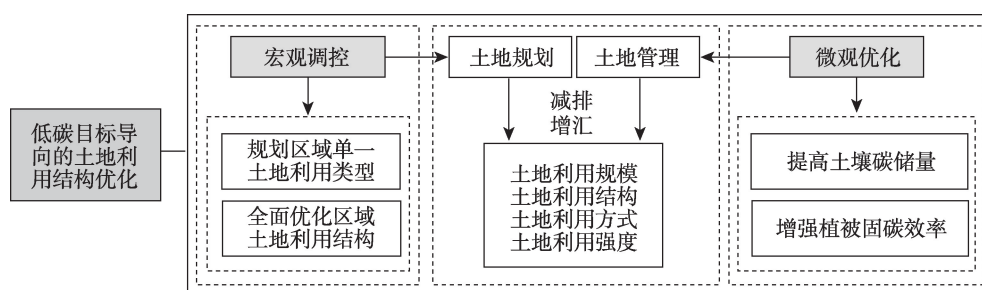


图3 低碳目标导向的土地利用结构优化研究脉络

Figure 3 Research framework of low-carbon target-oriented optimization of land use structure

手段探讨土地利用低碳优化的实现路径,具体可概括为两方面:①通过对区域单一土地利用结构的优化以减少碳源或增加碳汇,如:通过约束城市扩张,以实现建设用地碳减排^[69];或通过加强对林地、农地、草地和湿地等生态用地的管理,进一步增加碳汇。②通过对全域土地利用结构的优化同步实现碳减排和碳增汇^[30],如 Zhang 等^[70]通过在综合元胞自动机模型中嵌入低碳管理策略,通过自上而下的碳减排策略调整未来城市用地需求,同时通过自下而上的土地固碳保护策略约束土地利用转换,以实现城市的低碳发展。这不仅实现了对建设用地碳排放的限制,而且有效地保护了林地、农地和草地等生态用地,为增加碳汇用地提供了保障。

3.3.2 微观土地利用低碳优化

微观上的土地利用低碳优化主要是通过对不同的用地类型采取科学合理的管理措施,以提高碳储量与固碳效率,同时削减碳排放。针对农田生态系统,已有研究主要是通过农田灌溉方式、耕作方式以及施肥方案的优化来提高土壤碳储量、降低农业生产碳排放。结果表明,相较于长期淹灌,间歇灌溉可有效减少作物生长过程中的碳排放^[71,72];旋耕和翻耕有利于改善土壤物理结构,秸秆全量还田条件下进行适当的翻耕有助于维持高产并实现稻田减排^[73];植物残体以及禽畜粪便等有机肥的施用有利于土壤固碳^[74]。针对森林生态系统,可通过树种选择、轮伐期确定、施肥方案制定等管理措施的调整以提高植被碳储量,减少林业管理产生的碳排放^[9]。有学者发现不同植被类型的固碳效率不一样,其中原始林植被层的固碳效率大于天然次生林^[75];也有学者发现高强度疏伐会使森林生态系统

由碳汇转变成碳源,因此可通过合理的森林管理策略实现森林生态系统的碳汇功能最大化^[41];此外,不同管理措施之间的交互作用也会影响树种的固碳效率,有研究发现高强度施肥与适中植被采伐力度的交互作用极大地提升了毛竹林的土壤固碳效率^[76]。

3.4 低碳目标导向的土地利用模式与政策探究

低碳目标导向的土地利用结构优化的实现,需要辅以配套的土地利用模式与政策^[77]。其中,以赵荣钦等^[16]为代表提出的区域系统碳循环的土地调控政策框架得到了学术界的广泛认可,他们从低碳土地利用技术、规划、模式和政策4个方面构建区域系统碳循环的土地利用调控政策框架。结合已有的研究基础,本文从低碳土地利用模式与政策两方面总结当前低碳目标导向的土地利用调控手段(图4)。

3.4.1 低碳土地利用模式探索

通过调整土地利用结构、规模、方式和布局,可形成低碳土地利用模式^[16]。已有研究主要包括土地节约集约利用模式、土地循环利用模式、低碳生态园区模式和紧凑型城市模式等^[77]。①低碳土地节约集约利用模式主要是通过减少单位面积的能源投入,同时提高各要素的单位面积利用效率,以实现土地节约集约利用的低碳化^[78]。具体而言,可控制建设用地供应源头,实现建设用地减量化;此外,也可合理提高建筑密度、建筑容积率,从而提高土地利用效率。②低碳土地循环利用模式首先要求通过探索土地开发技术,降低土地闲置率,提高土地利用效率;其次要求通过建立区域土地利用与开发活动(土地开发、整理与复垦等)全生命周期的碳排放评估体系,从而推动土地利用低碳化与循环利用^[16]。③

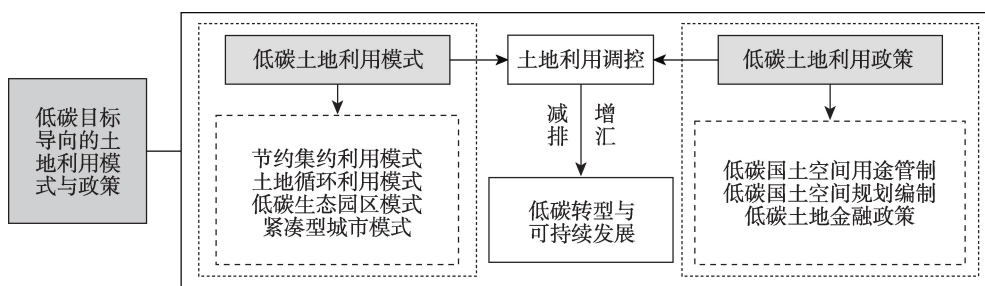


图4 低碳目标导向的土地利用模式与政策研究脉络

Figure 4 Research framework of low-carbon target-oriented land use pattern and policy

低碳生态园区模式主要是通过形成产业集群,促进土地集约和资源循环利用^[79]。具体可通过企业资源共享,减少土地浪费;也可通过园区资源高效利用,提升能源利用效率并降低碳排放强度。④紧凑型城市模式的形成主要是通过居住空间的组团布局,以减少居民通勤交通距离,进而降低交通碳排放^[80];通过合理安排基础设施,避免城市无序蔓延,以减少建设过程中因能源消耗而产生的碳排放^[81]。

3.4.2 低碳土地利用政策探索

从低碳国土空间用途管制、低碳国土空间规划以及低碳土地金融政策3方面总结低碳目标导向的土地利用政策^[77]。其中,低碳国土空间用途管制主要是通过限制传统高碳排的产业项目用地,适当增加土地出让金或资源税等措施提高准入门槛,以此调控对高碳项目的用地需求;同时,对低碳产业项目用地则提供相对优惠的供地政策,引导资本向低碳产业倾斜,促进区域产业结构的低碳转型^[82]。低碳国土空间规划则是基于对碳循环与国土空间要素的关系认知^[13],以低碳目标为理念,以碳排放核算为支撑,以碳约束为管控,综合考虑人口、经济、社会、生态等因素,整体谋划国土空间开发保护格局。低碳土地金融政策是尝试在土地信贷、土地融资等方面对低碳项目(如低碳社区建设、清洁能源开发等)用地予以特别支持,通过低碳信贷、碳基金、碳税等措施拓宽其融资渠道,从而促进土地的低碳利用^[83]。

4 趋势展望

4.1 从土地利用的全生命周期视角出发,构建低碳优化研究的系统框架

基于对现有研究的梳理总结,可发现目前对土

地利用碳排放及低碳优化研究的“系统过程”的关注较为欠缺。进一步讲,现今缺乏从土地利用的全生命周期视角分析土地利用碳排放及低碳优化^[77]。当前亟需将不同土地利用类型碳排放的调查监测与核算体系、不同时空尺度的土地利用碳排放效应分析、不同情景的土地利用碳过程模拟以及低碳目标导向的自然资源管理等研究进行系统整合。因此,未来应从土地利用的全生命周期视角出发,构建土地利用低碳优化研究的系统框架。

具体而言,可通过构建土地利用低碳优化的“影响分析→调查监测→情景模拟→优化调控→管控设计→决策干预”研究框架,实现从土地利用变化到自然资源管理的研究闭环(图5)。首先,基于

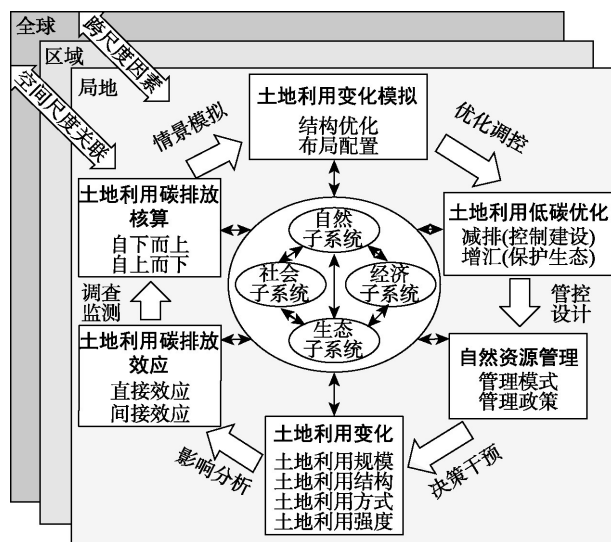


图5 全生命周期视角下的土地利用低碳优化研究系统框架

Figure 5 A systematic framework of low-carbon land use optimization from the perspective of full life cycle

土地利用变化对碳排放的影响,分析土地利用碳排放的直接效应与间接效应^[30]。然后,采用精细化的核算技术对不同阶段土地利用碳排放进行调查监测,并从结构优化和布局配置两方面开展不同情景的土地利用变化模拟,因势利导实现低碳目标下的土地利用优化调控,促进减排增汇。最后,从管理模式和管理政策双视角设计自然资源管理的有效方案,进而通过决策干预影响土地利用的规模、结构、方式和强度。整个研究闭环通过自然生态系统与社会经济系统的子系统交互作用实现。此外,未来研究应在全生命周期理念下,进一步明晰土地利用碳排放及低碳优化在全球、区域和局地尺度的关联规则。因为不论是全球、区域或局地尺度上的研究都在一定程度上掩盖了不同气候条件、生产方式、土地利用强度以及地块之间的碳排放差异。与此同时,从单一尺度到多尺度的跨尺度因素的作用机制存在异质性^[84]。因此,对土地利用碳排放的研究尺度不仅仅要关注全球、区域或局地的空间尺度关联机制,也要考虑跨尺度因素的作用机制。

4.2 基于全域全要素管控,设计低碳国土空间规划的实现路径

国土空间规划是引导土地利用、区域开发、城乡建设和生态保护的基础性、约束性规划,是开展国土空间资源保护利用修复的蓝图^[85]。在生态文明建设背景下,开展低碳国土空间规划对推动社会经济的低碳转型与可持续发展具有重要意义。当前,受制于碳循环过程与空间要素的脱节,鲜有涵盖全域全要素的系统性低碳规划,而低碳国土空间规划具有对象多样化和要素多元化的发展趋势^[86],因此,未来应基于对国土空间全域全要素的管控,设计低碳国土空间规划的实现路径。

低碳国土空间规划的实现应通过对全域山水林田湖草城的整体谋划,结合划定的三区三线以平衡碳源/碳汇规模;在此基础上细化区域用地类型,优化碳源/碳汇结构,进而调控碳源/碳汇单元强度,实现低碳排高碳汇的统筹布局。具体而言:首先,应坚持“山水林田湖草城”生命共同体理念,整体谋划全域国土空间,促进国土空间开发利用方式与低碳目标的协同,尽可能使发展效益最大化、碳排放

量最小化。其次,构建“三区划分→地类管控→地块布局→单元设计”的全要素规划框架^[13]。通过划定的“三区三线”,调控城镇、农业和生态空间总量(建设用地总量、耕地保有量和生态保护面积)和边界(城镇开发边界、永久基本农田和生态保护红线),以此约束城镇空间的碳源规模并巩固生态与农业空间的碳汇规模^[86]。在此基础上,对城镇、农业和生态空间的用地类型进一步细化,结合对地类用途的管控,调整建设用地、农业用地和生态用地结构,以此提高低碳排放的碳源用地、高碳吸收的碳汇用地的比例。而后,基于地块所处位置塑造功能协同的空间格局与物质能量流通的网络体系,主要包括从建设用地低碳排和农林用地高碳汇的视角优化碳源/碳汇空间格局,从完善低碳化交通网络、布局基础设施通道和构筑生态碳汇廊道等方面协调碳源/碳汇的空间组织关系。最后,通过设计空间要素与低碳化生产生活的协同模式,从微观尺度调控空间单元的碳源/碳汇强度。

4.3 统筹“规模-结构-布局-强度”,优化碳排放约束下的建设用地空间格局

建设用地是碳排放的主要来源地,但建设用地本身并不直接参与碳排放过程,主要是其承载的人类活动产生碳排放^[86]。土地利用低碳优化的实现仅通过单一地控制建设用地扩张难以达到预期目标,对建设用地内部结构(如住宅用地、工业用地、交通用地、公共用地等)及其所承载的产业、能源、交通和市政等活动的调控也尤为重要。因此,未来应统筹建设用地的规模、结构、布局与强度,进一步优化碳排放约束下的建设用地空间格局。

具体而言,可从底线管控、结构引导、紧凑布局和强度调控4方面促进建设用地碳减排。①在底线管控方面,以“双碳”目标为契机,评估建设用地扩张的碳源效应,计算基于碳承载力的建设用地规模。通过划定城镇开发边界约束开发建设行为,严格控制建设用地总量与开发强度^[85]。②在结构引导方面,加强区域建设的组团布局,并在此基础上进一步完善路网体系,实现建设用地的有序拓展与组团之间的交通联系。③在紧凑布局方面,通过将住宅用地优先布局在公共交通廊道与节点周边、将产

2022年8月

业空间与人才公寓和消费空间合理混用等,实现复合化、集约化的空间利用。④在强度调控方面,可充分利用地上地下空间,引导适宜的产业和交通网络、文化娱乐场所等功能性设施向地下转移。此外,也可从产业、能源、交通、市政等方面入手,探索建设用地内部结构所承载的社会经济活动的碳减排优化策略。①对产业而言,可尝试借鉴先进地区经验,促进工业发展方式改革,调整区域内高、低碳排产业用地配置,优化产业结构。通过改造传统工业园区、利用零散产业用地、盘活闲置低效用地,提高工业土地利用效率,促进经济发展与工业碳排放脱钩。②对能源而言,一方面,应控制高碳排能源项目用地、保障清洁能源基础设施用地的预留,推动能源结构低碳化;另一方面,应优化清洁能源基础设施与工业用地的邻近分布,减少能源物流消耗。③对交通而言,可通过构建城市综合交通枢纽,实现客运、货运与公共交通等方式的便捷转换;同时,倡导步行和自行车等环境友好的绿色出行方式,减少交通碳排放。④对市政而言,需结合居住空间格局,合理安排教育、医疗、文化、体育等公共设施用地规模,探索构建低效排放的公共设施布局体系,实现公共设施均等化,促进碳减排。

4.4 以基于自然的解决方案为原则,制定差别化的生态系统碳汇提升方案

中国陆地生态系统具有巨大的碳汇能力^[87],巩固和提升其碳汇功能是实现“双碳”目标的重要途径之一,是落实国家“双碳”战略的迫切需要。从不同区域的资源环境禀赋和经济发展状况来看,各地碳汇水平存在着较大的差异^[88]。同时,森林、草地、湿地、农田、河流、湖泊等不同生态类型碳汇水平也存在较大的差异^[89]。“双碳”行动作为一个涉及政治、经济、社会发展和生态建设的巨大生态系统工程^[90],需要从区域整体的碳环境稳定性和协调发展角度出发,制定科学合理的差别化的碳汇提升方案。基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, Nbs)的核心理念是尊重自然规律,通过自然方式,利用自然过程,因地制宜地对生态系统进行保护、恢复和可持续利用^[91]。因此,未来可以Nbs为原则,结合不同区域特征,提出针对不同生态类型的碳汇提升

方案。

具体而言,以对生态系统碳汇的评估为着手点,探究以Nbs为原则的人为活动对自然生态系统碳汇的影响机制,结合不同区域资源环境禀赋与经济发展状况,提出不同生态类型的碳汇提升方案。首先,借助大数据分析、卫星遥感、人工智能等技术手段,科学评估森林、草地、湿地、农田、河流、湖泊等具有碳汇属性的自然资源的碳汇能力,摸清生态系统碳汇“家底”。然后,在此基础上,从植被固碳效率、土壤分解速率等方面揭示植树造林、生态修复和环境治理等人为活动在城市化地区、农产品主产区和生态功能区等地对自然生态系统碳汇的影响机制和叠加效应。最后,提出以Nbs为原则的差异化碳汇提升方案。此外,针对生态脆弱区和生态退化区,应坚持“山水林田湖草城”生命共同体理念^[92],以Nbs为原则,积极开展以低碳目标为导向的国土空间生态修复试点,评估试点区的生态修复碳效应,构建统一管理的“一张图”实施监督信息系统,实时反馈生态修复的碳效应变化特征,并进行动态调整优化,促进生态系统碳汇功能的提升。

4.5 耦合多元要素,探索土地利用低碳优化的多学科交叉应用

土地科学具有与自然科学和社会科学交叉的特点,同时也是兼具管理学、经济学、地理学、生态学和环境科学等相关学科特色的综合学科,这为开展土地利用低碳优化提供了不同的研究视角,也为今后进一步探索土地利用低碳优化与资源利用、生态过程、经济调控等方向的交叉应用提供了多重思路^[93]。

具体而言,可将土地利用碳排放与水资源、能源消费等多元要素进行耦合:土地资源开发活动引起的碳排放与水资源开发以及能源开发引起的碳排放共同构成了“社会-经济-环境”系统下的碳排放体系。通过构建“社会-经济-环境”系统下的“水-土-能-碳”研究体系并对其加以调控,可为保障区域粮食安全、能源安全以及经济社会的公平持续发展和生态系统的自我修复提供基础,为实现“水-土-能-碳”的高效利用和社会生产优化的目标提供助力^[93]。另一方面,也可从微观视角将土地利

用碳排放与食物消费碳足迹结合,通过对食物的生产、加工、运输、消费、处理过程中的碳足迹进行追踪,构建食物消费碳足迹与土地利用碳排放之间的关联分析,估算其对资源环境的影响,为土地利用低碳优化调控提供参考^[94]。此外,也可将土地利用碳排放与碳补偿研究结合,在对碳补偿内涵界定和本质辨析的基础上,从碳补偿主体和客体的识别、碳补偿原则和碳补偿标准以及碳补偿方案的效益评价视角出发^[95],分析政府碳补偿、个人碳补偿、土地利用碳补偿以及区域横向碳补偿的模式差异^[96],基于碳排放核算结果提出差别化的碳补偿政策建议,为在全球气候变化背景下实现区域公平与协调发展提供参考。

5 结语

本文尝试基于“理论-方法-实践”范式,梳理土地利用碳排放及低碳优化的研究脉络,并从土地利用碳排放效应、土地利用碳排放核算方法、低碳目标导向的土地利用结构优化及其模式和政策4方面总结现有研究进展;基于梳理的研究脉络与总结的研究进展,展望未来土地利用低碳优化的研究趋势。本文认为未来土地利用低碳优化研究应围绕“从全生命周期视角出发构建土地利用低碳优化研究的系统框架、基于全域全要素管控设计低碳国土空间规划的实现路径、统筹‘规模-结构-布局-强度’以优化碳排放约束下的建设用地空间格局、以Nbs为原则制定差别化的生态系统碳汇提升方案和耦合多元要素以探索土地利用低碳优化的多学科交叉应用”等方面展开。

本文对已有的土地利用碳排放及低碳优化研究进行了梳理,明确了当前研究脉络与研究进展,并对未来研究趋势进行展望,有助于研究者对土地利用碳排放效应、土地利用碳排放核算方法及土地利用低碳优化的研究形成初步认识。然而,土地利用碳排放及其低碳优化不只局限于自然生态系统的碳循环过程,也关联着社会经济系统的区域碳循环,相关的研究不仅仅涉及管理学、经济学、地理学、生态学和环境科学等,也涵盖了社会学和可持续研究等内容。因此,在未来的研究中,有必要运用各学科专业知识,深入了解土地利用低碳优化的

内外调控机制,寻找更契合土地利用低碳优化的交叉应用途径,从而为“双碳”目标的实现提供助力。

参考文献(References):

- [1] Lade S J, Steffen W, Vries W D, et al. Human impacts on planetary boundaries amplified by earth system interactions[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(2): 119–128.
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockstrom J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 2015, DOI: 10.1126/science.1259855.
- [3] Daniel A L, Dilip R A, 朱希敏. 温室气体排放对全球变暖的相对贡献[J]. *地球科学进展*, 1991, (3): 72–77. [Daniel A L, Dilip R A, Zhu X M. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Advances in Earth Science*, 1991, (3): 72–77.]
- [4] Werksman J. The United Nations framework convention on climate change: The first conference of the parties opening in Berlin[J]. *Global Environmental Change*, 1994, 4(4): 339–340.
- [5] Feroz E H, Raab R L, Ulleberg G T, et al. Global warming and environmental production efficiency ranking of the Kyoto Protocol nations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1178–1183.
- [6] Boykoff M, Pearman O. Now or never: How media coverage of the IPCC special report on 1.5 °C shaped climate-action deadlines? [J]. *One Earth*, 2019, 1(3): 285–288.
- [7] 赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1123–1136. [Zhao R Q, Huang X J, Yun W J, et al. Key issues in natural resource management under carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1123–1136.]
- [8] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378–390.
- [9] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5898–5907. [Ma X Z, Wang Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5898–5907.]
- [10] Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(4): 481–492.
- [11] Friedlingsten P, Houghton R A, Marland G, et al. Update on CO₂ emissions[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(12): 811–812.
- [12] Quéré C L, Andrew R M, Walker A P, et al. Global carbon budget 2018[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(4): 2141–2194.

2022年8月

- [13] 鲍海君, 张瑶瑶, 吴绍华. 低碳国土空间规划: 机理、方法与路径[J]. 中国土地科学, 2022, 36(6): 1–10. [Bao H J, Zhang Y Y, Wu S H. Low-carbon territorial space planning: Mechanism, approach and path[J]. China Land Science, 2022, 36(6): 1–10.]
- [14] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1152–1161. [Han J, Zhou X, Xiang W N. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1152–1161.]
- [15] 赵荣钦, 陈志刚, 黄贤金, 等. 南京大学土地利用碳排放研究进展[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1473–1480. [Zhao R Q, Chen Z G, Huang X J, et al. Research progresses of land use carbon emission in Nanjing University[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1473–1480.]
- [16] 赵荣钦, 黄贤金, 刘英, 等. 区域系统碳循环的土地调控机理及政策框架研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 51–56. [Zhao R Q, Huang X J, Liu Y, et al. Mechanism and policy framework for land regulation of carbon cycle of regional system[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(5): 51–56.]
- [17] 韩炜, 蔡建明, 赵一夫. 多元主体视角下大城市边缘区空间治理结构、机制及路径研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(10): 1730–1745. [Han W, Cai J M, Zhao Y F. Structure, mechanism, and paths of spatial governance in metropolitan fringe with the participation of multi-subjects[J]. Progress in Geography, 2021, 40(10): 1730–1745.]
- [18] Zhang R S, Matsushima K, Kobayashi K. Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? A case of Changzhou[J]. Land Use Policy, 2018, 74: 32–40.
- [19] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 胡焕庸线两侧城镇建设用地的变化及其碳排放差异[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1262–1273. [Zhang M, Huang X J, Chuai X W, et al. Urban construction lands and their carbon emission differences east and west of the Hu Huanyong Line[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1262–1273.]
- [20] Lourenco I B, Guimares L F, Alves M B, et al. Land as a sustainable resource in city planning: The use of open spaces and drainage systems to structure environmental and urban needs[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123096.
- [21] Fryer J, Williams I D. Regional carbon stock assessment and the potential effects of land cover change[J]. Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145815.
- [22] Shan W, Jin X, Yang X, et al. A framework for assessing carbon effect of land consolidation with life cycle assessment: A case study in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110557.
- [23] 张华明, 元鹏飞, 朱治双. 黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 59–69. [Zhang H M, Yuan P F, Zhu Z S. Decoupling effects of carbon emissions and reduction path in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 59–69.]
- [24] Tang X J, Woodcock C E, Olofsson P, et al. Spatiotemporal assessment of land use/land cover change and associated carbon emissions and uptake in the Mekong River Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112336.
- [25] Tian S Q, Wang S J, Bai X Y, et al. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992–2015[J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2021, DOI: 10.1016/j.ese.2021.100108.
- [26] Zhu E Y, Deng J S, Zhou M M, et al. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 930–939.
- [27] Ke Y H, Xia L L, Huang Y S, et al. The carbon emissions related to the land-use changes from 2000 to 2015 in Shenzhen, China: Implication for exploring low-carbon development in megacities[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115660.
- [28] Wang G Z, Han Q, Vries D B. The multi-objective spatial optimization of urban land use based on low-carbon city planning[J]. Ecological Indicators, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107540.
- [29] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, et al. Urbanization, land use change, and carbon emissions: Quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102701.
- [30] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220–229. [Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 220–229.]
- [31] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [32] 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[J]. Anthropocene, 2015, 12: 29–41.
- [33] Liu X P, Wang S J, Wu P J, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(12): 6834–6844.
- [34] Feng Y J, Chen S R, Tong X H, et al. Modeling changes in China's 2000–2030 carbon stock caused by land use change[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119659.
- [35] Zhang X X, Brandt M, Tong X W, et al. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China[J]. Na-

- ture Sustainability, 2022, 5(4): 321–328.
- [36] 王伟, 邹伟, 张国彪, 等. “双碳”目标下的城市群国土空间规划路径与治理机制[J]. 环境保护, 2022, 50(Z1): 64–69. [Wang W, Zou W, Zhang G B, et al. Urban agglomerations territory spatial planning path and governance mechanism under the “Dual Carbon” goals[J]. Environmental Protection, 2022, 50(Z1): 64–69.]
- [37] Tang L P, Ke X L, Zhou T, et al. Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110515.
- [38] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002. [Li K R. Land Use Change and Net Greenhouse Gas Emissions and Terrestrial Ecosystem Carbon Cycling[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.]
- [39] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3878–3887. [Zhang Y L, Fei S M, Li Z Y, et al. Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3878–3887.]
- [40] Jiang H, Apps M J, Peng C H, et al. Modelling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1): 65–82.
- [41] Li S Y, Li S G, Huang M. Effects of thinning intensity on carbon stocks and changes in Larch forests in China northeast forest region[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(5): 538–544.
- [42] Bae J, Ryu Y. High soil organic carbon stocks under impervious surfaces contributed by urban deep cultural layers[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103953.
- [43] Zhang L, Yang L, Zohner C M, et al. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world’s cities[J]. Science Advances, 2022, DOI: 10.1126/sciadv.abo0095.
- [44] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, et al. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1–8.
- [45] Yu Q Y, Li M, Li Q, et al. Economic agglomeration and emissions reduction: Does high agglomeration in China’s urban clusters lead to higher carbon intensity?[J]. Urban Climate, 2022, DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101174.
- [46] Liu K, Xue M Y, Peng M J, et al. Impact of spatial structure of urban agglomeration on carbon emissions: An analysis of the Shandong Peninsula, China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120313.
- [47] 张腾飞, 杨俊, 盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 47–57. [Zhang T F, Yang J, Sheng P F. The impacts and channels of urbanization on carbon dioxide emissions in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(2): 47–57.]
- [48] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different?[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 500–509.
- [49] Baumann M, Gasparri N I, Piquer-Rodríguez M, et al. Carbon emissions from agricultural expansion and intensification in the Chaco[J]. Global Change Biology, 2016, 23(5): 1902–1916.
- [50] Xiao Y, An K, Yang Y, et al. Forest carbon storage trends along altitudinal gradients in Beijing, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 148–156.
- [51] Elvdge C D, Baugh K E, Dietz J B, et al. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(1): 77–88.
- [52] Lv Q, Liu H B, Wang J T, et al. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO₂ emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets[J]. Science of the Total Environment, 2019, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134394.
- [53] Vadrevu K P, Kant Y, Gupta P K, et al. Biomass burning and related trace gas emissions from tropical dry deciduous forests of India: A study using DMSP-OLS data and ground-based measurements [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(14): 2837–2851.
- [54] Shi K F, Chen Y, Yu B L, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016, 168: 523–533.
- [55] Zhang X W, Wu J S, Peng J, et al. The uncertainty of nighttime night data in estimating carbon dioxide emissions in China: A comparison between DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J]. Remote Sensing, 2017, DOI: 10.3390/rs9080797.
- [56] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248–258. [Liu M D, Meng J J, Liu B H. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248–258.]
- [57] Li Z, Sun Z Y, Chen Y B, et al. The net GHG emissions of the China Three Gorges Reservoir: I. Pre-impoundment GHG inventories and carbon balance[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120635.
- [58] 王霞, 张丽君, 秦耀辰, 等. 中国高碳制造业碳排放时空演变及其驱动因素[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 323–333. [Wang X, Zhang L J, Qin Y C, et al. Spatiotemporal changes of carbon emissions in high-carbon manufacturing industry in China and driving factors[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 323–333.]
- [59] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Bracknell: IPCC, 2006.
- [60] 国家发展改革委. 省级温室气体清单编制指南[R/OL]. (2011–

2022年8月

- 05) [2022-03-22]. http://www.360doc.com/document/22/0506/16/79374256_1030046376.shtml. [National Development and Reform Commission. Guidelines for Compiling Provincial Greenhouse Gas Inventories[R/OL]. (2011-05) [2022-03-22]. http://www.360doc.com/document/22/0506/16/79374256_1030046376.shtml.]
- [61] Wang S J, Gao S, Huang Y Y, et al. Spatiotemporal evolution of urban carbon emission performance in China and prediction of future trends[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(5): 757-774.
- [62] Wu H Y, Sipilainen T, He Y, et al. Performance of cropland low-carbon use in China: Measurement, spatiotemporal characteristics, and driving factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149552.
- [63] 郝千婷, 黄明祥, 包刚. 碳排放核算方法概述与比较研究[J]. *中国环境管理*, 2011(4): 51-55. [Hao Q T, Huang M X, Bao G. Study on carbon emission calculation methods overview and its comparison[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2011, (4): 51-55.]
- [64] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 2995-3006. [Huang X J, Zhang X Y, Lu X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [65] Zhang W J, Xu H Z. Effects of land urbanization and land finance on carbon emissions: A panel data analysis for Chinese provinces [J]. *Land Use Policy*, 2017, 63: 493-500.
- [66] Wu Y Z, Shen J H, Zhang X L, et al. The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: A Chinese study based on the U-Kaya method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 589-603.
- [67] Zhao R Q, Liu Y, Tian M M, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus[J]. *Land Use Policy*, 2018, 72: 480-492.
- [68] 曾永年, 王慧敏. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 2010-2017. [Zeng Y N, Wang H M. Optimization of land use structure for low-carbon targets in Haidong City, Qinghai Plateau[J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 2010-2017.]
- [69] Liu X P, Ou J P, Chen Y M, et al. Scenario simulation of urban energy-related CO₂ emissions by coupling the socioeconomic factors and spatial structures[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1163-1178.
- [70] Zhang Y, Liu Y F, Wang Y H, et al. Urban expansion simulation towards low-carbon development: A case study of Wuhan, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102455.
- [71] Wei C C, Ren S M, Yang P L, et al. Effects of irrigation methods and salinity on CO₂ emissions from farmland soil during growth and fallow periods[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141639.
- [72] 李寒冰, 金晓斌, 杨绪红, 等. 不同农田管理措施对土壤碳排放强度影响的 Meta 分析[J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1630-1640. [Li H B, Jin X B, Yang X H, et al. Meta-analysis of the effects of different farmland management measures on soil carbon intensity [J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1630-1640.]
- [73] Zou X X, Shi P X, Zhang C J, et al. Rotational strip intercropping of maize and peanuts has multiple benefits for agricultural production in the northern agropastoral ecotone region of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, DOI: 10.1016/j.eja.2021.126304.
- [74] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 278-286. [Qu X J, Wu J G, Li J M, et al. Effect of exogenous organic carbon on soil organic carbon and particulate organic carbon in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 278-286.]
- [75] 刘顺, 罗达, 刘千里, 等. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1074-1083. [Liu S, Luo D, Liu Q L, et al. Carbon and nitrogen storage and distribution in different forest ecosystems in the subalpine of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1074-1083.]
- [76] Chong L, Shi Y J, Zhou G M, et al. Effects of different management approaches on soil carbon dynamics in Moso bamboo forest ecosystems[J]. *Catena*, 2018, 169: 59-68.
- [77] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(12): 83-92. [Zhao R Q, Huang X J, Chuai X W. Misunderstandings and future trends of researches on land use carbon emissions in China[J]. *China Land Sciences*, 2016, 30(12): 83-92.]
- [78] Yin K, Xiao Y. Path selection for low-carbon economic land use pattern in China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 452-456.
- [79] Yu X, Lu B, Wang R. Analysis of low carbon pilot industrial parks in China: Classification and case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 763-769.
- [80] Penazzi S, Accorsi R, Manzini R. Planning low carbon urban-rural ecosystems: An integrated transport land-use model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 96-111.
- [81] Gao S, Zhang H Q. Urban Planning for low-carbon sustainable development[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2020, DOI: 10.1016/j.suscom.2020.100398.
- [82] 周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析[J]. *资源科学*, 2019, 41(3): 546-556. [Zhou D, Zhou F N, Wang X Q. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 546-556.]

- [83] 岳婷, 李梦婷, 陈红, 等. 碳中和研究热点与演进趋势: 基于科学知识图谱[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 701-715. [Yue T, Li M T, Chen H, et al. Carbon neutrality research hotspots and evolution trend: Based on the scientific knowledge map[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 701-715.]
- [84] Li J B, Huang X J, Chuai X W, et al. The impact of land urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta, China: A multiscale perspective[J]. Cities, 2021, DOI: 10.1016/j.cities.2021.103275.
- [85] 陈可欣, 陶韦华, 方晓丽, 等. 国土空间规划中碳中和评估及规划应用路径研究[J]. 规划师, 2022, 38(5): 134-141. [Chen K X, Tao W H, Fang X L, et al. Carbon neutrality assessment and planning application path in territorial spatial planning[J]. Planners, 2022, 38(5): 134-141.]
- [86] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 等. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147. [Ding M L, Yang X N, Zhao R Q, et al. Optimization of territorial space pattern under the goal of carbon neutrality: Theoretical framework and practical strategy[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1137-1147.]
- [87] Wang Y L, Wang X H, Wang K, et al. The size of the land carbon sink in China[J]. Nature, 2022, 603(7901): 7-9.
- [88] 杨静媛, 张明, 多玲花, 等. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J/OL]. 环境科学研究, 2022, DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.05.04. [Yang J Y, Zhang M, Duo L H, et al. Spatial pattern of land use carbon emissions and carbon balance zoning in Jiangxi Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.05.04.]
- [89] Ali G, Pumijumnong N, Cui S. Valuation and validation of carbon sources and sinks through land cover/use change analysis: The case of Bangkok metropolitan area[J]. Land Use Policy, 2018, 70: 471-478.
- [90] 黄贤金, 张安录, 赵荣钦, 等. 碳达峰、碳中和与国土空间规划实现机制[J]. 现代城市研究, 2022, (1): 1-5. [Huang X J, Zhang A L, Zhao R Q, et al. Carbon emission peak, carbon neutrality and territorial spatial planning implementation mechanism[J]. Modern Urban Research, 2022, (1): 1-5.]
- [91] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501. [Yu G R, Zhu J X, X L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 490-501.]
- [92] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 等. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8755-8762. [Peng J, Lv D N, Zhang T, et al. Systematic cognition of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8755-8762.]
- [93] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628. [Zhao R Q, Li Z P, Han Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [94] Acquaye A, Feng K S, Oppon E, et al. Measuring the environmental sustainability performance of global supply chains: A multi-regional input-output analysis for carbon, sulphur oxide and water footprints[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 187: 571-585.
- [95] 张晖, 顾典, 吴霜, 等. 流域生态补偿政策下受偿地区碳减排效应: 以新安江流域为例[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 768-779. [Zhang H, Gu D, Wu S, et al. Effect of emission reduction in the compensated areas under the policy of watershed eco-compensation: A case study of the Xin'an River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 768-779.]
- [96] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961. [Zhou J, Wang Y X, Liu X R, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1955-1961.]

Progress and prospect of research on land use carbon emissions and low-carbon optimization

YI Dan¹, OU Minghao^{1,2,3}, GUO Jie^{1,2,3}, HAN Yi⁴, YI Jialin¹, DING Guanqiao¹, WU Wenjun¹

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. China Resources & Environment and Development Academy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. State and Local Joint Engineering Research Center of Rural Land Resources Utilization and Consolidation, Nanjing 210095, China; 4. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Land, as the natural spatial carrier of terrestrial ecosystems and the socioeconomic carrier of human life and production, plays a role of carbon source or sink under different utilization modes. It is of great significance to carry out the research on land use carbon emissions and formulate a strategy of low-carbon land use optimization to maintain the balance between natural and socioeconomic systems, guide the low-carbon transition and sustainable development of the society and economy, and help achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality. Based on the general research paradigm of “theory-method-practice”, this article reviewed the research frameworks of land use carbon emissions and low-carbon optimization. It systematically reviewed the progress of existing research in four aspects: land use carbon emissions effect, land use carbon emissions accounting methods, low-carbon target-oriented land use structure optimization, and its patterns and policies. Future research trend of low-carbon optimization of land use are forecasted in this article. It is suggested that future research should focus on the establishment of a systematic research framework of low-carbon land use optimization from the perspective of the full life cycle, the design of realization path of low carbon territorial spatial planning based on the control of full territory and total elements, the optimization of spatial pattern of construction land under the carbon emission constraint from the integrated perspective of scale-structure-layout-intensity, the formulation of differentiated enhancement scheme of ecosystem carbon sink with the principle of Nature-based solutions, and the exploration of the multidisciplinary application of low-carbon land use optimization from the perspective of multiple elements coupling. This work may provide a theoretical basis for the compilation of low-carbon target-oriented territorial spatial planning and the formulation of scientific and sound low-carbon management strategies.

Key words: land use carbon emission; low-carbon land use optimization; carbon emission peak; carbon neutrality; research framework; research progress; prospect