

DOI: 10.20103/j.stxb.202402230384

张鹏岩, 杨丹, 刘宇, 张金炳, 刘振岳, 唐振过, 单子溢. 基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展. 生态学报, 2025, 45(5): 2058-2073.

Zhang P Y, Yang D, Liu Y, Zhang J B, Liu Z Y, Tang Z G, Shan Z Y. Carbon source/sink effect of land use change from the perspective of composite ecosystem: progress and review. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2058-2073.

基于复合生态系统视角的土地利用变化碳源/汇效应研究进展

张鹏岩^{1,2}, 杨 丹², 刘 宇^{3,4,*}, 张金炳¹, 刘振岳², 唐振过¹, 单子溢¹

1 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070

2 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

3 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

4 北京大学碳中和研究院, 北京 100871

摘要: 土地利用变化碳源/汇效应具有自然过程与社会经济过程交织、结构复杂、空间差异显著的特点, 可以从景观格局、资源开发、双重属性、空间效应等多种视角切入展开研究。为全面理解土地利用变化的碳效应特征及其对减碳增汇目标的贡献, 通过对多项研究的总结, 提出了基于复合生态系统的土地利用变化碳源/汇效应框架, 并根据该框架的逻辑关系, 系统梳理了典型景观中碳源/汇的响应特征、空间效应、作用机制以及评估方法, 进而探讨了当前研究中存在的问题。经过梳理发现, 研究学者普遍认同建设用地为碳源, 林地、草地、湿地、耕地则既可能是碳源, 也可能是碳汇, 使用的评估方法分为统计模型、遥感模型、通量观测模型和生态系统模型等, 各有优劣和适用条件。未来研究趋向于多元化, 仍需加强对湿地等生态敏感区的碳源/汇、均衡不同气候区和土地利用类型的碳效应、完善各类遥感监测与碳排放监测数据库、综合考虑土地承载的社会经济过程和自然过程导致的碳效应以及在复合生态系统框架下将提升固碳效率纳入基于自然的解决方案等方面的研究。研究丰富了精准评估复合生态系统视角下的土地利用变化碳效应与碳循环研究, 也可以为“碳中和”治理提供决策参考。

关键词: 碳源/汇; 土地利用变化; 复合生态系统; 效应

Carbon source/sink effect of land use change from the perspective of composite ecosystem: progress and review

ZHANG Pengyan^{1,2}, YANG Dan², LIU Yu^{3,4,*}, ZHANG Jinbing¹, LIU Zhenyue², TANG Zhenguo¹, SHAN Ziyi¹

1 School of Urban Economics and Public Administration, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China

2 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4 Institute of Carbon Neutrality, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The carbon source/sink effect of land use change exhibits characteristics of interweaving natural and socio-economic processes, complex structure, and significant spatial differences. This effect can be examined from various perspectives such as landscape pattern, resource exploitation, dual attributes, and spatial effects. In order to comprehensively understand the carbon effect characteristics of land use change and its contribution to carbon reduction and sink enhancement goals, this study proposes a carbon source/sink effect framework of land use change based on composite ecosystem by summarizing multiple studies. Based on the logical relationship of this framework, we systematically organized

基金项目: 国家自然科学基金项目(72125010, 72243011); 北京大学中央高校基本科研业务费; 2022 年中原青年拔尖人才项目

收稿日期: 2024-02-23; **网络出版日期:** 2024-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yu.liu@pku.edu.cn

the response characteristics, spatial effects, action mechanisms and assessment methods of carbon sources/sinks in typical landscapes, and investigated the ongoing challenges in research. The synthesis revealed that scholars generally concur: developed land acts as a carbon source, whereas forest, grassland, wetland, and arable land can function as both carbon sources and sinks. The assessment methods used include statistical models, remote sensing models, flux observation models, and ecosystem models, each with its own advantages and disadvantages and applicable conditions. Future research tends to be diversified and still needs to strengthen research on carbon sources/sinks in ecologically sensitive areas such as wetlands, balance carbon effects in different climate zones and land use types, improve various remote sensing monitoring and carbon emission monitoring databases, comprehensively consider the carbon effects caused by socio-economic and natural processes carried by land, and incorporate improving carbon sequestration efficiency into natural based solutions within the framework of composite ecosystem. This study enriches the research on carbon effects and carbon cycling of land use change from the perspective of precise evaluation of composite ecosystem, and can also provide decision-making references for carbon neutrality management.

Key Words: carbon source/sink; land use change; composite ecosystem; effects

当前,全球变暖已成为人类生存面临的最大挑战。最近的一项研究显示,60%的全球变化与人类直接的土地利用活动有关^[1]。人类活动对大气中二氧化碳(CO₂)浓度的改变速度已经超出了地球档案中的已知速度^[2],对地球生态系统构成了严重威胁。碳源/汇作为地球系统中生物化学循环的重要环节,与实现可持续发展目标相关的全球变化、生物多样性、粮食安全等息息相关^[3]。“人类世”进程中,加速的气候变化和景观改造正在改变地球表面过程,引发一系列的社会和环境问题,加剧改变了全球碳循环,造成生物圈和大气之间碳源/汇失衡,由此导致的碳排放增加已成为全球气候变化的主要驱动力^[4]。

在气候变化的背景下,土地利用是区域碳循环和可持续发展的重要研究课题。土地作为人类赖以生存的重要物质基础,人类对土地的利用通过大面积、高强度的改变地表原有景观格局,改变了生态系统并使其支离破碎,造成生物多样性退化^[5],并伴随着大量的碳交换,对陆地生态系统碳循环过程产生最直接的影响^[6]。全球变暖、森林损失、生态系统退化等全球性问题无不威胁着人类社会的可持续发展^[7],需要将人类与土地系统结合起来,以应对“人类世”中人类所面临的可持续发展挑战。

复合生态系统指的是在特定区域内,以人为主体的社会、经济和自然系统通过协同作用而形成的复合系统^[8]。复合生态系统理论强调系统的整体性、动态相关性以及系统内部的层次性,描述了人类过程与自然过程相互作用和共同进化的复杂现象,为理解和应对人类活动对自然环境和生态系统的影响提供了有力的工具^[9]。因此,本研究在复合生态系统的生命共同体背景下,研究土地利用变化的碳源/汇效应,将碳源/汇纳入人-地关系系统中,揭示碳源/汇与自然过程和人类活动之间相互作用的潜在规律,以期为推动减碳增汇系统性解决方案的提出提供参考。

1 基于复合生态系统的土地利用碳源/汇效应框架

21 世纪以来,全球人口的不断增长和景观格局的改变增加了土地利用的碳排放量,未来人口和收入的增长可能会进一步推动粮食需求的增加,进而阻碍减少土地利用碳排放愿景的实现^[10]。据联合国的人口预测,即使全球人均土地利用碳排放量达到欧洲目前的水平(即每人每年 0.5—1t CO₂ 当量),到 2100 年全球排放量达到每人每年 4.7—12.7 亿 t CO₂ 当量,仍无法与国际气候目标相协调^[5]。

复合生态系统视角下的土地利用碳源/汇研究旨在为人类适应全球变化提供多维视角和决策支撑。人类通过改变生态系统的模式和过程以获取所需的生态系统服务(如食物、水、木材等),同时,自然过程也通过生态退化、自然灾害(如土壤侵蚀、洪涝灾害等)影响人类系统^[11]。人类活动(碳源)压力上升会造成生态系统复原力下降,进而导致全球变化加剧,碳源/汇循环流动与自我调节能力变弱,系统退化的风险增高。因此,在

社会-经济-自然复合生态系统崩溃之前,亟需通过人为调节以降低潜存风险。由于土地生态系统长期处于人类广泛的利用和管理之下^[12],其类型、结构、强度和方式等方面的改变都会引起大气循环与陆地生态系统之间碳源/汇的变化,所以土地利用类型可以作为定量化、空间化表达碳源/汇的最优载体。基于此,本研究提出了基于复合生态系统的土地利用碳源/汇效应框架(图1)。

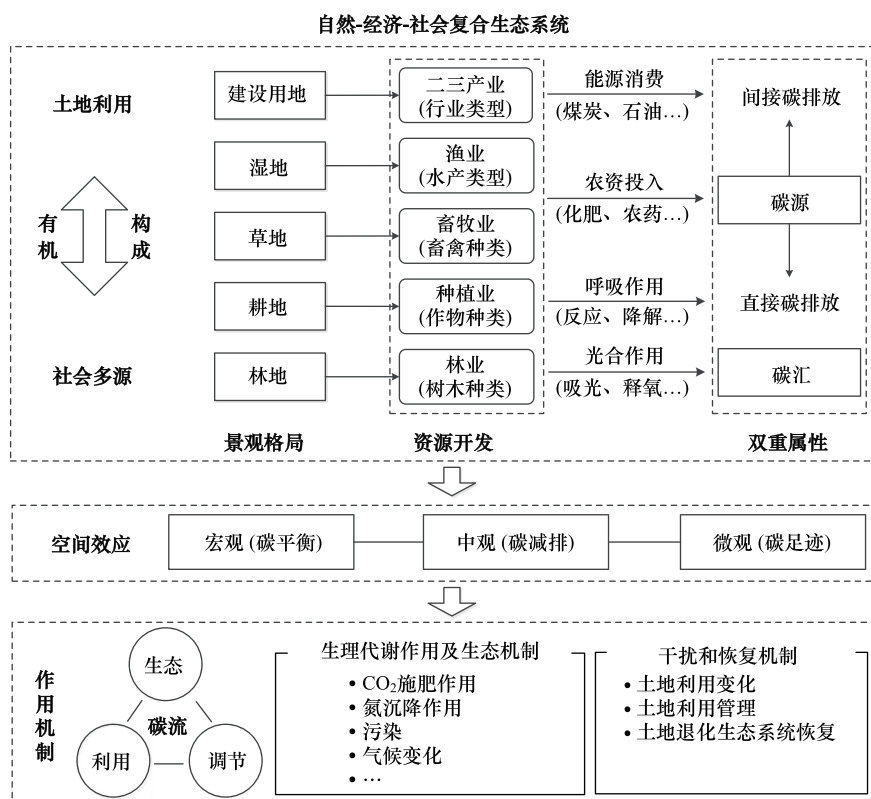


图1 复合生态系统视角下土地利用变化的碳源/汇效应框架

Fig.1 Carbon source/sink effect framework of land use change from a composite ecosystem perspective

2 复合生态系统中土地利用变化对碳源/汇的影响与机制

2.1 土地利用变化对碳源/汇的影响

土地利用变化通过改变生态系统与大气之间的碳交换来影响碳储量的变化^[13-14]。除了对CO₂的影响外,土地利用还可能会增加甲烷(CH₄)的排放^[15]。因此,由人类活动引起的土地利用变化已成为全球陆地碳效应的主要驱动因素,且具有双重属性(既可能是碳源,也可能是碳汇)(图2)。一方面,通过大气的碳储存作用,CO₂浓度下降,陆地生态系统碳汇增加;另一方面,陆地生态系统的碳储存作用减弱使得大气中CO₂浓度增加,导致全球变暖。总的来看,人类活动通过对地表物理性状的改变间接影响区域CO₂浓度的空间分布,其对碳源/汇的影响取决于生态系统类型的变化。

2.1.1 土地利用变化对碳源/汇的影响

土地生态系统长期处于人类广泛的土地利用和管理之下,通过类型、结构、强度和方式等的改变,引起大气循环与陆地生态系统之间碳源/汇的变化^[17-18]。土地利用变化不仅可以大面积、高强度的改变地表原有景观格局,还伴随着大量的碳交换,可对陆地生态系统碳循环过程产生最直接的影响^[19]。本节就建设用地、湿地、草地、耕地、林地景观的碳源/汇分布、规模及变化趋势进行阐述(图3)。

(1) 建设用地

建设用地的规模不断扩大,被广泛认为是实现碳减排和可持续发展的关键^[20]。2020年,全球一半以上

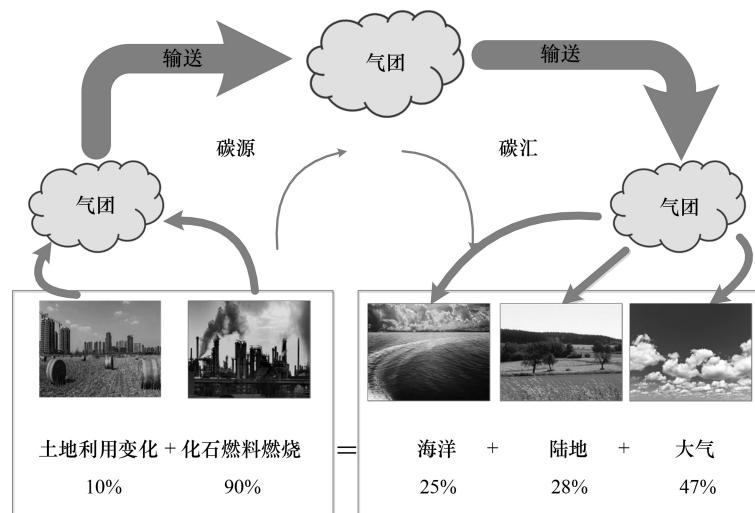


图2 人类活动影响下全球碳源/汇变化示意图(2011—2021年)^[16]

Fig.2 Schematic diagram of global carbon source/sink changes under the influence of human activities (2011—2021)

的人口居住在城市地区,而传统建筑大多由钢铁和水泥建造而成,该过程中由于电力使用以及水泥和钢铁生产等燃料消耗产生了大量人为碳排放^[21]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)和联合国环境规划署(UNEP)的数据,建设用地的能源消耗占总能耗的40%,对碳排放的贡献占全球碳排放的三分之一,而对于亚热带国家而言,其贡献可达到60%^[22]。主要源自城市发展过程中的住宅、工业和交通能耗(图4)。有研究发现,1978年以来,我国与能源相关的碳排放增长了6倍,主要是由经济增长和人口增长所致^[23]。其中,住宅建筑占建设用地碳排放的40%,就我国而言,在2000—2017年间住宅建筑碳排放持续增长,在2017年达到12.80亿t,且随着城市化进程的加快和居民生活水平的提高,其产生的能耗将进一步增加^[24]。工业部门是我国能源消耗和碳排放的主要来源,据统计,工业能耗占总能耗的65.77%,占全国碳排放的68.44%^[25]。受工业流程的复杂性和碳减排成本的限制,工业能耗成为碳减排领域内一项具有挑战性的任务^[26],而提高能源利用效率则成为推动该行业绿色低碳发展的关键。交通运输部门作为全球能源和温室气体排放的最终消费源之一,占世界能源消费总量的29%,其因燃料燃烧产生的碳排放约占全球排放量的24%^[27],也在减缓气候变化方面发挥着重要作用。

当前,已多项研究表明,建设用地的扩张和植被覆盖的减少是导致碳储量下降的主要原因^[28–30],特别是在特大城市和城市群中建设用地扩张较快的地区,碳储量的损失也相对较高^[31]。同时,城市化水平的不同对碳排放产生的效应也不同。例如,Dong等的研究表明城市化水平对发达经济体碳排放存在双门槛效应^[32];也有研究提出建设用地与碳排放之间存在倒“U”型关系^[33]。整体来看,城镇化率、人口增长率、第二产业比重以及能源强度被认为是建设用地碳排放的主要因素^[23,34]。此外,新建建筑行业也是实现碳中和的关键,其占全球碳排放总量的40%以上^[35],尤以商业建筑的贡献最为明显,其中,美国、欧盟、中国的建筑能耗分别占其总能耗的39%、59%和20%—30%^[36]。综上所述,随着社会经济水平的不断提高,建设用地及其扩展衍生的碳源/汇效应将在实现碳减排方面起到重要作用,考虑到我国在减缓全球气候变化方面的重要作用,未来

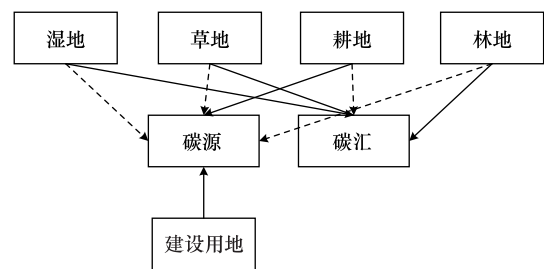


图3 典型景观中碳源/汇的响应框架

Fig.3 Response framework of carbon source/sink in a typical landscape

图中虚线表示弱效应;实线表示强效应

实现碳排放量的大幅减少需进一步加快向低碳能源系统的转型。

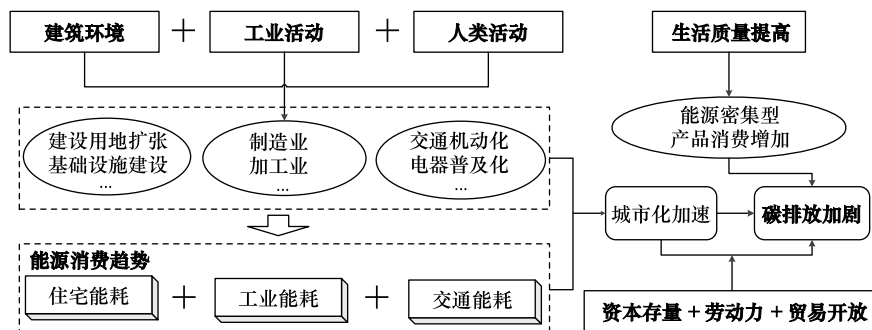


图4 建设用地扩张对碳排放影响的理论框架

Fig.4 Theoretical framework of the impact of built-up land expansion on carbon emissions

(2) 湿地

湿地在调节全球碳循环中发挥着重要作用,是全球碳循环中陆地碳库的重要组成部分,对其碳源/汇的量化已成为全球变化研究的一个重要课题^[37]。湿地仅占全球陆地面积的4%—8%,但其储存了近14%—30%的陆地土壤碳储量,对自然界的碳循环影响重大^[38]。据统计,湿地碳储量近535Pg C,相当于大气总碳的72%,同时也是甲烷(CH₄)的最大天然来源^[39]。目前,关于湿地碳效应的研究仍然存在争议。一方面体现在湿地碳储量估算方面存在诸多不确定性。受人为活动和气候变化的影响(如农田开垦、造林排水等),湿地面积在大幅缩减,这不可避免的会影响碳储量估算结果的准确性^[40]。同时,不同气候带和不同湿地类型的碳储量变化也各不相同,这也是影响湿地碳储量的重要原因^[41]。

然而,尽管湿地在降低全球大气CO₂浓度、减缓全球变暖趋势中发挥着巨大的作用,但由于季节性或长期覆水产生的高储量有机物,也使其成为大气中CH₄的主要自然排放源^[42]。CH₄的温室效应是CO₂的25倍,是对全球变暖贡献第二大的温室气体^[43]。有研究表明,在100年尺度下,CH₄排放分别抵消海草床、盐沼、红树林、非泥炭地和泥炭地生态系统净CO₂吸收的19.4%、14.0%、36.1%、64.9%和60.1%,各类湿地生态系统仍为碳汇^[44]。但大气中CH₄浓度的微小变化都可能对全球气候产生显著影响,因此,在评估湿地生态系统碳汇能力时,CH₄排放的抵消作用仍应予以考虑。不同湿地类型的CH₄排放通量具有差异,陆地各湿地类型的CH₄排放对净生态系统CO₂交换量的抵消比例均大于滨海湿地。这主要是由于海水中大量硫酸根离子的存在,能够有效抑制滨海湿地中的CH₄排放^[45]。并且,滨海湿地生态系统是一个“开放的”生态系统,其自身生态系统通过光合作用吸收的部分碳输出到了周边生态系统(包括海洋生态系统)中并长期固持下来,具有极大的固碳速率以及长期持续的固碳能力^[46]。从单位面积碳埋藏速率估算,滨海湿地系统的碳埋藏速率是陆地生态系统固碳速率的15倍、是海洋生态系统的50倍左右^[47]。也有研究发现,人工湿地作为一种领先技术,是一个完整的生态系统,可最大限度提高资源产量,已在“海绵城市”建设中发挥了关键作用^[48]。因此,基于湿地可为不同利益群体提供各种生态服务的功能,探究其碳源/汇属性对缓解全球气候变化的贡献是必要的。

(3) 草地

草地占地球陆地表面面积的30%,储存了全球近10%—30%的碳^[49]。全球陆地碳汇的年际变化受草原生态系统对温度和降水变化的敏感性影响较大,即使是微小的波动也会对气候产生巨大影响,可见其在应对气候变化、推动全球碳循环变化中发挥着重要作用^[50]。因此,准确剖析草地的碳源/汇属性对于实现区域乃至全球碳中和目标具有重要意义。

目前,关于草地是碳源还是碳汇的结论尚存争议。有研究发现高寒草地的生态系统为弱碳汇,且高寒草甸的固碳能力高于高寒草原。其中,气温和降水的差异是主要的驱动因素^[51],其对草地碳效应的响应存在正反馈、负反馈和无反馈三种结果,且主要受初始气候变化、温度敏感性以及实验过程的影响^[52—54]。例如,青藏

高原高寒生态系统由高寒灌丛和高寒草原组成,Wang 等的研究验证了其是碳储存和生态系统服务的重要储存库^[55]。Gilmanov 等比较了来自 20 个欧洲草原的数据,涵盖了较大的生态系统和气候条件范围,对其碳效应的估算得到了一个较小的区间($-655 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $164 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[56]。相反,Oechel 等的研究则发现草地生态系统每年向大气中至少提供 $40 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的净碳源^[57],这主要是由于天然草地退化严重,草地植被生产力显著下降,生态系统固碳能力严重受损所致^[58]。同时,Zhang 等以内蒙古草原为例,证实了干旱削弱了生态系统的碳汇能力,是诱发其从碳汇向碳源转变的主导因素^[59]。

草地碳属性也受地域差异的影响。具体表现在受人为影响较频繁的地区草地多呈碳源特征,例如我国的干旱半干旱地区^[4],而尚未开发或人为利用强度较弱的地区草地的碳汇特征则较为明显,如分布在欧洲、北美等地的草原^[58]。此外,随着科学技术的广泛普及,草地恢复工程已成为缓解人为碳排放的有效途径之一,可通过改善管理措施来恢复草地土壤的碳损失^[60]。例如,循环放牧、播种豆类、改良牧草品种等方式可有效增加退化草地的有机碳储量^[61-62]。也有研究通过实验证实了保持较高的物种多样性可以有效增加草地土壤碳的积累^[63]。

(4) 耕地

耕地是人类活动最频繁的生态系统,其碳循环主要涉及植物和土壤碳库与外部环境之间的交换以及内部不同成分的迁移和转化^[64]。但由于不同作物与地区碳通量之间存在显著差异,导致其既可以是碳源也可以是碳汇^[65]。这主要取决于耕地土壤有机碳的固定与温室气体释放之间的平衡,且耕地中的土壤有机碳含量占土壤有机碳总量的 10%^[66-67]。因此,关于耕地生态系统碳循环的研究多集中在土壤碳库方面,且空间差异明显^[68]。耕地土壤有机碳的空间分布及其对总碳储量的贡献随纬度的变化而变化,与地上、地下生物量的碳储量差异较大^[69]。世界上大部分有机碳储存在北半球的高纬度地区,尤其是永久冻土和潮湿的北方地区,而印度、萨赫勒地区、中国北部和澳大利亚等地的土壤碳密度较低^[70]。

与林地、草地相比,人们普遍认为耕地生态系统对全球碳循环的影响潜力较小,而 Chen 等的研究发现北半球耕地和森林生态系统的总初级生产力和净生态系统生产力明显高于草原和湿地生态系统,表明耕地生态系统在减缓气候变化方面也具有重要作用^[71],且已有研究证实免耕和秸秆还田可提高土壤有机碳储量^[72]。但同时也受耕作方式的影响,大规模种植和化肥、农药的过度使用将导致大量的碳排放,加速气候变暖^[73]。自 19 世纪开始大规模种植以来,耕地土壤有机碳总体下降了 3%^[74];澳大利亚的耕作导致了 40 多年的碳损失,10cm 表土的总碳损失约为 51%^[75];巴西农业引起的土地利用变化占该国总碳排放量的三分之二以上^[76]。因此,合理的耕作方式能够有效降低耕地碳源“贡献”,进而提高土壤固碳潜力。

(5) 林地

森林作为碳汇的主要组成部分,被认为是抵消化石燃料排放的有效途径^[77]。据统计,森林向耕地的转化是导致每公顷碳储量损失的最大原因,每公顷森林的碳储量是已开垦土地的 20—50 倍,而毁林损失的碳储量为 $100-200 \text{ MgC/hm}^2$ ^[78]。2001—2019 年全球森林的净碳汇为 $(-7.6 \pm 49) \text{ Gt CO}_2 \text{ e a}^{-1}$,反映了总碳清除量 $(-15.6 \pm 49) \text{ Gt CO}_2 \text{ e a}^{-1}$ 和毁林及其他干扰引起的总排放量 $(8.1 \pm 2.5) \text{ Gt CO}_2 \text{ e a}^{-1}$ 之间的平衡^[79]。

多数研究认为大气中 CO_2 含量的增加最初主要是由森林砍伐和其他土地利用变化向大气中释放碳引起的^[80-81],如 Sleeter 等基于多源数据对美国森林、草原、灌木丛的碳储量进行研究,发现其生态系统正以 254 Tg C/a 的速度固碳,同时,受土地利用转移的影响,林地的净碳汇量减少了 35%^[82]。Harris 等通过整合地面和地球观测数据,发现热带森林的净碳吸收量为 $(1.7 \pm 8.0) \text{ Pg C/a}$ ^[79],极有可能是以碳源的形式存在。也有学者持有相反的观点,如 Baccini 等在不考虑草本、非木质植被和土壤碳的前提下,基于地上得失测量得到热带森林是一个净碳源^[83]。因此,关于林地是碳源还是碳汇,不同研究得到的结果不同,一方面在于选取的研究样地条件不同,另一方面在于可能没有考虑到林地面积的变化情况。此外,尽管林地被视为陆地生态系统中强大的碳汇,但极端热浪、干旱和野火频发增加了树木的死亡率,进而有研究发现草原较林地更具有弹性的碳汇潜力^[84]。

在我国的森林碳汇方面,植树造林、退耕还林、天然林保护等生态工程成为陆地生态系统显著增汇的重要推动力^[85]。目前,我国的人工林以幼龄林和中龄林为主,处于森林演替的早期阶段,生态系统碳汇潜力较大^[86]。但增汇效应也会随着林龄增加而降低,以老龄林为主的林地甚至可能表现为碳源。有研究显示,当仅考虑林龄变化时,预计我国 2060 年和 2100 年的森林碳汇相较于 2020 年将下降 56% 和 67%^[87]。因此,要想长期维持人工林较高的碳汇能力,需要通过科学的森林经营管理措施,优化林龄时空布局。

2.1.2 土地利用变化碳源/汇的空间效应

土地利用变化会对陆地碳动态产生深远影响,IPCC 研究得到土地利用变化产生的 CO₂ 仅次于化石燃料燃烧^[88]。然而,由于土地利用的复杂性导致土地碳源/汇规模和变化模式具有不确定性,也使其产生明显的空间差异^[89]。受自然土地向各类半自然和非自然土地利用流转加剧的影响,土地利用变化对碳源/汇影响的不确定性日益增加,土地利用过程(如树木采伐和轮作种植等)、不同数据源以及模型结构的不确定性等很有可能导致土地利用变化碳动态空间效应的加剧^[90]。因此,为了更好地理解土地利用与碳源/汇的关系,需要在不同空间范围内开展更精确的研究。

目前,已有多种尺度的碳源/汇研究,研究对象涉及全球^[91-92]、洲际^[93-94]、国家^[95-96]、区域^[97-98]、省域^[99-100]、市域^[101-102]等等。且近年来研究焦点逐渐打破单一行政区划尺度向流域和基于自然或人工生态系统的微观尺度过渡。人工生态系统通过能源消耗与资源开发改变自然地域的碳源/汇过程,主要涉及不同用地类型的碳源/汇功能和差异,如工业园区^[103-104]、道路交通^[105-106]、建筑设施^[107-108]等,同时,未来几十年全球人口的预期增长和城市化将对住房、商业建筑和基础配套设施等产生巨大需求,更应加强对因用地扩张或城市更新引起的碳源/汇作用关系变化的量化。自然生态系统主要通过自然过程的呼吸与光合作用影响碳源/汇的格局与特征,研究对象多集中于受森林砍伐、水土流失、土地荒漠化等影响较大的不同功能区,如生态敏感区^[109-110]、自然保护区^[111-112]、重大生态建设区^[113-114]等。

综上所述,由于不同尺度的碳源/汇研究缺乏统一的研究视角,且不同学者对于碳源/汇的界定不同,现有研究虽然能够直观量化区域碳平衡情况,但针对质的研究并不多见,较少研究可以直接指导碳源减排与碳汇增加政策的制定和实施,例如流域和景观尺度等超出传统行政区划界限且对于精度要求更高的微观尺度等。因此,如何将研究结果服务于缓解现实问题还有待进一步研究。

2.2 土地利用变化对碳源/汇的作用机制

土地利用变化是影响生态系统碳动力学的重要因素,从正、反两方面影响陆地净碳交换^[115]。一方面,不同土地利用强度对 CO₂ 排放产生直接影响,如造林被认为是吸收大气中 CO₂ 的重要手段,也是缓解全球气候变化的一种经济有效且以自然为基础的解决方案^[116]。有研究结果显示,通过扩大造林规模和实施有效的森林管理战略,可抵消中国境内 14.1% 的人为碳排放,也有研究发现改变生长条件(如停止森林砍伐和降低木材采伐等)较重新造林能更多地抵消森林生物量碳排放^[116-117]。另一方面,土地利用方式的变化,如城市扩张和农牧民活动等引发大面积原生绿地的减少,将直接导致碳损失,并影响区域气候与植被光合作用,进而增加净排放量^[118]。此外,CO₂ 浓度的增加(即 CO₂ 施肥作用)对气候变暖具有重要的负反馈作用。Wang 等发现 1982—2015 年全球大部分植被区 CO₂ 施肥作用下降,其趋势较陆地碳循环模型预测结果高 5—10 倍,意味着陆地生物圈的碳-气候负反馈正在减弱,但该结论仍存争议^[119-120]。

除 CO₂ 外,土地利用变化对土壤 CH₄ 的源/汇特征也存在显著影响,且远超过土壤自然变化的速率和程度,其中农业发展是一个主要因素^[121]。有研究表明,自然林地转变为农业用地会导致土壤氧化 CH₄ 的能力下降 2/3,天然草地转变为旱地和水田也会使土壤对甲烷的吸收明显降低,甚至从吸收汇转变成为释放源,而弃耕或退耕还林则有利于土壤氧化 CH₄ 能力的恢复^[122-123]。土地利用变化主要是通过使土壤结构、土壤性质、微生物菌群和活性等发生变化,从而改变好气土壤对大气 CH₄ 的吸收强度及其源/汇关系^[124]。城市化是另一个关键要素,土地利用变化是城市化过程最直接的后果,相较于自然用地类型,城市用地类型的土壤 CH₄ 氧化能力显著降低,并且城市化水平越高,土壤 CH₄ 氧化能力越低^[125]。

随着研究的深入,土地管理很可能是未来去除 CO_2 (即负排放) 的一个重要机制。Chang 等发现自然土地加速转变为牧场以及牲畜数量的增加等人类直接管理活动将导致草地从碳汇转变为碳源,而基于可持续的管理方式来保持和提高草地土壤碳储量可减少由此产生的温室气体排放量^[4]。耕地是具有固碳能力和潜力的陆地生态系统之一,受耕作方式、土壤性质和气候模式不同的影响,其碳源/汇的影响因素也具有较大差异。Liu 等认为自然因素的变化影响着不同区域的碳平衡,而施肥、灌溉以及农业机械化程度等人为管理措施是影响耕地生态系统碳源/汇变化的主要因素^[126]。同时,地下水位下降和温度升高也将使湿地由大气碳汇转变为碳源^[127]。因此,在监测、量化和变化归因方面的持续改进将有可能显著降低当前土地利用变化对碳收支影响的不确定性。

此外,极端气候事件的频发也引起了相关学者的关注,由于研究侧重点、数据源、期限以及模型条件等的不同,其对碳源/汇的影响往往存在较大的不确定性。有研究认为极端高温天气会导致春季物候提前,可提升陆地生态系统的碳汇功能^[128]。但也有研究证实高温条件下,春季植被生长在提高植被蒸腾作用的同时,将导致夏季植被缺失水分,从而降低碳汇能力^[129]。Sleeter 等的研究还发现由于气候的年际变化影响了植被的碳吸收速率和生态系统呼吸速率导致加州碳源/汇规模的强变异性^[130]。此外,不同地球系统模型在碳源/汇测算方面存在的不确定性,也会导致总初级生产力、净初级生产力、植被和土壤碳储量测算结果的不同^[131]。因此,发展多尺度集成研究,提高模型运行效能在未来研究中显得尤为重要。

3 土地利用变化碳效应的评估方法

土地利用变化的碳源/汇研究既是积极应对气候变化的现实需求,也是生态系统科学研究的任务需要。陆地生态系统可吸收近 30% 的人为碳排放,也有研究证实陆地碳汇占据总碳汇能力的 28%^[16],在减缓气候变化以及全球和区域碳循环研究中发挥着举足轻重的作用^[132]。因此,开展基于土地利用变化的碳源/汇核算研究,不仅是制定减碳增汇政策的科学依据,也是实现可持续发展目标的重要环节^[133]。

在过去几十年里,代表大气层和陆地生物圈之间碳交换的模型包含大量的过程和机制,其复杂性不断增加,模型建模已成为揭示并预测未来碳循环和气候状态的重要工具^[134](表 1)。基于不同数据源和研究手段对土地利用碳源/汇估算的结果存在差异,例如,方精云等基于清查资料和遥感影像数据估算了 1980—2000 年中国森林碳汇为 0.075 Pg C/a,抵消了同期工业碳排放的 20.8%—26.8%^[142]。Wang 等基于 1999—2003 年全国森林清单数据,估算了中国森林碳汇量为 0.21 Pg C/a^[143]。然而,在估计全球土地利用变化或生物群落的碳源/汇大小和分布方面仍具有较大的不确定性,阻碍了对土地利用碳源/汇机制和驱动因素的全面理解以及对土地碳效应未来发展趋势的精准预测。因此,准确估计土地利用的规模和趋势,阐明土地利用碳排放的模式和变化,不仅是实现“碳中和”的必要条件,而且对准确理解碳循环具有重要意义。

4 研究展望

土地是陆地生态系统碳库的主要组成部分,对全球碳平衡有重要贡献。国内外学者在陆地生态系统碳循环方面的研究经验日益充实,但仍需进一步完善。例如,一些研究通过使用清单数据或遥感影像估算了生态系统的碳汇能力,但多侧重于单独评估植被碳或土壤有机碳,或者仅关注一种特定的生态系统(如林地、草地)。虽然一些研究基于多种建模方法探索了不同地区陆地生态系统碳储量,但其不确定性仍然很高,主要是由于数据有效性、收集渠道(或周期)以及估算方法等方面的差异导致。在生态系统变化日趋复杂的背景下,为了精准评估土地碳源/汇效应,降低结果的不确定性,未来土地利用碳源/汇的研究和管理还须加强以下几方面的研究:

(1) 加强对湿地等生态敏感区的碳源/汇研究

现有研究多集中在林地、草地等地类的碳储量方面,而对湿地、荒漠等生态敏感性较强的区域研究较少。在《联合国气候变化框架公约》中,湿地已被纳入农业、林业和其他土地利用(AFOLU)部门的一部分。由于受

土地利用变化、土地资源管理以及气候变化等因素的影响,其碳效应存在较高的不确定性,且衍生的碳源/汇效应在陆地生态系统碳平衡中不容忽视。但就国家层面而言,尚未有关于荒漠、湿地等生态敏感区的观测数据,今后应加强对该类区域的研究力度。

表 1 学者基于不同模型开展的土地利用碳源/汇估算研究

Table 1 Research on land use carbon source/sink estimation by scholars based on different models

模型 Models	核算方法 Methodology	过程 Process	应用 Applications
统计模型 Statistical models	“簿记”模型	主要基于土地利用变化数据与碳密度数据	Baumann 等基于 Landsat 卫星影像重建 1985—2013 年的土地利用变化,并基于“簿记”模型量化了这些变化如何影响碳源/汇 ^[135]
	IPCC 排放因子法	既考虑了土地利用变化引起的直接碳排放,也考虑了土地利用过程中能源消耗产生的间接碳排放。该方法的计算过程较简单,对样本的要求较低	Tian 等使用 IPCC 推荐的排放因子法估算了 1992—2015 年不同阶段全球土地利用碳源/汇的演变趋势 ^[136]
遥感模型 Remote sensing model	CASA 模型	是估算陆地生态系统植被净初级生产力的经典模型	苏胜涛等基于优化的 CASA 模型对中国陆地植被净初级生产力 2000—2019 年进行了监测与分析 ^[137]
通量观测模型 Flux observation model	涡度相关法	是目前可直接测量植被冠层与大气间能量与物质交换通量的重要技术	Kheradmand 等基于涡度相关通量测量技术预测了草地和农用地的 CO ₂ 排放 ^[138]
生态系统模型 Ecosystem model	陆地碳循环模型	多用于对陆地生态系统碳循环的过程与机制的模拟研究	Piao 等基于生态系统农耕碳循环模型探讨了全球陆地碳汇的年度变化机制 ^[139]
	反硝化-分解模型	基于土地利用等数据计算植物、土壤中碳、氮等的排放	Jiang 等基于反硝化-分解模型对采样田中的碳效应进行了估计 ^[140]
	生物量扩展因子法	采用生物量转换因子将二类资源中的蓄积量变成生物量	Xiao 等利用森林清查数据和生物量扩展因子法估算了北京市森林碳储量 ^[141]

表内容仅本研究列举部分模型,不限于此;IPCC:联合国政府间气候变化专门委员会 Intergovernmental panel on climate change;CASA:基于过程的遥感模型 Carnegie ames stanford approach

(2) 均衡不同气候区和土地利用类型的碳效应研究

在不同尺度下监测和分析碳源/汇的时空分布是实现生态环境可持续发展的重要参考。全球超过 20% 的碳排放来自陆地^[144],识别和模拟陆地各系统与气候变化之间的关系变得越来越重要。现有研究中对土地利用变化碳源/汇统计的空间尺度较大,主要集中在全球、洲、国家、省、市等尺度,而忽略了不同气候条件下对不同土地利用类型碳效应的关注,此外,不同气候条件下同种土地利用类型的呼吸作用、光合作用也不同,应引起相应重视。

(3) 完善各类遥感监测与碳排放监测数据库

利用多源数据和优化方法获得大规模碳存储的稳健估计是非常必要的^[145]。随着遥感技术的日趋完善,土地利用数据日趋多元,融合多源化、多尺度化以及多模型化的数据,有助于更加全面地评估土地利用变化碳源/汇,准确衡量其在陆地生态系统碳平衡乃至全球碳收支中的贡献。实际上,实地调查同样可以提供可靠的数据来源,尤其对于微观尺度而言,可以较为真实地反映土地利用变化下的碳源/汇状态。但由于综合野外调查耗时、费力且难以实施,尤其是在偏远地区,使得利用野外调查数据估算土地利用碳源/汇的研究较少。此外,为进一步提升对不同土地碳源/汇调控机制的认识,未来仍需精确计量不同土地类型的碳循环参数。

(4) 综合考虑土地承载的社会经济过程和自然过程导致的碳效应

全面考虑土地承载的生态系统及其对自然过程和人类活动响应的认识,对于精准服务国家减碳目标至关重要。当前,研究的切入点多是单一生态系统(或某一自然过程)的碳通量研究,如林地、草地、耕地等,或者从特定区域内能源消耗的碳排放角度开展研究,而忽略了两种情况均为土地承载的自然过程和经济过程所发生的碳效应。在未来的土地碳效应研究中,应统筹考虑土地承载的社会经济过程和自然过程,不断提升对碳源/汇调控机制的认识,进而降低不同情景下碳源/汇预测的不确定性。

(5) 在复合生态系统框架下将提升固碳效率纳入基于自然的解决方案

尽管陆地生态系统的碳汇占据了地球表面的广大区域,但由于受到各类因素的限制,大部分地区的实际固碳效率并未达到理想状态,因此,有必要探索如何更有效地增加陆地碳汇并提升其固碳能力。复合生态系统提供了一个全新的视角,它强调不同生态系统之间的相互作用与协同,以实现资源的最优配置和生态功能的最大化。在这一框架下,要关注多个生态系统之间的互补与协同作用,从而构建出高效、稳定的碳汇体系。此外,还需进一步探讨如何将提升碳汇功能的措施纳入基于自然的解决方案中。基于自然的解决方案强调利用自然过程和生态系统服务来应对环境挑战,需要深入研究如何将提升碳汇功能与生态保护、恢复和可持续发展相结合,以实现经济效益、社会效益和生态效益的共同提升。

5 结论

土地利用作为陆地生态系统的一部分,究竟是扮演“源”还是“汇”的角色,取决于人类活动方式、利用强度、管理手段以及自然环境变迁等因素。本研究综述了复合生态系统视角下土地利用变化碳源/汇效应的研究进展,提出了土地利用的碳效应框架;梳理了陆地生态系统中典型景观的碳源/汇响应特征、空间效应趋势、作用机制,并总结了土地碳汇对缓解气候变化等全球效应的贡献。在“人-地”矛盾日趋尖锐的背景下,土地利用碳源/汇是一个异常复杂的问题,精准度量不同土地利用类型的碳循环趋势对制定有效的减排策略以及尽早实现区域生态安全与高质量协调发展至关重要。

参考文献 (References):

- [1] Geng T, Jia F, Cai W J, Wu L X, Gan B L, Jing Z, Li S J, McPhaden M J. Increased occurrences of consecutive La Niña events under global warming. *Nature*, 2023, 619(7971): 774-781.
- [2] McCulloch M T, Winter A, Sherman C E, Trotter J A. 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 C. *Nature Climate Change*, 2024, 14(2): 171-177.
- [3] 李新, 马瀚青, 冉有华, 王旭峰, 朱高峰, 刘丰, 何洪林, 张臻, 黄春林. 陆地碳循环模型-数据融合: 前沿与挑战. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(10): 1650-1663.
- [4] Chang J F, Ciais P, Gasser T, Smith P, Herrero M, Havlík P, Obersteiner M, Guenet B, Goll D S, Li W, Naipal V, Peng S S, Qiu C J, Tian H Q, Viovy N, Yue C, Zhu D. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 118.
- [5] Hong C P, Burney J A, Pongratz J, Nabel J E M S, Mueller N D, Jackson R B, Davis S J. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961-2017. *Nature*, 2021, 589(7843): 554-561.
- [6] van Marle M J E, van Wees D, Houghton R A, Field R D, Verbesselt J, van der Werf G R. New land-use-change emissions indicate a declining CO₂ airborne fraction. *Nature*, 2022, 603(7901): 450-454.
- [7] Chu Z, Cheng M W, Yu N N. A smart city is a less polluted city. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 172: 121037.
- [8] Ma X Y, Huang Y S. Construction on industrial ecosystem of marine low carbon city based on composite ecosystem. *Journal of Coastal Research*, 2020, 107(sp1): 61.
- [9] Quintas-Soriano C, Brandt J, Baxter C V, Bennett E M, Requena-Mullor J M, Castro A J. A framework for assessing coupling and de-coupling trajectories in river social-ecological systems. *Sustainability Science*, 2022, 17(1): 121-134.
- [10] Clark M A, Domingo N G G, Colgan K, Thakrar S K, Tilman D, Lynch J, Azevedo I L, Hill J D. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 2020, 370(6517): 705-708.
- [11] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Taylor W W, Alberti M, Deadman P, Redman C, Pell A, Folke C, Ouyang Z Y, Lubchenco J. Coupled human and natural systems: the evolution and applications of an integrated framework; this article belongs to ambio's 50th anniversary collection. theme: anthropocene. *Ambio*, 2021, 50(10): 1778-1783.
- [12] Yue C, Ciais P, Houghton R A, Nassikas A A. Contribution of land use to the interannual variability of the land carbon cycle. *Nature Communications*, 2020, 11: 3170.
- [13] Ou Y F, Bao Z K, Ng S T, Song W Z, Chen K. Land-use carbon emissions and built environment characteristics: A city-level quantitative analysis in emerging economies. *Land Use Policy*, 2024, 137: 107019.

- [14] Ward D S, Mahowald N M, Kloster S. Potential climate forcing of land use and land cover change. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14 (23): 12701-12724.
- [15] Mahowald N M, Randerson J T, Lindsay K, Munoz E, Doney S C, Lawrence P, Schlunegger S, Ward D S, Lawrence D, Hoffman F M. Interactions between land use change and carbon cycle feedbacks. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(1): 96-113.
- [16] Pierre F, Jones Matthew W, Michael O, Andrew Robbie M, Bakker Dorothee C E, Judith H, Corinne L Q, Peters Glen P, Wouter P, Julia P, Stephen S, Canadell Josep G, Philippe C, Jackson Rob B, Alin Simone R, Peter A, Bates Nicholas R, Meike B, Nicolas B, Laurent B, Trang C T T, Frédéric C, Chini Louise P, Margot C, Currie Kim I, Bertrand D, Djeutchouang Laique M, Dou X Y, Wiley E, Feely Richard A, Feng L, Thomas G, Dennis G, Thanos G, Giacomo G, Luke G, Nicolas G, Özgür G, Ian H, Houghton Richard A, Hurtt George C, Yosuke I, Tatiana I, Luijckx Ingrid T, Atul J, Jones Steve D, Etsushi K, Daniel K, Kees K G, Jürgen K, Ivar K J, Arne K, Peter L, Lauvset Siv K, Nathalie L, Sebastian L, Liu J J, Gregg M, McGuire Patrick C, Melton Joe R, Munro David R, Nabel Julia E M S, Ichiro N S, Yosuke N, Tsunee O, Denis P, Benjamin P, Gregor R, Laure R, Eddy R, Christian R, Rosan Thais M, Jörg S, Clemens S, Roland S, Sutton Adrienne J, Colm S, Toste T, Tans Pieter P, Tian H Q, Bronte T, Francesco T, van der Werf Guido R, Nicolas V, Chisato W, Rik W, Watson Andrew J, David W, Wiltshire Andrew J, Yuan W P, Yue C, Yue X, Sönke Z, Zeng J Y. Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4): 1917-2005.
- [17] Houghton R A, Nassikas A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(3): 456-472.
- [18] Quesada B, Armeth A, Robertson E, de Noblet-Ducoudré N. Potential strong contribution of future anthropogenic land-use and land-cover change to the terrestrial carbon cycle. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 064023.
- [19] Williams R G, Katavouta A, Goodwin P. Carbon-cycle feedbacks operating in the climate system. *Current Climate Change Reports*, 2019, 5(4): 282-295.
- [20] Zhang Y J, Bian X J, Tan W P. The linkages of sectoral carbon dioxide emission caused by household consumption in China: evidence from the hypothetical extraction method. *Empirical Economics*, 2018, 54(4): 1743-1775.
- [21] Mishra A, Humpenöder F, Churkina G, Reyer C P O, Beier F, Bodirsky B L, Schellnhuber H J, Lotze-Campen H, Popp A. Land use change and carbon emissions of a transformation to timber cities. *Nature Communications*, 2022, 13: 4889.
- [22] Yim S Y C, Ng S T, Hossain M U, Wong J M W. Comprehensive evaluation of carbon emissions for the development of high-rise residential building. *Buildings*, 2018, 8(11): 147.
- [23] Zheng X Q, Lu Y L, Yuan J J, Baninla Y, Zhang S, Stenseth N C, Hessen D O, Tian H Q, Obersteiner M, Chen D L. Drivers of change in China's energy-related CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(1): 29-36.
- [24] Huo T F, Tang M H, Cai W G, Ren H, Liu B S, Hu X. Provincial total-factor energy efficiency considering floor space under construction: an empirical analysis of China's construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118749.
- [25] 刘俊伶, 夏侯沁蕊, 王克, 邹骥, 孔英. 中国工业部门中长期低碳发展路径研究. *中国软科学*, 2019(11): 31-41, 54.
- [26] Dong F, Wang Y, Zheng L, Li J Y, Xie S X. Can industrial agglomeration promote pollution agglomeration? Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118960.
- [27] Solaymani S. CO₂ emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: the case of transport sector. *Energy*, 2019, 168: 989-1001.
- [28] Feng Y J, Chen S R, Tong X, Lei Z K, Gao C, Wang J F. Modeling changes in China's 2000-2030 carbon stock caused by land use change. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119659.
- [29] Yang H, Huang J L, Liu D F. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: analysis of their concurrent effects on carbon storage. *Applied Geography*, 2020, 115: 102135.
- [30] Zhu E Y, Deng J S, Zhou M M, Gan M Y, Jiang R W, Wang K, Shahtahmassebi A. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 930-939.
- [31] Liu X P, Wang S J, Wu P J, Feng K S, Hubacek K, Li X, Sun L X. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 6834-6844.
- [32] Dong F, Wang Y, Su B, Hua Y F, Zhang Y Q. The process of peak CO₂ emissions in developed economies: a perspective of industrialization and urbanization. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141: 61-75.
- [33] Zhang N, Yu K R, Chen Z F. How does urbanization affect carbon dioxide emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy*, 2017, 107: 678-687.
- [34] Su K, Wei D Z, Lin W X. Influencing factors and spatial patterns of energy-related carbon emissions at the city-scale in Fujian province, Southeastern China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118840.
- [35] Zhou N, Khanna N, Feng W, Ke J, Levine M. Scenarios of energy efficiency and CO₂ emissions reduction potential in the buildings sector in China to year 2050. *Nature Energy*, 2018, 3: 978-984.

- [36] Lu M X, Lai J. Review on carbon emissions of commercial buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119: 109545.
- [37] Lu W Z, Xiao J F, Liu F, Zhang Y, Liu C A, Lin G H. Contrasting ecosystem CO₂ fluxes of inland and coastal wetlands: a meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1180-1198.
- [38] Wang B, Mu C C, Lu H C, Li N, Zhang Y, Ma L. Ecosystem carbon storage and sink/source of temperate forested wetlands in Xiaoxing'anling, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(3): 839-849.
- [39] Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, Zhuang Q L. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1325-1346.
- [40] Temmink R J M, Lamers L P M, Angelini C, Bouma T J, Fritz C, van de Koppel J, Lexmond R, Rietkerk M, Silliman B R, Joosten H, van der Heide T. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots. *Science*, 2022, 376(6593): eabn1479.
- [41] Chu H S, Gottgens J F, Chen J Q, Sun G, Desai A R, Ouyang Z T, Shao C L, Czajkowski K. Climatic variability, hydrologic anomaly, and methane emission can turn productive freshwater marshes into net carbon sources. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1165-1181.
- [42] 湛佳伟, 葛继稳, 冯亮, 周颖, 甘娟, 李永福, 张志麒. 神农架大九湖泥炭湿地甲烷通量特征及其与土壤微生物群落组成的关系. *地球科学*, 2020, 45(3): 1082-1092.
- [43] Li X X, He Y X, Wang X F, Chen H, Liu T T, Que Y Z, Yuan X Z, Wu S N, Zhou T. Watershed urbanization dominated the spatiotemporal pattern of riverine methane emissions: evidence from montane streams that drain different landscapes in Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162343.
- [44] 展鹏飞, 全川. 甲烷排放部分抵消湿地生态系统碳汇功能: 全球数据分析. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 2958-2968.
- [45] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 刘纪化. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241-251.
- [46] 全川, 罗敏, 陈鹭真, 黄佳芳. 滨海蓝碳湿地碳汇速率测定方法及中国的研究现状和挑战. *生态学报*, 2023, 43(17): 6937-6950.
- [47] 于森, 郭雪莲, 栗云召, 张昆, 杜朝红. 黄河口咸淡水交互作用对芦苇湿地土壤有机碳空间分异的影响. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 415-423.
- [48] Cai Y M, Zhao Y Q, Wei T, Fu W, Tang C, Yuan Y J, Yin Q, Wang C. Utilization of constructed wetland technology in China's sponge city scheme under carbon neutral vision. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103828.
- [49] Liang W, Lü Y H, Zhang W B, Li S, Jin Z, Ciais P, Fu B J, Wang S, Yan J W, Li J Y, Su H M. Grassland gross carbon dioxide uptake based on an improved model tree ensemble approach considering human interventions: global estimation and covariation with climate. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2720-2742.
- [50] Abdalla K, Chivenge P, Ciais P, Chaplot V. Long-term (64 years) annual burning lessened soil organic carbon and nitrogen content in a humid subtropical grassland. *Global Change Biology*, 2021, 27(24): 6436-6453.
- [51] Lü F C, Yan X D. The three rivers source region alpine grassland ecosystem was a weak carbon sink based on BEPS model analysis. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4795.
- [52] Ganjurjav H, Gao Q Z, Zhang W N, Liang Y, Li Y W, Cao X J, Wan Y F, Li Y, Danjiu L B. Effects of warming on CO₂ fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132044.
- [53] Phillips C L, Gregg J W, Wilson J K. Reduced diurnal temperature range does not change warming impacts on ecosystem carbon balance of Mediterranean grassland mesocosms. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3263-3273.
- [54] Wang N, Quesada B, Xia L L, Butterbach-Bahl K, Goodale C L, Kiese R. Effects of climate warming on carbon fluxes in grasslands- A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 2019, 25(5): 1839-1851.
- [55] Wang J L, Li W, Cao W X, Atio Abalori T, Liu Y Z, Xin Y Q, Wang S L, Zhang D G. Soil bacterial community responses to short-term grazing exclusion in a degraded alpine shrubland-grassland ecotone. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108043.
- [56] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, Allard V, Ammann C, Balzarolo M, Barcza Z, Bernhofer C, Campbell C L, Cernusca A, Cescatti A, Clifton-Brown J, Dirks B O M, Dore S, Eugster W, Fuhrer J, Gimeno C, Gruenwald T, Haszpra L, Hensen A, Ibrom A, Jacobs A F G, Jones M B, Lanigan G, Laurila T, Lohila A, G Manca, Marcolla B, Nagy Z, Pilegaard K, Pinter K, Pio C, Raschi A, Rogiers N, Sanz M J, Stefani P, Sutton M, Tuba Z, Valentini R, Williams M L, Wohlfahrt G. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(1/2): 93-120.
- [57] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, Zulueta R C, Hinzman L, Kane D. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 2000, 406(6799): 978-981.
- [58] Xu L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: a synthesis. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2806.
- [59] Zhang R, Zhao X Y, Zuo X A, Degen A A, Li Y L, Liu X P, Luo Y Y, Qu H, Lian J, Wang R X. Drought-induced shift from a carbon sink to a carbon source in the grasslands of Inner Mongolia, China. *Catena*, 2020, 195: 104845.

- [60] Tessema B, Sommer R, Piikki K, Söderström M, Namirembe S, Notenbaert A, Tamene L, Nyawira S, Paul B. Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in East African countries: a review. *Grassland Science*, 2020, 66(3): 135-144.
- [61] Abdalla K, Mutema M, Chivenge P, Everson C, Chaplot V. Grassland rehabilitation significantly increases soil carbon stocks by reducing net soil CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 2022, 38(2): 1250-1265.
- [62] Conant R T, Cerri C E P, Osborne B B, Paustian K. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 2017, 27(2): 662-668.
- [63] Fornara D A, Tilman D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *Journal of Ecology*, 2008, 96(2): 314-322.
- [64] Liu Y, Chen M, Chen J. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 1-9.
- [65] Zheng X Q, Yang F, Mamtimin A, Huo X G, Gao J C, Ji C R, Abudukade S, Li C F, Sun Y W, Wang W B, Cui Z N, Wang Y, Ma M J, Huo W, Zhou C L, Yang X H. Farmland carbon and water exchange and its response to environmental factors in arid Northwest China. *Land*, 2023, 12(11): 1988.
- [66] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 王健波, 何文清, 陈保青, 刘恩科. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 240-247.
- [67] Tang H Y, Liu Y, Li X M, Muhammad A, Huang G Q. Carbon sequestration of cropland and paddy soils in China: potential, driving factors, and mechanisms. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019, 9(5): 872-885.
- [68] Wu Z H, Liu Y L, Han Y R, Zhou J N, Liu J M, Wu J G. Mapping farmland soil organic carbon density in Plains with combined cropping system extracted from NDVI time-series data. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142120.
- [69] Zomer R J, Neufeldt H, Xu J C, Ahrends A, Bossio D, Trabucco A, van Noordwijk M, Wang M C. Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: the contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29987.
- [70] Zomer R J, Bossio D A, Sommer R, Verchot L V. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15554.
- [71] 陈智, 于贵瑞, 朱先进, 王秋凤. 北半球陆地生态系统碳交换通量的空间格局及其区域特征. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 710-722.
- [72] 薛彩霞, 李园园, 胡超, 姚顺波. 中国保护性耕作净碳汇的时空格局. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1164-1182.
- [73] Yue K, Peng Y, Peng C H, Yang W Q, Peng X, Wu F Z. Stimulation of terrestrial ecosystem carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19895.
- [74] Mullen R W, Thomason W E, Raun W R. Estimated increase in atmospheric carbon dioxide due to worldwide decrease in soil organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(11/12): 1713-1719.
- [75] Luo Z K, Wang E L, Sun O J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 211-223.
- [76] Cerri C E P, Sparovek G, Bernoux M, Easterling W E, Melillo J M, Cerri C C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, 2007, 64(1): 83-99.
- [77] Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, Poulter B, Armeth 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.
- [78] Manniello C, Cillis G, Statuto D, Di Pasquale A, Picuno P. GIScience and historical cartography for evaluating land use changes and resulting effects on carbon balance. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(3): 179.
- [79] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, Birdsey R A, de Bruin S, Farina M, Fatoyinbo L, Hansen M C, Herold M, Houghton R A, Potapov P V, Suarez D R, Roman-Cuesta R M, Saatchi S S, Slay C M, Turubanova S A, Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 234-240.
- [80] Ciais P, Tan J, Wang X, Roedenbeck C, Chevallier F, Piao S L, Moriarty R, Broquet G, Le Quéré C, Canadell J G, Peng S, Poulter B, Liu Z, Tans P. Five decades of northern land carbon uptake revealed by the interhemispheric CO₂ gradient. *Nature*, 2019, 568: 221-225.
- [81] Pierre F, Michael O, Jones Matthew W, Andrew Robbie M, Judith H, Are O, Peters Glen P, Wouter P, Julia P, Stephen S, Corinne L Q, Canadell Josep G, Philippe C, Jackson Robert B, Simone A, Aragão Luiz E O C, Almut A, Vivek A, Bates Nicholas R, Meike B, Alice B C, Bittig Henry C, Laurent B, Selma B, Naveen C, Frédéric C, Chini Louise P, Wiley E, Liesbeth F, Forster Piers M, Thomas G, Marion G, Dennis G, Thanos G, Luke G, Nicolas G, Ian H, Kerstin H, Vanessa H, Houghton Richard A, Tatiana I, Jain Atul K, Emilie J, Koji K, Etsushi K, Vassilis K, Ivar K J, Peter L, Nathalie L, Andrew L, Sebastian L, Liu Z, Danica L, Gregg M, Nicolas M, Munro David R, Nabel Julia E M S, Ichiro N S, Yosuke N, Kevin O, Tsuneto O, Palmer Paul I, Denis P, Benjamin P, Laure R, Eddy R, Christian R, Jörg S, Roland S, Ingunn S, Smith Adam J P, Sutton Adrienne J, Toste T, Tans Pieter P, Tian H Q, Bronte T, der Werf Guido V, Nicolas V, Walker Anthony P, Rik W, Watson Andrew J, David W, Wiltshire Andrew J, Yuan W P, Yue X, Sönke Z. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.

- [82] Sleeter B M, Liu J X, Daniel C, Rayfield B, Sherba J, Hawbaker T J, Zhu Z L, Selmants P C, Loveland T R. Effects of contemporary land-use and land-cover change on the carbon balance of terrestrial ecosystems in the United States. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 045006.
- [83] Baccini A, Walker W, Carvalho L, Farina M, Sulla-Menashe D, Houghton R A. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*, 2017, 358(6360): 230-234.
- [84] Dass P, Houlton B Z, Wang Y P, Warland D. Grasslands may be more reliable carbon sinks than forests in California. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(7): 074027.
- [85] 解瑞丽, 田丹宇, 刘伯翰, 柴麒麟. 生态系统碳汇特征分析及对我国生态系统碳汇发展的启示. *环境保护*, 2023, 51(3): 30-34.
- [86] Yao Y T, Piao S L, Wang T. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1108-1117.
- [87] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 郭正堂. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(7): 1419-1426.
- [88] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, Broome J, Cramer W, Christ R, Church J A, Clarke L, Dahe Q D, Dasgupta P, Dubash N K, Edenhofer O, Elgizouli I, Field C B, Forster P, Friedlingstein P, Fuglestedt J, Gomez-Echeverri L, Hallegatte S, Hegerl G, Howden M, Jiang K J, Jimenez Cisneros B, Kattsov V, Lee H, Mach K J, Marotzke J, Mastrandrea M D, Meyer L, Minx J, Mulugetta Y, O'Brien K, Oppenheimer M, Pereira J J, Pichs-Madruga R, Plattner G K, Pörtner H O, Power S B, Preston B, Ravindranath N H, Reisinger A, Riahi K, Rusticucci M, Scholes R, Seyboth K, Sokona Y, Stavins R, Stocker T F, Tschakert P, van Vuuren D, van Ypersele J P. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.
- [89] Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, Sitch S, Hauck J, Pongratz J, Pickers P A, Korsbakken J I, Peters G P, Canadell J G, Arnett A, Arora V K, Barbero L, Bastos A, Bopp L, Chevallier F, Chini L P, Ciais P, Doney S C, Gkritzalis T, Goll D S, Harris I, Haverd V, Hoffman F M, Hoppema M, Houghton R A, Hurtt G, Ilyina T, Jain A K, Johannessen T, Jones C D, Kato E, Keeling R F, Goldewijk K K, Landschützer P, Lefèvre N, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S, Neill C, Olsen A, Ono T, Patra P, Peregon A, Peters W, Peylin P, Pfeil B, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rocher M, Rüdénbeck C, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Steinhoff T, Sutton A, Tans P P, Tian H Q, Tilbrook B, Tubiello F N, van der Laan-Luijckx I T, van der Werf G R, Viovy N, Walker A P, Wiltshire A J, Wright R, Zaehle S, Zheng B. Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 2018, 10(4): 2141-2194.
- [90] Bonan G B, Doney S C. Climate, ecosystems, and planetary futures: the challenge to predict life in earth system models. *Science*, 2018, 359(6375): eaam8328.
- [91] 程钰, 孙艺璇, 王鑫静, 尹建中. 全球科技创新对碳生产率的影响与对策研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 30-40.
- [92] 陈良侃, 陈明星, 张晓平, 程嘉梵. 宜居地球、碳中和与全球可持续城市化. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1370-1382.
- [93] Huang P, Wang W M, Chen F J, Cai M G, Ke H W, Liu M, Deng H X, Chen M, Zheng X H, Wang C H. Spatial and temporal trends of anthropogenic carbon storage in typical marginal seas along the Asia continent in the Northern Hemisphere. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153580.
- [94] Helfter C, Gondwe M, Murray-Hudson M, Makati A, Skiba U. From sink to source: high inter-annual variability in the carbon budget of a Southern African wetland. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2022, 380(2215): 20210148.
- [95] Li K, Shen S, Fan J L, Xu M, Zhang X. The role of carbon capture, utilization and storage in realizing China's carbon neutrality: a source-sink matching analysis for existing coal-fired power plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 178: 106070.
- [96] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 陈文宽. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1148-1163.
- [97] Chen J Q, Lian X Y, Su H N, Zhang Z Y, Ma X J, Chang B S. Analysis of China's carbon emission driving factors based on the perspective of eight major economic regions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(7): 8181-8204.
- [98] Luo X, Ao X H, Zhang Z, Wan Q, Liu X J. Spatiotemporal variations of cultivated land use efficiency in the Yangtze River Economic Belt based on carbon emission constraints. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4): 535-552.
- [99] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1214-1232.
- [100] 王桂新, 李刚. 生态省建设的碳减排效应研究. *地理学报*, 2020, 75(11): 2431-2442.
- [101] Zhang K, Lau H C, Liu S Y, Li H Y. Carbon capture and storage in the coastal region of China between Shanghai and Hainan. *Energy*, 2022, 247: 123470.
- [102] 向书江, 张骞, 王丹, 王舒, 王子芳, 谢雨琦, 高明. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1198-1213.
- [103] Feng J C, Yan J Y, Yu Z, Zeng X L, Xu W J. Case study of an industrial park toward zero carbon emission. *Applied Energy*, 2018, 209: 65-78.
- [104] Hassiba R J, Linke P. On the simultaneous integration of heat and carbon dioxide in industrial parks. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 81-94.
- [105] 邵海琴, 王兆峰. 中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4): 32-41.
- [106] Zhou X, Wang H, Huang Z, Bao Y, Zhou G Q, Liu Y. Identifying spatiotemporal characteristics and driving factors for road traffic CO₂ emissions. *Science of the Total Environment*, 2022, 834: 155270.

- [107] Churkina G, Organschi A, Reyer C P O, Ruff A, Vinke K, Liu Z, Reck B K, Graedel T E, Schellnhuber H J. Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 269-276.
- [108] Zhang N, Luo Z X, Liu Y, Feng W, Zhou N, Yang L. Towards low-carbon cities through building-stock-level carbon emission analysis: a calculating and mapping method. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103633.
- [109] Zhu J J, Yan B. Blue carbon sink function and carbon neutrality potential of mangroves. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153438.
- [110] Moustapha M, Deirmendjian L, Sebag D, Braun J J, Audry S, Ateba Bessa H, Adatte T, Causserand C, Adamou I, Ngounou Ngatcha B, Guérin F. Partitioning carbon sources between wetland and well-drained ecosystems to a tropical first-order stream-implications for carbon cycling at the watershed scale (Nyong, Cameroon). *Biogeosciences*, 2022, 19(1): 137-163.
- [111] 陈雪娇, 周伟, 杨晗. 2001-2017年三江源区典型草地群落碳源/汇模拟及动态变化分析. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1583-1592.
- [112] Zhao Z Z, Zhang X F, Dong S K, Wu Y, Liu S L, Su X K, Wang X X, Zhang Y, Tang L. Soil organic carbon and total nitrogen stocks in alpine ecosystems of Altun Mountain National Nature Reserve in dry China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 191(1): 40.
- [113] 文高辉, 胡冉再琪, 唐璇, 唐雅倩, 郑佳欣, 孟晋华. 洞庭湖区耕地利用碳排放与生态效率时空特征. *生态经济*, 2022, 38(7): 132-138.
- [114] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, Zhao X, Feng W, Li Q Q, Xue D X, Dou J, Shi W, Wei W, Zhu G F, Liu C F. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106803.
- [115] 邓祥征, 蒋思坚, 李星, 赵海鹏, 韩贇, 董金玮, 孙志刚, 陈明星. 区域土地利用影响地表 CO₂ 浓度异质性特征的动力学机制. *地理学报*, 2022, 77(4): 936-946.
- [116] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. *Science Bulletin*, 2022, 67(8): 836-843.
- [117] Le Noë J, Erb K H, Matej S, Magerl A, Bhan M, Gingrich S. Altered growth conditions more than reforestation counteracted forest biomass carbon emissions 1990-2020. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6075.
- [118] Li Y, Brando P M, Morton D C, Lawrence D M, Yang H, Randerson J T. Deforestation-induced climate change reduces carbon storage in remaining tropical forests. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1964.
- [119] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, Chen J M, Ciais P, Cescatti A, Sardans J, Janssens I A, Wu M S, Berry J A, Campbell E, Fernández-Martínez M, Alkama R, Sitch S, Friedlingstein P, Smith W K, Yuan W P, He W, Lombardozi D, Kautz M, Zhu D, Lienert S, Kato E, Poulter B, Sanders T G M, Krüger I, Wang R, Zeng N, Tian H Q, Vuichard N, Jain A K, Wiltshire A, Haverd V, Goll D S, Peñuelas J. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2020, 370(6522): 1295-1300.
- [120] Zhu Z C, Zeng H, Myneni R B, Chen C, Zhao Q, Zha J J, Zhan S M, MacLachlan I. Comment on Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2021, 373(6562): eabg5673.
- [121] 黄科瑞, 刘芳, 李自尊, 黎远成. 转变土地利用方式对桂西喀斯特地区土壤氧化 CH₄ 的影响. *地球与环境*, 2018, 46(6): 534-541.
- [122] 王长科, 吕宪国, 蔡祖聪, 罗勇. 土地利用方式对白浆土氧化甲烷的影响. *地理研究*, 2006, 25(2): 335-341.
- [123] Sagar S, Tate K R, Giltrap D L, Singh J. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide and methane in New Zealand terrestrial ecosystems and their mitigation options: a review. *Plant and Soil*, 2008, 309(1): 25-42.
- [124] 刘慧峰, 伍星, 李雅, 李宗善, 刘国华. 土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1960-1968.
- [125] Zhang M Y, Weng S M, Gao H L, Liu L, Li J X, Zhou X Q. Urbanization degree rather than methanotrophic abundance decreases soil CH₄ uptake. *Geoderma*, 2021, 404: 115368.
- [126] Liu X C, Wang S, Zhuang Q L, Jin X X, Bian Z X, Zhou M Y, Meng Z, Han C L, Guo X Y, Jin W J, Zhang Y F. A review on carbon source and sink in arable land ecosystems. *Land*, 2022, 11(4): 580.
- [127] Fortuniak K, Pawlak W, Siedlecki M, Chambers S, Bednorz L. Temperate mire fluctuations from carbon sink to carbon source following changes in water table. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 144071.
- [128] De Boeck H J, Dreesen F E, Janssens I A, Nijs I. Whole-system responses of experimental plant communities to climate extremes imposed in different seasons. *New Phytologist*, 2011, 189(3): 806-817.
- [129] Wolf S, Keenan T F, Fisher J B, Baldocchi D D, Desai A R, Richardson A D, Scott R L, Law B E, Litvak M E, Brunsell N A, Peters W, van der Laan-Luijkx I T. Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 US summer drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(21): 5880-5885.
- [130] Sleeter B M, Marvin D C, Cameron D R, Selman P C, Westerling A L, Kreidler J, Daniel C J, Liu J X, Wilson T S. Effects of 21st-century climate, land use, and disturbances on ecosystem carbon balance in California. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3334-3353.
- [131] Bonan G B, Lombardozi D L, Wieder W R, Oleson K W, Lawrence D M, Hoffman F M, Collier N. Model structure and climate data uncertainty in historical simulations of the terrestrial carbon cycle (1850-2014). *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(10): 1310-1326.
- [132] Luo Y Q, Huang Y Y, Sierra C A, Xia J Y, Ahlström A, Chen Y Z, Hararuk O, Hou E Q, Jiang L F, Liao C J, Lu X J, Shi Z, Smith B, Tao F, Wang

- Y P. Matrix approach to land carbon cycle modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, 14(7): e2022MS003008.
- [133] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [134] 于贵瑞, 张黎, 何洪林, 杨萌. 大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2653-2665.
- [135] Baumann M, Gasparri I, Piquer-Rodríguez M, Gavier Pizarro G, Griffiths P, Hostert P, Kuemmerle T. Carbon emissions from agricultural expansion and intensification in the *Chaco*. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1902-1916.
- [136] Tian S Q, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Li Q, Yang Y J, Hu Z Y, Li C J, Deng Y H. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992-2015. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 7: 100108.
- [137] 苏胜涛, 曾源, 赵旦, 郑朝菊, 吴兴华. 中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析——基于中国生态系统研究网络数据. *生态学报*, 2022, 42(4): 1276-1289.
- [138] Kheradmand S, Heidarzadeh N, Kia S H. Prediction of the CO₂ emission across grassland and cropland using tower-based eddy covariance flux measurements: a machine learning approach. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25: 5495-5509.
- [139] 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.
- [140] Jiang Z D, Yin S, Zhang X X, Li C S, Shen G R, Zhou P, Liu C J. Research and development of a DNDC online model for farmland carbon sequestration and GHG emissions mitigation in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(12): 1493.
- [141] Xiao Y, An K, Yang Y, Xie G D, Lu C X. Forest carbon storage trends along altitudinal gradients in Beijing, China. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(2): 148-156.
- [142] 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, 37(6): 804-812.
- [143] Wang B, Huang J Y, Yang X S, Zhang B, Liu M C. Estimation of biomass, net primary production and net ecosystem production of China's forests based on the 1999-2003 National Forest Inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, 25(6): 544-553.
- [144] Wang X C, Dong X B, Kleme J J, Varbanov P S. Overview of the linkages between land-based sectors and climate change towards carbon emissions neutrality. *Chemical Engineering Transactions*, 2022, 94: 553-558.
- [145] 罗慧丽, 赵荣钦, 梁宗正, 张建伟, 揣小伟, 张慧芳, 李沛诗. 中国省际贸易隐含碳及其城乡流通格局分析. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(4): 83-91.