

面向碳增汇的国土空间格局优化： 理论框架与行动逻辑

王田雨, 岳文泽

(浙江大学公共管理学院, 杭州 310058)

摘要: 国土空间开发利用模式决定了区域陆地生态系统碳收支的动态格局, 建立面向陆地生态系统碳汇能力提升的国土空间开发保护格局, 在全球“碳中和”行动和中国新型城镇化转型背景下, 具有其紧迫性和重要意义。为此, 本文建立了城镇化背景下土地利用碳收支效应的系统性认知框架, 提出城镇化通过土地利用变化影响陆地生态系统碳循环的“直接—间接—潜在”典型性路径。面向陆地生态系统减排增汇目标, 从静态和动态两方面解释了国土空间布局低碳优化的内在逻辑, 并从“数量结构—空间布局—空间用途”三个方面解构了国土空间布局低碳优化的治理维度, 提出支撑国土空间布局低碳化调整的政策工具及其改进思路。通过强化国土空间开发利用低碳化思维、拓展国土空间低碳优化路径, 从而进一步凸显国土空间布局优化与治理在区域“碳中和”目标实现中的积极作用。

关键词: 低碳化土地利用; 国土空间布局优化; 陆地生态系统碳汇; 城镇化

21世纪以来, 全球城镇化及全球经济快速发展的同时, 也加剧了温室气体的排放^[1]。据统计, 21世纪是人类历史上CO₂排放增长幅度最快的时期^[2,3]。为应对这一全球性挑战, 在2015年12月, 巴黎气候大会达成了《巴黎协定》, 设定到2100年将全球气温升幅控制在工业化前水平2℃以内。自此, 尽早实现“碳中和”已成为全球共识性议题。在全球“碳中和”背景下, 中国面临的形势尤为严峻。无论是从实现难度、还是实现周期来看, 都面临比发达国家更为艰巨的挑战。首先, 2020年中国城市化率为63.89%, 距欧美发达国家70%~85%的城市化水平还有较大差距。在未来相当长的一段时间内, 城镇化仍将是中国经济发展的主旋律, 钢铁、水泥、电力等支撑城市建设的重工业生产以及能源消费量还将持续增加^[4,5]。其次, 中国承诺从实现碳达峰到实现碳中和的时间仅为30年左右, 远少于欧美国家45年左右或更长的时间。这意味着, 在未来的10~40年里, 中国不仅要实现经济增长与化石燃料消费脱钩, 降低经济社会碳排放总量, 还必须加强对碳汇问题的关注, 以期最终实现CO₂“零排放”。

陆地生态系统被认为是当前全球最大的“容纳汇”, 保障和挖掘陆地生态系统固碳潜力, 是实现“碳中和”目标的关键性环节^[6-8]。在城镇化进程中, 土地利用变化直接参与陆地生态系统自然碳循环过程, 由于不同土地利用类型/方式的植被和土壤碳密度不同, 其固碳能力也存在明显区别, 因此土地利用变化会导致区域陆地生态系统碳储量的改变, 同时影响陆地生态系统碳汇空间分布格局的长期演变趋势^[9]。已有研究表明, 全球土地利

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2024-02-01

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA064)

作者简介: 王田雨(1995-), 女, 山东诸城人, 博士, 研究方向为国土空间规划。E-mail: penny@zju.edu.cn

通讯作者: 岳文泽(1977-), 男, 安徽凤台人, 博士, 教授, 研究方向为空间规划与治理。

E-mail: wzyue@zju.edu.cn

用/覆盖的剧烈变化对区域碳平衡造成了极大干扰^[10,11]。相反，因地制宜地调整土地利用方式，制定科学的土地利用数量结构调整和空间布局的优化配置方案，对于实现土地利用系统的良性循环，减少陆地生态系统碳排放、提升其固碳能力，仍具有巨大潜力^[12,13]。

自19世纪末以来，以自然生态系统保护为目标，全球逐渐形成了以自然保护区和国家公园为主体的保护地格局。根据IUCN（International Union for Conservation of Nature）世界自然保护地数据库的统计，目前全球已经设立了包括自然保护区、国家公园在内的22万多个自然保护地，其中陆地类型的就超过20万个，覆盖了全球陆地面积的12%。中国已建立各级各类自然保护地1.18万处，占国土陆域面积的18%。实践证明这些措施对区域生态系统起到显著保护效果^[14,15]。然而，当前涉及陆地生态系统保护方面的研究主要集中在生态系统平衡以及生物多样性维护等方面，以碳汇保护为目标导向的空间格局优化理论研究尚处于初步探索阶段，相关研究大多聚焦于森林系统碳汇维护，尚缺乏全局性优化理念^[16,17]。对土地利用变化碳收支效应背后过程机制了解不足，往往导致土地利用低碳化调控政策制定的片面性和不可协调性。因此，迫切需要一个耦合社会—生态系统视角的土地利用碳收支效应的综合性认知框架，以促进更全面、科学的土地利用低碳化政策制定和实施。

此外，以“碳中和”为目标导向的国土空间布局优化方式单一，集中在对土地利用数量结构方面的优化。即每一种土地利用类型被视作一个整体，对应于陆地生态系统碳源/碳汇的平均水平，土地利用低碳优化过程继而被简化为多目标数量结构优化问题^[18,19]。也有少部分研究将空间溢出效应考虑在内，提出区域土地利用高效减排的规划策略^[20]。随着碳汇估算方法在结果准确度和时空精细度方面的不断改进和提升，对陆地生态系统碳汇强度空间异质性的认知逐渐强化，在地块等精细尺度上开展的国土空间布局低碳优化研究仍有待深入^[21]。

2019年《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》提出，“建立全国统一、责权清晰、科学高效的国土空间规划体系，整体谋划新时代国土空间开发保护格局”。即通过构建统一的空间规划体系，谋划全域全要素统筹的国土空间格局并实施统一的用途管制^[22]。这一改革为中国“碳中和”战略的推进提供了契机。在此背景下，亟需加强对土地利用变化碳源/汇效应的科学认知，拓展低碳化国土空间布局优化的研究路径，开展多个维度土地利用减排增汇方案的集成性研究，进一步凸显国土空间格局优化与治理在区域“碳中和”目标实现中的积极作用^[23-26]。

1 城镇化背景下土地利用变化综合碳收支效应的认知框架

在过去城镇化进程中的土地利用过程被认为是人类对于自然界的一种主要干扰行为，也是造成陆地生态系统碳汇损失的主要威胁之一^[11]。为服务于资本的快速累积和经济的迅速发展，人类活动和人工设施在空间上呈现粗放增长式的规模扩张，形成了以建设用地增长为主要驱动的国土空间演变格局。从全球范围来看，1992—2015年间，全球出现了 $38 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的新增城镇建设用')地，其中有大约64%的用地转变发生在农田，而在中国，这一比例则增加至75%。与此同时，对同一数据的分析还表明，尽管城镇扩张导致大量农田损失，但全球范围内农田总量并未减少，反而呈现增长趋势，而新增加的农用地其

主要来源是森林(56%)和灌丛(30%)^[27]。由此可见,城镇化进程中的土地利用变化对陆地生态系统碳汇的影响不仅仅局限于城镇建设用地扩张本身,而需从土地利用关联性视角出发,全面审视土地利用变化所产生的碳源/汇效应。

此外,从时间维度来看,在以生态文明理念为指引的城镇化发展阶段,城镇化进程对区域土地利用方式的影响则更为复杂,不仅涉及城镇化地区土地利用的动态演变,还包含乡村转型发展所带来的土地利用后果。例如,有学者指出中国城镇化进程中的城乡土地要素流动有助于实现“碳中和”,这是因为过去30年间,中国有超过2.9亿农村人口迁移到城市,这种超大规模的人口迁移现象将农村地区大量土地资源释放出来,进而有望为自然生态系统的再生腾挪空间^[28,29]。

综上,城镇化进程中的土地利用变化对陆地生态系统碳循环的影响并非表现为单一的胁迫作用,而是受多条土地利用转移路径的共同影响。为此,本文提炼出土地利用变化影响陆地生态系统碳循环的三种占据主导地位的典型性路径,并以此为框架,建立中国城镇化发展背景下土地利用碳收支效应的系统性认知。

1.1 直接影响路径:城镇建设用地扩张

城镇化发展在土地利用方面的直接表征就是城镇建设用地的快速扩张。从地理学视角看,城镇化进程就是指农村人口不断向城镇转移,以及第二三产业不断向城镇集聚的过程,这一过程必然导致城镇地域空间的扩大。从时空结构上看,直接受到影响的区域主要分布在城镇边缘地带,即位于连片建成区与几乎完全纯农业腹地之间的区域,也是城镇化进程中土地利用变化最大以及最为迅速的地区。据统计,中国新增城镇用地中有60%~80%来自周边耕地。全国县级以上城镇扩展占用耕地的比例为80.2%,这一比例在中小城市为74%左右,在大城市为60%左右^[30,31]。

因此,陆地生态系统碳动态对城镇化的直接响应突出体现在农田生态系统碳库储量的变化,城镇化持续性快速发展将会进一步挤占位于远郊地区的森林、草地等自然生态空间,从而对自然生态系统碳库产生一定程度的影响。城镇建设用地对其他用地类型的占用会导致陆地生态系统碳库在较短时期内经历较大规模的碳损失,且这一过程通常是不可逆转的,表现为地表覆被被钢筋、水泥等不透水面所替代,地表植被大量减少,植被对大气中碳的固化作用大大减弱,植被残体也会释放大量碳素到大气当中;与此同时,土壤理化性质发生变化,对有机碳的固化吸收作用也将有所减弱^[32]。

1.2 间接影响路径:耕地位移

在全球以及中国粮食安全的背景下,城镇化进一步引发了自然生态用地向耕地的转移。大量耕地转换为城镇用地后,人类不得不选择在其他地方开发新的耕地以补偿生产损失,林地、草地、湿地等生态用地成为耕地补充的主要来源,这一土地利用活动在地理空间上的移动过程被称为“耕地位移”(cropland displacement)^[33-35]。由于城镇扩张占用的往往是生产条件优渥、生产能力较高的优质农田,为弥补粮食生产损失,通常需要占用更大面积的自然生态用地来作为农业生产的补充;此外,耕地保护制度强调总量平衡,忽视生态系统整体结构与功能,因此也加剧了区域生态景观结构的改变,造成生态系统服务退化^[28]。据测算,2000—2015年耕地位移导致中国部分地区生境质量严重下降,是城市扩张所导致损失的8倍,包括碳储存在内的多种生态系统服务功能均存在不同程度的损失^[36]。

由此可见,耕地位移这一土地利用转移过程可进一步将城镇建设用地扩张与自然生态系统碳库储量损失联系起来。由于森林等自然生态系统的净生产能力(NEP)以及碳密度都要远大于农田生态系统,因而由林地开垦所造成的陆地生态系统碳损失强度理论上要超出单位面积耕地被建设用地占用所产生的碳排放效应。因此,耕地位移虽是城镇建设用地扩张所导致的间接性后果,但其对陆地生态系统固碳功能的影响不容忽视。

1.3 潜在影响路径:农村建设用地收缩

尽管城镇化的快速发展常伴随着城镇建设用地在空间上的迅速扩张,但与此同时,城镇化也被认为是一种集约化的空间组织方式。众多研究表明,在既定的人口总量条件下,农村人口的人均占地面积要大于城镇人口,因此农村居民向城镇地区迁移,理论上能够释放出更大规模的非建设用地,从而使得耕地面积保持动态平衡,还有可能带来生态用地的增长^[37,38]。然而,在中国过去城镇化进程中,受制于户籍制度以及相关农村土地制度的影响,农村人口的缩减并未带来农村物理形态的收缩,相反,不少地区农村建设用地规模呈“不减反增”的态势。因而长期以来,农村建设用地类型转变对陆地生态系统固碳增汇的实际作用难以显现。

在城乡一体化发展背景下,城乡土地制度改革是必不可少的一环^[39-41]。一方面,在改革基础上,通过及时合理的农村土地整理,将释放的土地转化为耕地,能够有效补充因城镇扩张而损失的耕地资源,进而缓解因耕地位移造成的陆地生态系统碳汇的间接损失;另一方面,针对一些受水土条件等限制不适合复垦为耕地的区域因地制宜实施生态修复工程,例如物种引入、生态廊道建设、生态移民、近自然林业等,有望在短期内释放出大量自然/半自然生态空间,为陆地生态系统碳汇增长贡献巨大潜力。

综上所述,在三种典型的土地利用转移情景下,土地利用变化对陆地生态系统碳循环的影响均可从存量和流量两个方面理解。存量即碳储量,是陆地生态系统多年累积的结果,在上述框架中,陆地生态系统碳储量的损失主要是由城镇化进程中土地利用直接和间接转移路径所导致(城镇建设用地扩张以及耕地位移过程对其他陆地生态系统单元的占用),即在土地利用状态发生转变的某一时刻陆地生态系统的碳排放效应;流量则用来表征碳汇量,指在某一段时间内陆地生态系统的净碳固定量。当直接和间接土地利用转移情景发生时,具备碳汇能力(或更高碳汇能力)的空间流失,从而导致区域未来碳汇潜力损失;相反,当潜在土地利用转移情景发生时(即农村建设用地复垦复林),区域碳汇空间规模增长,未来土地利用碳汇效应得以提升。本文对土地利用碳收支效应的基本认知框架如图1所示。

2 面向碳增汇的国土空间布局优化的理论基础

以陆地生态系统减排增汇为目标导向的国土空间布局优化,既要减少陆地生态系统碳储量损失,又要注重提升其碳汇流量。为此,本文从基于空间分类分区引导的静态布局优化模式和基于空间要素流动的动态布局优化模式出发,明晰中国当前城镇化发展阶段国土空间布局低碳优化和调控的理论基础。

2.1 静态视角:以用途分区为基础的低碳优化逻辑

国土空间用途分区是实现建设控制、生态管控以及自然资源节约高效利用等空间开

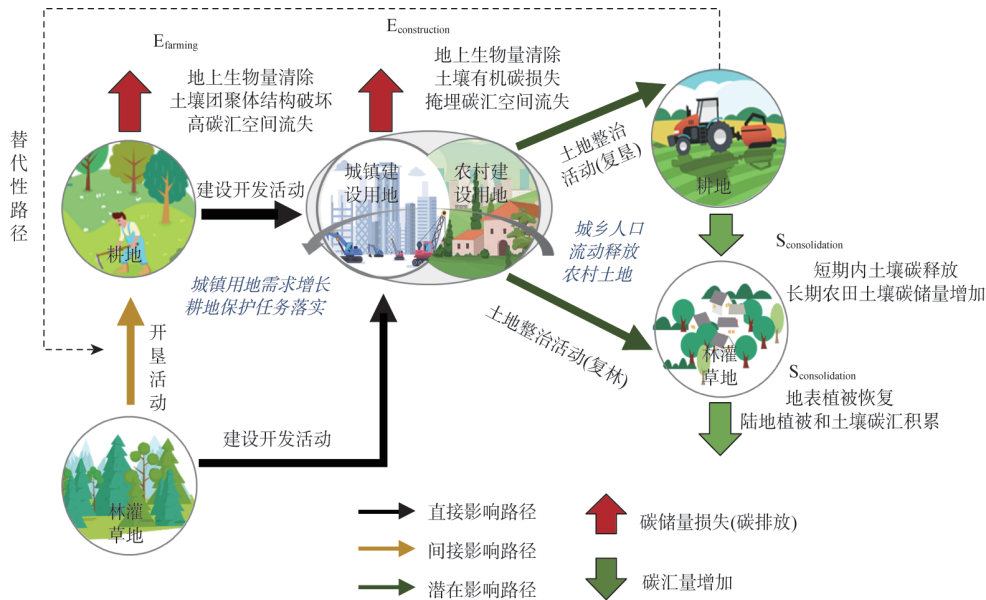


图1 城镇化背景下土地利用碳收支效应的分析框架

Fig. 1 Analysis framework of carbon balance effects of land use in the context of urbanization

发利用目标的国际通行手段^[42]。减少和避免国土空间不当的开发利用行为，避免国土空间利用外部不经济现象的发生，是国土空间用途分区的目的之一。梅多斯等^[43]在《增长的极限》中曾预言，如果不对此空间开发利用趋势加以限制，人类将陷入无法控制的衰退。因此，在一定时期内划分国土空间用途分区，以相对静态的约束性手段，把影响国家安全、粮食安全、生态安全、环境安全、水资源安全等的区域优先保护起来，是协调开发和保护这一永恒矛盾的关键性路径。

尽管国土空间用途分区在理论层面被赋予了地区经济发展、粮食安全、环境可持续等多目标协同发展的使命，但在实践中，国土空间用途分区往往是基于某一时期内国土空间开发与保护的阶段性特征和矛盾的主要方面，着力明确国土空间开发与保护的现实基础和将面临的机遇和挑战，提出的特定时期内国土空间用途分区的目标导向和战略框架。例如，自20世纪50年代以来（第二次世界大战结束后），随着人口增长和经济发展，都市地区不断向外扩张，侵吞了大量优质农地。以美国、日本为代表的国家纷纷采取以控制城市规模、保护农地为核心的国土空间用途分区策略。同样，中国自1978年改革开放以来，工业化和城镇化的快速发展激发了大量建设用地需求，同时伴随耕地资源的大规模流失，严重危及中国的粮食安全，也不利于经济的可持续发展。因此，这一时期国土空间用途分区的核心目标在于严格限制农用地转为建设用地，对耕地实行特殊保护。这一举措遏制了城市建设用地快速蔓延趋势，使全国耕地过快减少的势头得到有效控制，基本农田规模趋于稳定。

然而，长期以来以农地保护为核心的国土空间用途管制分区缺乏对生态空间的系统性保护，存在顾此失彼的现象，导致部分地区在经济发展和耕保任务的压力下，随意挤占生态空间，破坏生态环境^[44]。例如，一些后备耕地资源较为匮乏的地区，常常将一些具有重要生态环境功能的湿地、低丘缓坡土地等开发成耕地，并将其划入永久基本农田

保护区范围,由此导致了更为严峻的植被减少、陆地生态系统碳排放、碳汇空间损失等一系列问题。

因此,低碳导向的国土空间格局优化要求在系统性和整体性方面进一步深化,即并非一味限制开发或追求碳汇空间的增长,以经济发展、粮食安全以及社会福祉与公平等其他方面的损失为代价;而是在保障城镇建设、粮食安全等基础目标之上,进一步着眼于以碳汇能力为主导功能的国土空间,加强对该类空间的识别、保护和管理。尽可能地避免由于城镇建设、耕地开垦等人类活动导致该地区陆地生态系统碳储量的损失,同时施以一定的生态保护与修复手段保障其源源不断的固碳能力。由此逐步形成以多目标统筹协调为核心的国土空间分区管制模式。

2.2 动态视角:以土地置换为基础的低碳优化逻辑

城镇化发展是一个连续的动态过程,伴随着人口、产业等增长要素在空间上流动转移,因而城乡土地优化配置的合理状态也仅是暂时的,随着城镇化不断发展,环境因素发生改变,城乡之间以及城市内部土地优化配置的平衡状态和合理结构就要被打破^[45]。因此,国土空间布局优化和调整是以动态演化的国土空间为基础,通过土地资源的重新配置来协调人与自然之间的矛盾,使土地利用达到暂时的最优状态,并在一定时期内保持相对稳定^[46,47]。以低碳化为目标导向的国土空间格局优化,可从城镇内部功能更新与用地结构优化和城乡之间建设用地置换两个主要的方面加以解释。

2.2.1 城镇土地置换及其碳减排增汇逻辑

城镇化建设和发展需要有一定的土地作为保障。根据预测,到2050年,中国城镇化率将达到75%以上,未来20年间,将有约3.5亿农村剩余劳动力进城成为城镇居民。随之而来的住房、公共服务设施和人居环境条件等一系列需求也会相应增加,这都需要相应的土地供应。在此背景下,为保障陆地自然生态系统固碳能力、提升碳汇增长潜力,城镇空间增长模式需作出根本性转变。即低碳化国土空间格局的构建应反对建设用对农村或自然开垦地的侵蚀,主张在现有的城镇建成区范围内,调整土地利用结构,将未利用地和综合效益差的土地置换出来,重新配置,不断更新和提升城镇内部土地利用功能和土地承载能力。此外,在城市更新过程中,应有意识地采取增加绿地、提高绿化覆盖率、改善城市植被结构等措施,以提升城镇地区固碳能力,并为区域补充更多碳汇来源。

2.2.2 城乡建设用地置换及其碳减排增汇逻辑

城镇建设用地置换是指在城乡建设用地总量不变的前提下寻求城镇建设用地指标,其政策设计的初衷是为了实现国家耕地总量动态平衡的宏观目标,贯彻“占补平衡”的耕地保护政策^[48]。从低碳化视角出发,通过城乡之间的建设用地置换,保证建设用地总量无增加的前提下,通过土地资源在空间上的重新配置。一方面满足城镇扩张的需求,另一方面引导农民按政府主导的村镇规划及统筹安排,向城市和新集镇集聚,从而将长期闲置的农村建设用地释放出来,为实施土地复垦和生态修复腾挪空间。此外,在占补平衡政策“建新小于拆旧”的原则之下,城镇建设和经济发展“结余”用地指标的同时,理论上还能使得耕地总量增加。由此,在完成耕地保护任务的同时,进一步缓解因耕地位移而导致的自然生态用地损失。

3 面向碳增汇的国土空间布局优化的关键路径

国土空间布局优化与调控与一般政府治理过程相比,其独特之处在于其明显的空间治理特征。具体来说,国土空间布局优化和调整是在空间层面上考虑目标实现过程中涉及的主要理论难题和现实矛盾。因此,客观认识空间的基本属性及其演化规律,是从量化视角开展国土空间布局低碳优化实践的基本前提。数量、空间、用途是国土空间的三要素,同时也构成了国土空间布局优化的三个主要维度。数量维表明国土空间开发利用具有规模约束性及权衡性,空间维表明其具有地域性,用途维表明其具有目的性^[49]。因此,本文从上述三个维度出发,提出低碳导向下国土空间布局优化的关键路径,并分别剖析不同维度下国土空间布局低碳优化的行动逻辑。

3.1 数量结构约束

实现低碳化国土空间格局构建的基础路径是将底线型过程控制思维纳入城镇建设用地空间扩张当中,严格控制城镇建设用地外延式扩张规模,本质是通过减缓陆地生态系统面积损失来降低陆地碳排放的绝对规模。从历史的视角看,工业文明时期为服务于资本的快速累积和经济的迅速发展,人类活动和人工设施在空间上呈现粗放式规模扩张态势,在城郊土地低成本的吸引下,开发商大量圈占土地,导致城郊地区农用地的减少和湿地以及林草地的萎缩,而土地开发会导致自然景观消失,地表植被覆盖发生明显改变,陆地碳库中大量碳被释放到大气当中。为此,城镇化进程中土地利用低碳优化的首要原则是要结合城市发展的合理需求,引导及供给协调的双向机制确定增量土地开发利用规模、结构和时序,促使各项建设开发活动尽可能地节省用地,防止建设用地低效无序扩张对自然生态用地的侵占。

3.2 空间布局优化

陆地生态系统碳汇/碳密度空间分布的异质性决定了可通过空间分区管制等手段,提高城镇化进程中国土空间开发利用的碳排放效率。从生态学理论视角来解释,生态环境对某一特定生物群落所提供的生存空间及对其正向演替的作用存在地域差异性,不同地区的生态条件、气候特点和土壤属性共同塑造了独特的生态系统特征,从而影响着该地区的生物多样性、植被类型和生态过程。在这种情况下,生物总是倾向于栖息在最适宜的生境范围内,从而能够使自身保持着最大的生命活力、生产力和稳定性。因此,针对不同地区的生态特点,科学分析陆地生态系统植被碳汇能力的现状和潜力,合理引导城镇扩张空间格局,有序保护以高水平碳汇空间为中心的自然资源。这不仅在短期内有助于减少单位建设用地扩张所引发的陆地生态系统碳排放量,而且从长期来看能够最大程度上发挥区域碳汇增长的潜力,促进生态系统的健康发展。

3.3 空间用途调整

随着城乡土地制度的完善和土地整治工程技术的进步,加强对已开发利用土地实施再开发和再修复以实现土地用途的转变,是促进陆地生态系统碳汇能力提升的又一重要途径。对城镇地区已开发利用土地而言,其空间用途的转变(例如,工业用地向商业、生活用地的转型)能够有效减少城镇化发展对增量土地的需求,进而防止城镇扩张侵蚀农业用地和绿地。对农村地区已开发利用土地而言,通过农村居民点撤并,改善因建设用地闲置和分散布局而导致的生态用地破碎化,拆迁撤并后的空间可复垦为耕地或增植

林地等高碳汇效益的生态用地，即通过土地利用方式转变，实现生态用地占比增加以及成片整合，从而增强农村地区碳储能力。

综上，城镇化背景下国土空间布局低碳优化总体框架如图2所示。

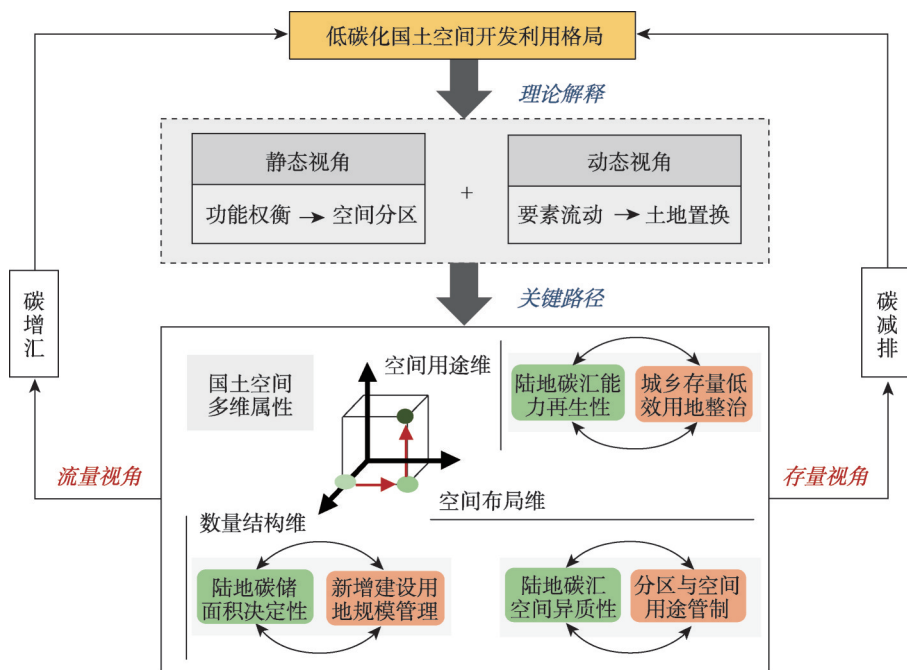


图2 面向低碳城镇化的国土空间布局优化框架

Fig. 2 Optimization framework for territorial spatial layout toward low-carbon urbanization

4 面向碳增汇的国土空间布局政策工具优化

4.1 推进城市蔓延与增长管理的低碳化转向

城市蔓延是城镇化发展在空间上的一种表现形式，其建立在对土地资源不可持续性消耗基础上，是导致陆地生态系统碳损失最为显著的人类干扰因素。国际上针对城市蔓延和增长管理的治理路径包括城市开发边界控制、混合用地措施以及土地税收政策等。其中，城市扩展的边界界定是应对问题的关键策略之一。这一策略通过土地规划、土地权属控制以及其他土地调控管理手段，来明确城市区域与农村区域之间的分界线，并将合法的城市开发权限制在这一界限内，以控制城市空间规模的增长^[50,51]。它是一种严格控制城市蔓延并引导城市合理增长的规划途径，也是低碳化国土空间格局构建的基础性政策工具。

然而，早期国际社会的实践经验显示，城市开发边界并未完全发挥作用，相反，在城镇化进程中，绝大多数城市的发展都突破了这一人为设定的边界。为此，安杰尔^[52]曾在《城市星球》一书中提出过他的观点，即“由城市人口增长引发的城市扩张是不能被遏制的，相反，必须为容纳这些新增人口创造空间”。而到了城镇化逐渐成熟期，随着城市产业结构转型升级，土地利用模式也发生了深刻改变。这一时期，城镇开发边界的作用则应侧重于促进城镇土地利用由粗放式、单一化向集约式、融合性的转变。换句话说，

城市开发边界的界定与管理不仅仅是将城市的发展限制在某一明确的地理范围内,更涉及对城市发展的时间和空间过程的重新谋划,促使城市内部原有土地的功能转型。

在中国特殊国情下,城市增长管理需着重考虑的因素在于城镇存量工业用地。这是因为在中国特有的土地和地方财政体制下,多数城市都面临工业用地比例明显偏高,而住宅用地比例偏低以及住宅价格过高的问题。以浙江省为例,其主要城市工业用地面积占比约为30%左右,远超出国际上5%~10%的工业用地标准。这种不合理的土地供应模式不仅对大量农村外出低收入人群在城市实现举家永久性迁移造成了严重的负面影响,还导致传统工业区功能单一,过多的工厂用地和过少的居住服务用地无法满足生活居住与工作就业的相对平衡。为此,应进一步强化城市开发边界的引领作用,城市开发边界的划定需统筹考虑土地储备规模、空间、形态、结构和时序,以及片区生产—生活—生态功能耦合协调的布局谋划,从而为经济社会持续发展与低碳目标的实现创造有利条件。

4.2 提升国土空间用途管制中碳汇功能优先级

在中国,用途管制制度已广泛应用于土地、森林、水域、草原等自然资源,即采用强制化的手段对自然保护区、湿地公园、森林公园等重要生态空间实施特殊性保护^[44,53]。在新一轮国土空间规划中,明确了以生态保护红线为核心的国土空间管理模式,该模式旨在以“一条红线守住自然生态安全边界”。然而,生态保护红线划定等主要依据水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护等生态功能,生态系统碳汇功能尚未被纳入红线区划分依据。在“碳中和”背景下,生态系统碳汇这一生态系统功能/生态产品的重要性与日俱增,因此有必要将具有高碳汇水平且集中分布的区域纳入生态保护红线范围当中,实施规范性和制度化用途管制策略。

为此,本文提出将维护区域“碳中和”发展目标作为生态保护红线制度的关键性职责之一。这就要求在生态保护红线划定阶段,借助科学的碳汇估算方法和高分辨率空间数据作为支撑,获取区域内陆地生态系统碳汇水平的空间分布情况,进而识别出需纳入生态保护红线范围的高水平碳汇(潜力)区域。提升生态系统碳汇在红线区内用途管控和生态保护修复中的优先级,一方面加大生态系统碳汇监管执法力度。依据区域碳达峰、碳中和目标和生态系统碳汇本底,确定并分解生态系统碳汇空间管控、质量提升等目标任务,明确碳汇能力持续巩固提升的监督考核要求;另一方面加强生态保护修复碳汇成效监管。将生态系统碳汇纳入生态保护红线监管与成效评估当中,以充分发挥生态系统碳汇对生态保护修复的导向作用和倒逼机制,强化区域内生态保护修复固碳能力^[54]。

4.3 挖掘城乡空间统筹规划的碳汇增长潜能

以“全域规划”引导城乡土地利用低碳化转型,建立以土地整治为基础的城镇化发展模式。在未来城镇化发展中土地利用矛盾冲突持续加剧背景下,低碳导向下国土空间规划策略既要满足城镇化进程中的土地需求,又要确保耕地总量不减少、质量不下降,同时还要保障陆地生态系统碳汇水平。这就意味着必须舍弃传统的城镇外延式扩张模式以及城镇—乡村土地利用分离的规划思路,建立起以全域土地循环利用为核心的规划理念、同时辅以土地整治为基础的规划实施手段。

城乡土地循环利用旨在将城市和乡村视为有机整体,按照“人地挂钩”原则统筹规划建设用地布局,实现区域土地利用总量长期动态平衡。然而,过去城乡统一规划机制

缺失导致农村“空心村”现象严重，使得农村建设用地表现为外向性扩散特征^[55]。因此，实现城乡土地循环利用除需农村土地制度和户籍制度改革外，还需“全域规划”引领，盘活闲置宅基地资源，遏制蔓延趋势。具体而言，应准确统计农村人口数量、宅基地整治规模，了解废弃及长期闲置宅基地地理位置及自然条件，划分集中建房区、复垦复种区和生态修复区。遵循先规划后用地原则，解决新增分户人口宅基地需求，同时引导农村土地整治和生态修复工程。

5 结论与讨论

(1) 本文提出了城镇化背景下土地利用变化影响陆地生态系统碳循环的“直接—间接—潜在”三条典型性路径，拓展了土地利用碳收支效应的分析框架。

城镇化是区域土地利用变化的主要源动力，随着城镇化进程的不断推进，土地利用及其所产生的环境效应也愈加复杂化。尤其是与土地利用密切相关的陆地生态系统碳循环研究，已不再是自然或者是人文科学单方面能解决的问题，而是需要从自然和人文视角进行综合性、系统性的研究。为此，本文从城镇化背景出发，耦合人文过程与自然过程，分析土地利用碳收支效应问题。基于土地利用对城镇化时空响应规律的系统性认知，提出城镇化进程并非仅通过城镇建设用地扩张而对陆地生态系统碳汇产生影响，还会引发多种土地利用转移情景，进而给陆地生态系统碳循环带来其他间接或者潜在性干扰。该理论分析框架的构建是对传统土地利用碳排放过程机制及外部驱动理论研究的一次深化和拓展。

(2) 构建了“数量结构—空间布局—空间用途”三位一体的国土空间布局低碳优化模式，丰富了低碳型土地利用的理论内涵和治理维度。

传统土地利用优化研究主要是通过合理的数量安排和空间布局实现土地资源的可持续利用。在以“碳中和”为目标导向的国土空间布局优化方案中，现有研究多从土地利用数量结构优化的视角展开，涉及空间维度的布局优化方案则较少，究其原因，除了受制于陆地碳数据精细度及其分析方法的不足以外，本质是对国土空间低碳优化这一高维、复杂的空间问题缺乏系统性理解，而将其简化为数量规模问题是最为直接的解决思路。本文则试图从多个维度上建构国土空间低碳优化的内在逻辑。首先，陆地生态系统碳汇能力空间分布异质性意味着空间开发利用碳排放效率也会呈现区域差异特征。其次，空间要素的流动转移激励有限国土空间要素在碳约束条件下的动态分配和优化配置。由此，结合国土空间基本属性，提出“三位一体”的低碳优化量化表征框架，丰富了现有国土空间低碳优化方案的理论内涵，并很大程度上弥补了实践应用层面的不足。

(3) 揭示了现有国土空间布局优化政策工具对维护陆地生态系统碳汇方面的不足和缺陷，增加了现有国土空间布局调整政策工具中的低碳化考量。

低碳化国土空间格局的构建需要多种政策工具的共同支撑，本文围绕现有较为成熟的国土空间布局调整的三类政策工具，包括城市蔓延和增长管理、国土空间用途管制和城乡空间统筹规划，提出相应的改进意见。就低碳导向下的城市蔓延与增长管理而言，其优化目标在于对城市发展的时间和空间过程进行重新布局和引导，倒逼城市土地功能转型，从而实现经济社会持续发展与低碳目标的有机权衡；就低碳导向下的国土空间用

途管制而言,需进一步将具有高碳汇水平且集中分布的区域纳入生态保护红线范围当中,实施规范性和制度化用途管制策略;就低碳导向下的城乡空间统筹规划而言,其优化方向在于建立城乡全域规划机制,建立以土地整治为基础的低碳城镇化模式。

(4)在低碳化国土空间布局优化过程当中,进一步将土地利用变化对人为源碳排放的影响考虑在内是未来需要重点突破的方向。

本文着重探索与讨论了城镇化进程中,由建设用地扩张及其引发的系列土地利用转移所带来的陆地生态系统碳循环变化情况。然而,有不少研究已经表明,能源和工业源碳排放大多发生在建设用地上,因而可以认为城镇化和工业化驱动下的建设用地扩张同时伴随着人为源碳排放规模的增长。更进一步,商业用地、居住用地和工业用地等不同功能类型的建设用地其能源消费强度和碳排放强度也多有不同。从这个角度看,城镇地区产业用地配置改变将会直接导致产业结构的调整,从而影响区域土地利用碳排放后果。受篇幅限制,这种影响并未考虑在本文研究之中,因而提出的部分土地利用低碳优化策略的综合减排效果可能会被低估。由此,耦合陆地生态系统与人为源系统,在精细尺度上揭示土地利用布局优化对“碳中和”目标的贡献,也是本文未来继续推进的方向。

参考文献(References):

- [1] SHUAI C Y, CHEN X, WU Y, et al. A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidences from 133 countries. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 524-543.
- [2] MATTHEWS H D, GILLET N P, STOTT P A, et al. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 2009, 459(7248): 829-832.
- [3] MARTÍNEZ-ZARZOSO I, MARUOTTI A. The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries. *Ecological Economics*, 2011, 70(7): 1344-1353.
- [4] 王艳. “双碳”目标下中国碳排放规模情景预测. 济南: 山东财经大学, 2022. [WANG Y. Scenario prediction of China's carbon emissions under the targets of carbon peaking and carbon neutrality. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2022.]
- [5] 王倩倩, 娄媛媛, 张鹏岩, 等. 能源消费背景下河南省碳排放测算及碳达峰预测. 河南大学学报: 自然科学版, 2023, 53(1): 47-59. [WANG Q Q, LOU Y Y, ZHANG P Y, et al. Under the background of energy consumption carbon emission calculation and carbon peak prediction in Henan province. *Journal of Henan University: Natural Science Edition*, 2023, 53(1): 47-59.]
- [6] KEENAN T F, WILLIAMS C A. The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43: 219-243.
- [7] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [8] 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. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501. [YU G R, ZHU J X, XU L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 490-501.]
- [9] 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. [CHEN G S, TIAN H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 189-204.]
- [10] LI J S, GUO X M, CHUAI X W, et al. Reexamine China's terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change. *Land Use Policy*, 2021, 102: 105275, Doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105275.
- [11] ARNETH A, SITCH S, PONGRATZ J, et al. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 79-84.

- [12] 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. 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. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [13] 荀文会. “碳中和”视角下的沈阳市国土空间规划路径. 规划师, 2022, 38(10): 88-92. [XUN W H. Territorial space planning path from the perspective of carbon neutrality, Shenyang. Planner, 2022, 38(10): 88-92.]
- [14] LOVEJOY T E. Protected areas: A prism for a changing world. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(6): 329-333.
- [15] LEWIS E, MACSHARRY B, JUFFE-BIGNOLI D, et al. Dynamics in the global protected-area estate since 2004. Conservation Biology, 2019, 33(3): 570-579.
- [16] HOUGHTON R A, HACKLER J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. Global Change Biology, 1999, 5(4): 481-492.
- [17] LIU S N, ZHOU T, WEI L Y, et al. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(14): 1699-1707.
- [18] 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. 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. China Land Science, 2016, 30(12): 83-92.]
- [19] CHUAI X W, HUANG X J, LAI L, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. Environmental Science & Policy, 2013, 25: 50-61.
- [20] YANG B, CHEN X, WANG Z Q, et al. Analyzing land use structure efficiency with carbon emissions: A case study in the middle reaches of the Yangtze River, China. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123076, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123076.
- [21] WANG K, PIAO S L, HE Y, et al. Spatial variations and mechanisms for the stability of terrestrial carbon sink in China. Science China Earth Sciences, 2023, 66(2): 227-236.
- [22] 岳文泽, 王田雨, 甄延临. “三区三线”为核心的统一国土空间用途管制分区. 中国土地科学, 2020, 34(5): 52-59, 68. [YUE W Z, WANG T Y, ZHEN Y L. Unified zoning of territorial space use control derived from the core concept of "three types of spatial zones and alert-lines". China Land Science, 2020, 34(5): 52-59, 68.]
- [23] 董祚继. 优化国土空间布局, 推动城市低碳发展. 环境经济, 2018, (13): 50-51. [DONG Z J. Optimizing territorial spatial layout to promote urban low-carbon development. Environmental Economy, 2018, (13): 50-51.]
- [24] 李双成. 国土空间规划如何助力碳中和. 当代贵州, 2021, (26): 78. [LI S C. How territorial spatial planning facilitates carbon neutrality. Contemporary Guizhou, 2021, (26): 78.]
- [25] 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. 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. Modern Urban Research, 2022, (1): 1-5.]
- [26] 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. 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. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1137-1147.]
- [27] VAN VLIET J. Direct and indirect loss of natural area from urban expansion. Nature Sustainability, 2019, 2(8): 755-763.
- [28] ZHANG X X, BRANDT M, TONG X W, et al. A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China. Nature Sustainability, 2022, 5(4): 321-328.
- [29] WANG S T, BAI X M, ZHANG X L, et al. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. Nature Food, 2021, 2(3): 183-191.
- [30] 田光进, 周全斌, 赵晓丽, 等. 中国城镇扩展占用耕地的遥感动态监测. 自然资源学报, 2002, 17(4): 476-480. [TIAN G J, ZHOU Q B, ZHAO X L, et al. Monitoring urban encroachment on cultivated land with TM images in China. Journal of Natural Resources, 2002, 17(4): 476-480.]
- [31] 谈明洪, 吕昌河. 城市用地扩展与耕地保护. 自然资源学报, 2005, 20(1): 52-58. [TAN M H, LYU C H. Urban land expansion and farmland loss in China. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 52-58.]
- [32] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究. 南京: 南京大学, 2011. [LAI L. Carbon emission effect of land use in China. Nanjing: Nanjing University, 2011.]

- [33] VAN VLIET J, EITELBERG D A, VERBURG P H. A global analysis of land take in cropland areas and production displacement from urbanization. *Global Environmental Change*, 2017, 43: 107-115.
- [34] 柯新利, 杨柏寒, 盛思雨. 耕地位移的影响与对策建议. *中国土地*, 2023, (2): 4-7. [KE X L, YANG B H, SHENG S Y. Effects and proposed countermeasures of cropland displacement. *China Land*, 2023, (2): 4-7.]
- [35] 杨柏寒. 耕地位移效应及情景模拟. 武汉: 华中农业大学, 2019. [YANG B H. Effects and scenario simulation of cropland displacement. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.]
- [36] 柯新利, 杨银玲, 朱梦珂, 等. 耕地位移的演进、挑战与对策建议. *中国土地科学动态*, 2022, (4): 1-4. [KE X L, YANG Y L, ZHU M K, et al. The evolution, challenges, and proposed countermeasures of cropland displacement. *China Land Science Trends*, 2022, (4): 1-4.]
- [37] 宋戈, 吴次芳, 王杨. 城镇化发展与耕地保护关系研究. *农业经济问题*, 2006, (1): 64-67, 80. [SONG G, WU C F, WANG Y. Urbanization and protection of farmland. *Issues in Agricultural Economy*, 2006, (1): 64-67, 80.]
- [38] 孙鹏媛. 洛阳城市化进程中的耕地保护问题研究. 开封: 河南大学, 2008. [SUN P Y. Study on the cultivated land protection during the urbanization process in Luoyang. Kaifeng: Henan University, 2008.]
- [39] 田光明. 城乡统筹视角下农村土地制度改革研究: 以宅基地为例. 南京: 南京农业大学, 2011. [TIAN G M. Research on rural land institution reform from the perspective of coordinating urban-rural development: Taking residential land as example. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [40] 陶然, 王瑞民, 潘瑞. 新型城镇化的关键改革与突破口选择. *城市规划*, 2015, 39(1): 9-15. [TAO R, WANG R M, PAN R. Key reforms of new urbanization. *City Planning Review*, 2015, 39(1): 9-15.]
- [41] 刘同山, 张云华. 城镇化进程中的城乡二元土地制度及其改革. *求索*, 2020, (2): 135-142. [LIU T S, ZHANG Y H. Urban-rural dual land system and its reform in the process of urbanization. *Seeker*, 2020, (2): 135-142.]
- [42] 颜昌武, 杨怡宁. 什么是空间治理?. *广西师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2023, 59(1): 20-31. [YAN C W, YANG Y N. What is space governance?. *Journal of Guangxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2023, 59(1): 20-31.]
- [43] MEADOWS D H, GOLDSMITH E I, MEADOW P. *The Limits to Growth*. London: Earth Island Limited, 1972.
- [44] 黄征学, 祁帆. 完善国土空间用途管制制度研究. *宏观经济研究*, 2018, (12): 93-103. [HUANG Z X, QI F. Research on improving the system of terrestrial spatial use regulation. *Macroeconomic Research*, 2018, (12): 93-103.]
- [45] 王权典. 新型城镇化存量土地再开发之调控与规制策略. 北京: 知识产权出版社, 2015. [WANG Q D. Regulation and Regulatory Strategies for the Redevelopment of Stock Land in the New Urbanization. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2015.]
- [46] 张金明, 陈利根. 宅基地土地置换若干问题探析. *山西农业大学学报: 社会科学版*, 2011, 10(3): 281-284, 299. [ZHANG J M, CHEN L G. Several issues of homestead land replacement. *Journal of Shanxi Agricultural University: Social Science Edition*, 2011, 10(3): 281-284, 299.]
- [47] 王婧, 方创琳, 王振波. 我国当前城乡建设用地置换的实践探索及问题剖析. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1453-1466. [WANG J, FANG C L, WANG Z B. China's contemporary urban-rural construction land replacement: Practices and problems. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1453-1466.]
- [48] 王权典, 吴次芳. 城乡统筹视阈中建设用地增减挂钩“土地新政”之法治检讨. *社会科学战线*, 2013, (5): 183-192. [WANG Q D, WU C F. Legal review of the construction land increase-reduction linkage "new land policy" in the context of urban-rural integration perspective. *Social Science Front*, 2013, (5): 183-192.]
- [49] 吴次芳, 叶艳妹, 吴宇哲, 等. 国土空间规划. 北京: 地质出版社, 2019. [WU C F, YE Y M, WU Y Z, et al. Territorial Spatial Planning. Beijing: Geological Publishing House, 2019.]
- [50] TANNIER C, THOMAS I. Defining and characterizing urban boundaries: A fractal analysis of theoretical cities and Belgian cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, 41: 234-248.
- [51] 范建红, 蔡克光. 美国城市蔓延治理及其对中国的启示: 基于土地制度的视角. *城市问题*, 2014, (10): 78-83. [FAN J H, CAI K G. Urban sprawl governance in the United States and its implications for China: A perspective based on land system. *Urban Problems*, 2014, (10): 78-83.]
- [52] ANGEL S. *Planet of Cities*. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2012.

- [53] 莫张勤. 生态保护红线制度的理论证成与中国实践. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2484-2490. [MO Z Q. China's practice and theory of ecological protection red line. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2484-2490.]
- [54] 龙志. 县域尺度碳排放时空格局与碳平衡分区优化. 兰州: 兰州大学, 2023. [LONG Z. Spatiotemporal pattern of carbon emissions and carbon balance zoning optimization in the county scale. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.]
- [55] 宋亚亭, 黄翔. 快速城镇化进程中空心村问题探析. 山西建筑, 2010, 36(3): 41-42. [SONG Y T, HUANG X. On hollow village problem in quick urbanization process. Shanxi Architecture, 2010, 36(3): 41-42.]

Optimizing territorial spatial pattern for carbon sink growth: Theoretical framework and action logic

WANG Tian-yu, YUE Wen-ze

(School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The patterns of territorial spatial development determine the dynamic carbon balance in regional terrestrial ecosystems. In the context of global "carbon neutrality" and China's new urbanization transformation, it is urgent to establish development patterns that enhance terrestrial ecosystems' carbon sink capacity. To this end, the study establishes a systematic cognitive framework for the carbon balance effects of land use under urbanization. It proposes a "direct-indirect-potential" typology for the impact of urbanization-induced land use changes on terrestrial ecosystems' carbon cycling. To achieve the goal of carbon sequestration and increase in terrestrial ecosystems, the study explores the inherent logic of low-carbon optimization in territorial spatial layout. It also deconstructs the governance dimensions of low-carbon optimization in territorial spatial layout concerning "quantity, spatial layout, and spatial utilization". Finally, the study proposes policy instruments and improvement suggestions for supporting low-carbon adjustments in territorial spatial layout. In conclusion, the study's first contribution is the enhancement of low-carbon thinking in territorial spatial development and utilization. Secondly, it broadens the research path for low-carbon optimization in territorial space. The study highlights the positive role of territorial spatial layout optimization and governance in achieving regional "carbon neutrality" goals.

Keywords: low-carbon land use; territorial spatial layout optimization; terrestrial ecosystem carbon sink; urbanization