

面向规划应用的蓝绿空间碳汇估算模型构建

——以武汉市为例

黄 焕, 丘永东, 肖志中, 哈思杰, 吴 啸, 程 逸

【摘 要】蓝绿空间碳汇估算是决策生态保护规划方案、评估生态修复成效等工作的重要基础支撑。实现碳汇估算的广泛应用, 对于开展相关低碳规划具有重要价值。在分析当前碳汇估算模型规划应用难点的基础上, 从应用场景、管控要点引导、平台支持 3 个方面出发, 构建适用于武汉市的蓝绿空间碳汇估算模型。该模型通过量化平台可即时完成林地、绿地、湿地 3 大蓝绿空间在不同时间、不同范围内的碳汇估算。希望以此有力推进碳汇估算模型在武汉市国土空间规划中的应用实践, 并为其他城市相关工作提供有益的参考借鉴。

【关键词】蓝绿空间; 国土空间; 碳汇估算; 碳汇估算模型

【文章编号】1006-0022(2025)05-0049-08 **【中图分类号】**TU984、X171.4 **【文献标志码】**B

【引文格式】黄焕, 丘永东, 肖志中, 等. 面向规划应用的蓝绿空间碳汇估算模型构建: 以武汉市为例 [J]. 规划师, 2025(5): 49-56.

Construction of Blue-Green Space Carbon Sink Model for Planning Applications: Taking Wuhan City as an Example/HUANG Huan, QIU Yongdong, XIAO Zhizhong, HA Sijie, WU Xiao, CHENG Yi

【Abstract】The estimation of carbon sinks in blue-green spaces serves as a critical foundation for decision-making in ecological protection planning and assessing the effectiveness of ecological restoration. The widespread application of carbon sink estimation holds significant value for implementing relevant low-carbon planning initiatives. Based on an analysis of the current challenges in the planning and application of carbon sink models, starting from three aspects, namely application scenarios, guidance on key control points, and platform support, a carbon sink model for blue-green spaces suitable for Wuhan City is constructed. The model can instantly estimate carbon sequestration in different time and scope of the three major blue-green spaces of forest land, green space, and wetland through a quantitative platform. It is anticipated that this approach will significantly enhance the integration of carbon sequestration estimation into territorial spatial planning in Wuhan City, while also offering valuable insights for other urban areas.

【Keywords】blue-green space; territorial space; carbon sink estimation; carbon sink model

0 引 言

蓝绿空间是城市生态系统的重要组成部分, 也是城市中唯一的直接碳汇途径, 在促进碳中和过程中扮演着重要角色。通过量化评估城市蓝绿空间的碳汇能力, 能

够直观地反映其在应对气候变化方面的价值, 并为城市地类用途的有效管理提供科学依据。开展蓝绿空间碳汇量化评估, 进行城市生态保护与修复, 巩固和提升城市生态系统的碳汇能力, 已成为当前各大城市推进“双碳”工作的重要课题。2022 年, 科技部会同国

【基金项目】国家自然科学基金面上项目 (32471660)、2023 年武汉市科技局知识创新专项项目 (2023020188060008)、武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院) 科研基金项目 (KWK23-BB-010)

【作者简介】黄 焕, 正高级工程师, 武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院) 院长, 国务院政府特殊津贴专家, 中国城市规划学会理事。wpdi_hh@163.com

丘永东, 正高级工程师, 武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院) 首席工程师, 武汉市有突出贡献中青年专家。

肖志中, 正高级工程师, 武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院) 首席规划师, 武汉市政府专项津贴专家。

哈思杰, 通信作者, 正高级工程师, 现任职于武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院)。421792552@qq.com

吴 啸, 高级工程师, 现任职于武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院)。

程 逸, 工程师, 现任职于武汉市规划研究院 (武汉市交通发展战略研究院)。

家发展改革委等9部门组织编制的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》，也明确提出了加强陆地和海洋生态系统碳汇核算技术及标准研发的工作要求。

目前，国内外关于生态碳汇的定量研究主要集中在大尺度空间的碳汇估算，以及湿地、植物的碳储存和固碳效益等单要素分析评价方面。虽然针对城乡生态空间的碳汇估算已经发展出多种方法，且相关学者也对中国陆地生态系统进行了较为系统的梳理，总结了不同碳汇估算方法的原理、优点和不足^[1]，但是由于当前碳汇估算方法在国土空间规划中的应用路径不明、关联性不足、适用性不强等，国土空间规划领域中的相关实际应用仍然较少，现有规划实践也多以定性分析和策略导向为主^[2]。基于此，本研究面向国土空间规划的应用需求，按照“技术框架—模型构建—应用方式”的应用逻辑，分别针对林地、绿地、湿地3大蓝绿空间构建适用于武汉市的碳汇估算模型，以实现碳汇估算应用，为武汉市国土空间规划不同场景的分析应用提供必要的基础条件。

1 当前碳汇估算模型在国土空间规划应用中的主要难点

1.1 碳汇估算纳入国土空间规划的应用路径不明

我国城乡规划领域长期致力于低碳城市规划理论与技术方法的探索，并针对不同尺度的城市空间提出了具有针对性的低碳城市规划技术方法及策略。然而，目前的探索内容多聚焦于减少碳排放方面。从现行的《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》等标准规程来看，这些规程均缺乏碳汇方面的管控意见和指标要求，缺乏对蓝绿空间质量的评估，

尤其缺乏碳汇核算指标及碳增汇能力评估方面的内容。

1.2 碳汇估算方法与土地利用管控的关联性不足

当前，针对城市生态碳汇的估算监测已发展出多种方法，以满足不同目标导向、不同空间尺度、不同环境与数据条件的估算需求。但总体来看，相关方法侧重于数据的获取及估算的精准程度。通过梳理《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》《林业碳汇项目审定和核证指南》《海洋碳汇核算方法》等主要规程，发现估算数据主要来源于多个部门的统计数据、实地调查及遥感数据等^[3]。这些数据与国土空间规划管控要素的关联不强，其结果对国土空间规划的反馈、互动与支撑也不足^[4]。

1.3 现有模型对于国土空间规划的适用性不强

以CASA、CITY-green、I-Tree、InVEST等为主要代表的专业模型，因具有快速、高效等优势被国内外科研机构广泛应用(表1)^[5]。然而，这些模型由于

自身的结构限制、树种树龄等参数不足以及针对性不强等，难以直接应用于我国的国土空间规划^[6]。此外，该类模型多采用单机版模式运行，对使用者的技术要求较高，这给其在国土空间规划中的应用和推广带来了阻碍。近年来，随着遥感技术的发展，相关学者利用遥感影像与地面植被生长调查相结合的方式建立了估算模型，以实现城市快速、实时的大范围碳汇估算^[7]。但由于目标导向的差异，以及城市生态系统碳汇空间本身具有结构复杂、空间分布异质性高、生物种类和群落种类多样等特点，在国土空间规划中不能简单地照搬应用该类模型。

2 面向规划应用的蓝绿空间碳汇估算模型构建

2.1 以应用场景明晰评估目标

理清碳汇估算在国土空间规划应用中的路径及基本思路的关键在于将蓝绿空间碳汇估算场景与国土空间治理体系有效结合。依据《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》《全国“三区三线”

表1 相关碳汇估算模型分析一览

模型类型	数据类型	方法或模型	适用范围或尺度	优势	不足
参数模型	多源遥感数据、碳汇实测数据	通过不同拟合方法(线性回归、机器学习等)构建拟合模型	区域尺度	快速、实时实现大范围的碳汇估算	城市绿地的空间分布格局及其功能需求复杂，以单一的遥感信息很难准确反映生物量的变化
	植被类型属性、植被数量或面积、植被周边环境等	CASA、CITY-green、I-Tree、InVEST等	植株尺度、区域尺度	计算快捷，估算全面	以不同树种参数为模型的既有设定，需要根据本土情况进行参数修正
过程模型	遥感影像数据、气象数据、生态参数等	BEPS、BI-OME-BGC等	区域尺度	快速、实时实现大尺度的碳循环等模拟	本身属于基于生态系统生态过程的复杂模型，由于生态系统过程的多样性和复杂性，难以在城市尺度应用

划定规则》以及景观的异质性，可按照城市开发边界将城市碳汇估算的应用场景分为两大类。其中：城市开发边界外的应用场景聚焦于城市生态空间，其规划管理内容应以林、草等生态用地的培育、更替、管理为主，碳汇估算目标应着重于识别重要自然碳汇功能区、碳汇潜力提升区等^[8]；城市开发边界内的应用场景聚焦于由城市绿地系统与湖泊水体组成的城市蓝绿网络空间，考虑到该类空间往往通过“绿线”“蓝线”进行相对固化的管理，其碳汇估算目标应着重于生态要素碳汇水平的监测与评价，并明确其与土地用途、建设管理的关系，为规划管理提供优化策略。

2.2 以管控要点引导估算模型构建

城市土地资源的有限性决定了生态碳汇用地面积增加的受限性，由此规划主要通过科学合理地制定并实施土地治理措施，提升生态要素的碳汇能力。由于蓝绿空间中不同类型生态系统的碳汇机理不同，其实现增汇的规划管控措施也各不相同。基于此，在构建碳汇估算模型时，应针对不同类型生态系统的碳汇机理及影响因素，在明晰增汇途径和相应规划管控要点的基础上，结合数据获取条件选择适当的估算方法和参数因子(表2)，以确保模型的关联性和实用性。

2.3 以平台支持实现碳汇估算模型的广泛应用

在国土空间规划应用层面，碳汇估算模型更加强调有效性与便利性，而非精准性。近年来，随着规划行业各个领域数字化技术的转型升级，规划信息平台已成为规划人员在线工作的重要工具，为碳汇估算模型的广泛应用提供了良好基础。根据《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》提出的“加快数字

赋能，深化人工智能等数字技术应用”“加强数据资源集成共享和综合开发利用”，以及《自然资源部信息化建设总体方案》提出的“形成统一协调的支撑自然资源和国土空间开发利用与保护的数据基础”等相关要求，碳汇估算模型模块应具备易用性、高效性和可扩展性，以便于嵌入“一张图”平台，并提供即时的分析结果，从而支撑国土空间高水平治理。

3 武汉市蓝绿空间碳汇估算模型应用

3.1 范畴界定

本研究参考欧盟委员会 GREEN SURGE 项目关于城市蓝绿基础设施的分类方法^[9]，以及《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》相关要求，确定蓝绿空间涵盖2大类、7小类用地类型。其中：蓝色空间包括湿地和陆地水域；绿色空间包括城市开发边界外的

林地、园地、草地，以及城市开发边界内的城市公园绿地、防护绿地。从空间概念上来说，蓝绿空间还包含绿色空间和蓝色空间集成与耦合模式下的混合空间。由于农用地碳转化的影响因素涉及土壤性质、环境和人为因素等，具有较高的复杂性^[10]，因此本研究未将其纳入研究范畴。

3.2 技术框架

根据2020年“三调”变更调查数据，武汉市全市国土总面积为8569.2 km²。其中，农用地面积为5171.5 km²，林地、园地等面积为1690.2 km²，湿地、水域等面积为1333.2 km²，分别占市域总面积的60.3%、19.7%、15.5%。此外，城市建成绿地总面积为96.8 km²。根据《2023年武汉市绿化状况公报》，武汉市城市绿地率为40.1%。本研究根据武汉市生态地类的构成特征，从蓝绿两大类型生态空间出发，对照国土空间规划“五级三类”规划体系，按照不同层级、

表2 碳汇估算模型参数因子分析一览

研究对象	碳汇影响因素	增汇途径	重要参数因子
林地	在树龄上，相关研究表明，只有处于生长阶段的森林才具有较强的碳汇能力，而树龄较老的森林只有作为碳池的碳存储功能；在树种上，相关研究表明，不同树种的碳汇能力存在差异；在环境方面，降水、温度、大气成分等会对植物碳汇能力产生影响	高碳汇植被的更替，即以高碳汇能力树种替代低碳汇能力树种；林地种植更替，根据树龄，结合森林经营有计划地进行种植更替	树龄、树种等相关数据
绿地	绿地植物自身的固碳能力主要依赖于植被类型及其叶面积和生物量密度等；群落结构特征对木本和草本植物的生长速度、物候特征、凋落物产量和质量、抗病虫害能力等产生影响，从而影响城市绿地的固碳能力	选择碳汇能力高的植物；优化植物群落结构	植物种类及与群落结构相关的数据，如净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)等
湿地	提升植物多样性水平会显著提高植物生产力和土壤有机碳含量，且其对地上生物量的影响大于对土壤碳含量的影响；氮磷等营养元素及其引起的富营养化会影响有机碳的分解和生物系统呼吸速率	减少排入淡水、湿地生态系统的污染物；优化湿地植被群落组成，增强湿地碳汇潜力；通过生态工程技术调整湿地的水位、提升水文连通性等，恢复退化的水文环境	水生、浮游植物群落等相关数据，湿地沉积物碳累计数据

不同空间的规划管理内容,明确将林地、绿地及湿地作为碳汇估算对象。在此基础上,基于碳汇估算目标和碳汇机制构建相应的碳汇估算模型(图1),进而搭建碳汇估算模型平台,以为规划管控提供技术支撑。

3.3 模型构建

本研究在梳理各类生态空间碳汇影响因素及增汇途径的基础上,推导规划管控策略,进而结合相关数据条件等提出碳汇估算模型构建方案。见表3。

3.3.1 林地碳汇估算模型构建

根据《中华人民共和国森林法》提出的“实行占用林地总量控制,确保林地保有量不减少”,以及《自然资源部国家林业和草原局关于以第三次全国国土调查成果为基础明确林地管理边界 规范林地管理的通知》提出的“明确全国和各省(区、市)林地保有量,优化林地属性,对林地实施动态管理”等相关要求,可以看出国土空间规划中的林地管控方式具有“相对固定、动态管理”的特征,其规划策略以“保存量、促增量、提质量”为主。因此,林地碳汇估算模型应基于不同树龄、树种的碳汇水平,通过预测林地碳汇水平的变化情况为规划策略提供支撑。

考虑到《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》对温室气体清单中的面积估算法支持结合不同林地类型设定更为详细的碳汇估算参数,因此本研究以面积估算法为基础,重点结合武汉市森林资源规划设计调查、样方实测以及通过文献资料梳理获取的不同树种、树龄的碳汇量和碳密度,构建林地碳汇估算模型,并以数据库、模型库、工具库为核心搭建碳汇估算模型平台(图2)。在模型应用过程中,将研究范围内不同林分类型及树龄等级的图斑面积数据输入分析模型,并乘以对应的碳密度,即

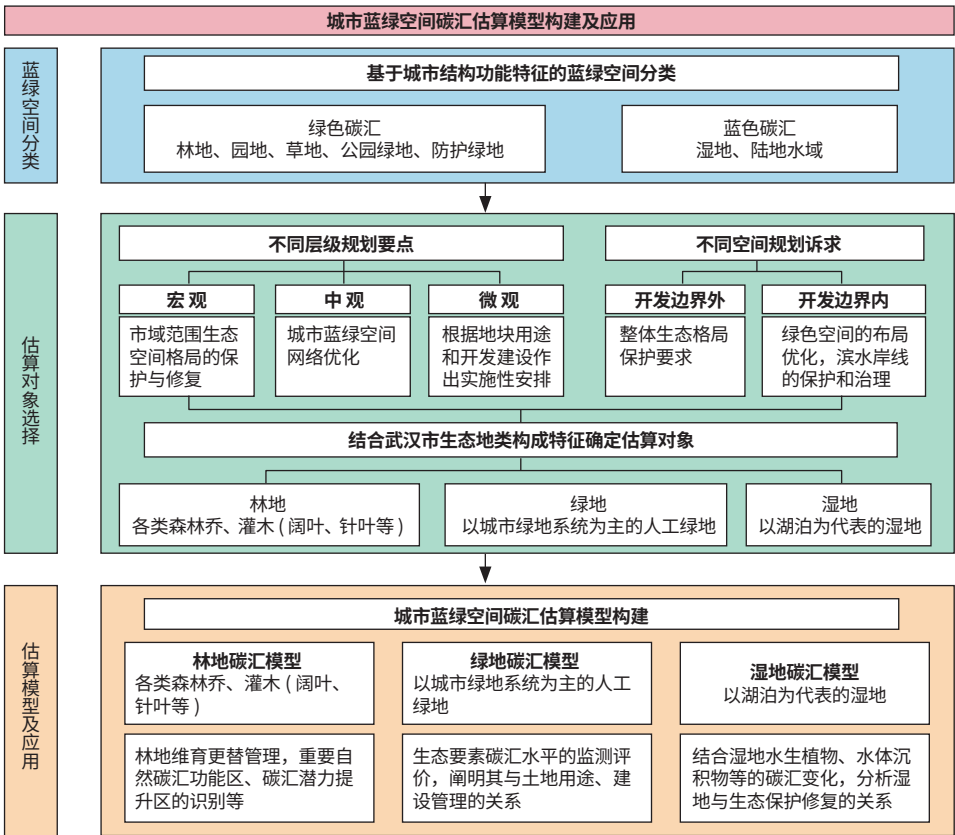


图1 武汉市蓝绿空间碳汇估算模型构建技术框架图

表3 碳汇估算模型一览

类别	基本公式	公式数据	主要数据来源
林地碳汇	$C_{GO} = (\sum_i S_i \times C_i + \sum_j S_j \times C_j + S_{竹} \times C_{竹} + S_{草} \times C_{草}) \times \frac{44}{12}$	C_{GO} 为林地总碳储量; S_i 为第 i 类乔木林的覆盖总面积; C_i 为第 i 类乔木林的碳密度; S_j 为第 j 类灌木林的覆盖面积; C_j 为第 j 类灌木林的碳密度; $S_{竹}$ 为竹林的覆盖面积; $C_{竹}$ 为竹林的碳密度; $S_{草}$ 为草地的覆盖面积; $C_{草}$ 为草地的碳密度	森林的面积、蓄积量、树种、地类特征等数据来源于武汉市 2019 年森林资源规划设计调查及“三调”基础数据; 生物量和碳计量参数、模型等来自样方实测及文献资料
绿地碳汇	采用随机森林算法进行模拟和验证,主要使用比值植被指数、短波红外等 5 个数据作为特征进行拟合。植被碳储量测度模型为: $y = 0.00037x_1 + 57.95x_2 + 12.57x_3 - 5.287x_4 - 15.31x_5 + 13.05$	y 为城市绿地植被碳储量; x_1 为影像的短波红外 (SWIR1); x_2 为影像的土壤调整植被指数 (SAVI); x_3 为影像的地表水体指数 (LSWI); x_4 为影像的比值植被指数,即遥感影像中近红外波段的反射值/红外波段反射值 (RVI); x_5 为影像的差值植被指数,即近红外波段与红光波段的数值或反射率的差值 (DVI)	植物种类、群落组成等生长特征数据来自样方实测,植被指数 (NDVI) 等来自 Seneinel-2 遥感影像数据
湿地碳汇	$C_{GW} = \sum_{ij} S_{ij} \times C_{ij} \times \frac{44}{12}$	C_{GW} 为湿地空间碳储量; S_{ij} 为在 i 类型水体中固碳类型 j 的覆盖总面积; C_{ij} 为在 i 类型水体中固碳类型 j 的碳密度	水体自身碳汇速率、水生植物固碳速率及底泥沉积物固碳速率等数据来源于相关文献研究; 湿地植被固碳速率及湿地影像识别数据来源于 Landsat8 遥感影像数据

可完成碳汇量的估算，进而可以得到不同时间段林地碳汇的变化情况，以有效指导林地的更替与抚育。

3.3.2 绿地碳汇估算模型构建

依据《中华人民共和国城乡规划法》《城市绿线管理办法》等法规条例，包括公园绿地、防护绿地等在内的城市绿地通过专项规划划定绿线，并将其纳入控制性详细规划进行统一管理。随着当前我国进入存量发展阶段，城市绿地从增量发展期进入存量提质期，绿地空间的边界和规模趋于稳定。因此，增汇规划策略多为通过碳汇水平监测来指导植物群落的配置、绿地植物群落密度的动态

调控，以及高碳汇效能树种的更替等^[11]。相应地，碳汇估算模型应更多地从城市绿地的时间序列和空间分布两个维度着手，通过监测绿地碳汇水平的变化情况为规划策略的制定提供支撑^[12]。

基于遥感技术长时间、范围广、数据获取便利的优势，本研究采取样地实测调查与遥感技术相结合的方法。具体而言，以样地绿地上的生物量数据为因变量，以遥感光谱信息、植被指数等为自变量，将提取到的遥感参数与植被样方碳储量进行相关性分析，通过逐步回归和随机森林方法进行模拟与验证，构建绿地碳汇估算模型，并以数据库、模

型库、工具库为核心搭建碳汇估算模型平台(图3)。考虑到影响城市绿地生物量的环境因子和生物因子的复杂性，依靠单一的遥感信息已经难以准确反映绿地生物量的变化。因此，本研究将12种光谱波段和8种植被指数纳入模型，以提升模型的精度。在应用过程中，按照绿线划定的边界，通过不同时期的遥感影像识别与解译，可完成相应地块的碳汇量估算及变化分析。在此基础上，结合实际绿地植物群落调查情况，可有效指导绿地的优化调整。

3.3.3 湿地碳汇估算模型构建

当前，我国湿地保护利用仍然缺乏

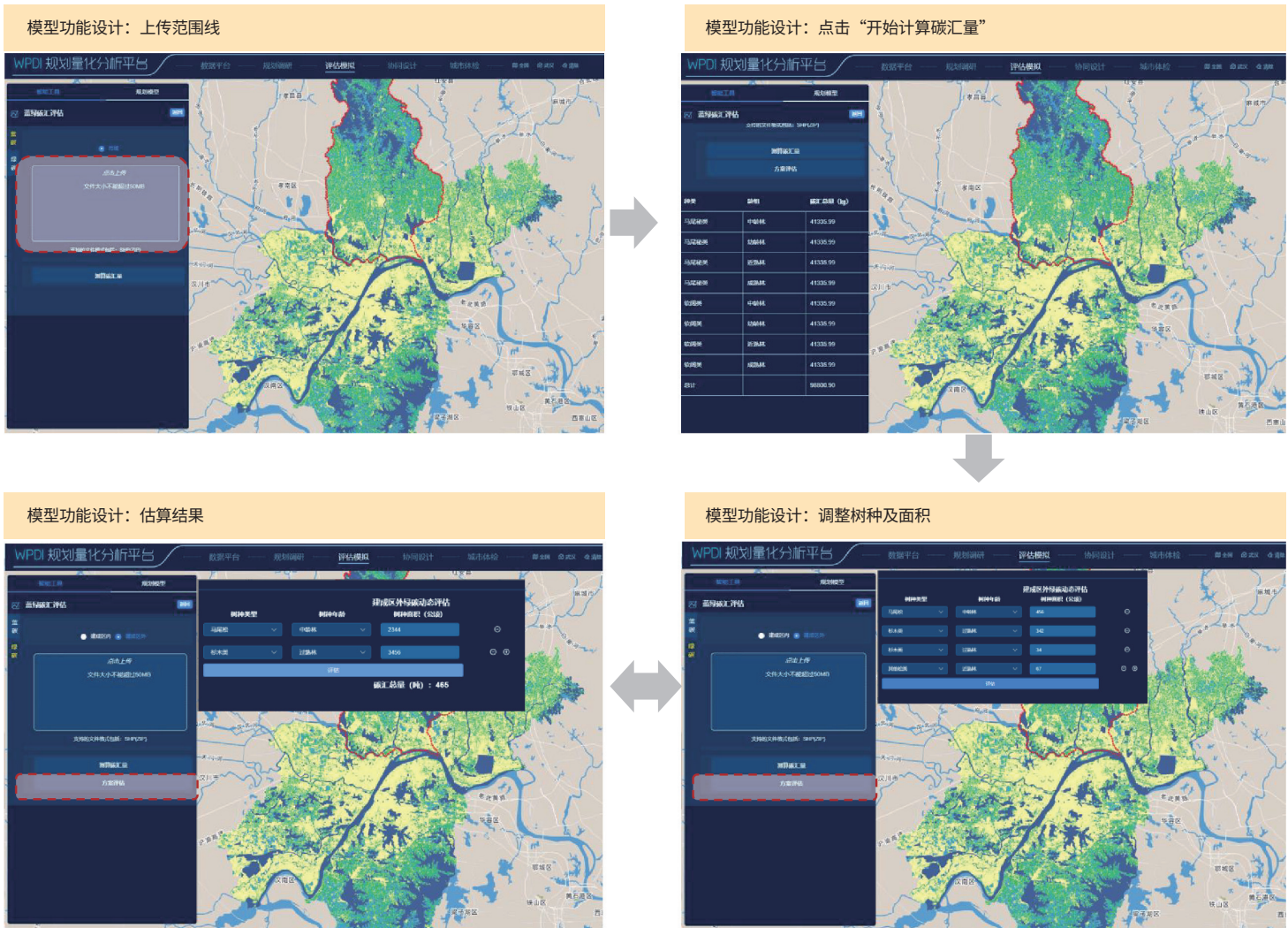


图2 武汉市林地碳汇估算模型平台示意图



图3 武汉市城市绿地碳汇估算模型平台示意图

与国土空间规划体系相衔接的规划编制规程与办法^[13]。依据《中华人民共和国湿地保护法》中“采取措施保持湿地面积稳定，提升湿地生态功能”，以及《湖北省湿地保护条例(草案)》中“恢复湿地面积，修复湿地生态功能，提高湿地生态系统质量”等相关法规的要求，国土空间规划管控的要点在于湿地的“量”与“质”。其中：“量”指的是避免因自然和人为因素干扰导致湿地退化、面积减少，进而影响生态结构和功能的完整性；“质”则指避免因生物入侵或环境污染导致生物多样性水平降低、水体富营养化等情况。因此，湿地碳汇模型应着重考虑与“量”相关联的湿地边界的识别，

以及与“质”相关联的相关生物量指数的获取，并通过长期监测碳汇水平的变化，为规划策略的制定提供支撑^[14]。

目前，国内外关于湿地碳汇计量方法、核算标准等方面的研究成果较少。现有规范标准多集中于滨海湿地，如2014年保护国际·山水(CI)、世界自然保护联盟(IUCN)等组织联合发布的《海岸带蓝碳：红树林、盐沼和海草床碳储量与释放因子评估办法》及2022年自然资源部发布的《海洋碳汇核算方法》等。然而，目前针对湖泊、沼泽等类型的湿地的碳汇估算方法尚缺乏相关标准文件。考虑到目前国内关于滨海蓝碳湿地生态系统碳汇速率测定的行业和地方标准均

采用湿地植被 NPP 与沉积物碳累积相结合的方法，本研究从实用性出发，采用遥感技术与文献研究相结合的方法，通过遥感影像识别湿地和非湿地区域；结合湿地植被固碳速率数据与水生植物、底泥沉积物等固碳速率数据，利用水体面积与单位面积的固碳速率构建湿地碳汇估算模型，并以数据库、模型库、工具库为核心搭建碳汇估算模型平台(图4)。在应用过程中，按照湿地保护划定的边界，通过不同时期的遥感影像识别与解译，可完成边界内的碳汇量估算及变化分析。在此基础上，结合实际湿地水文环境等调查情况，即可为湿地保护与修复策略的制定提供科学指导。

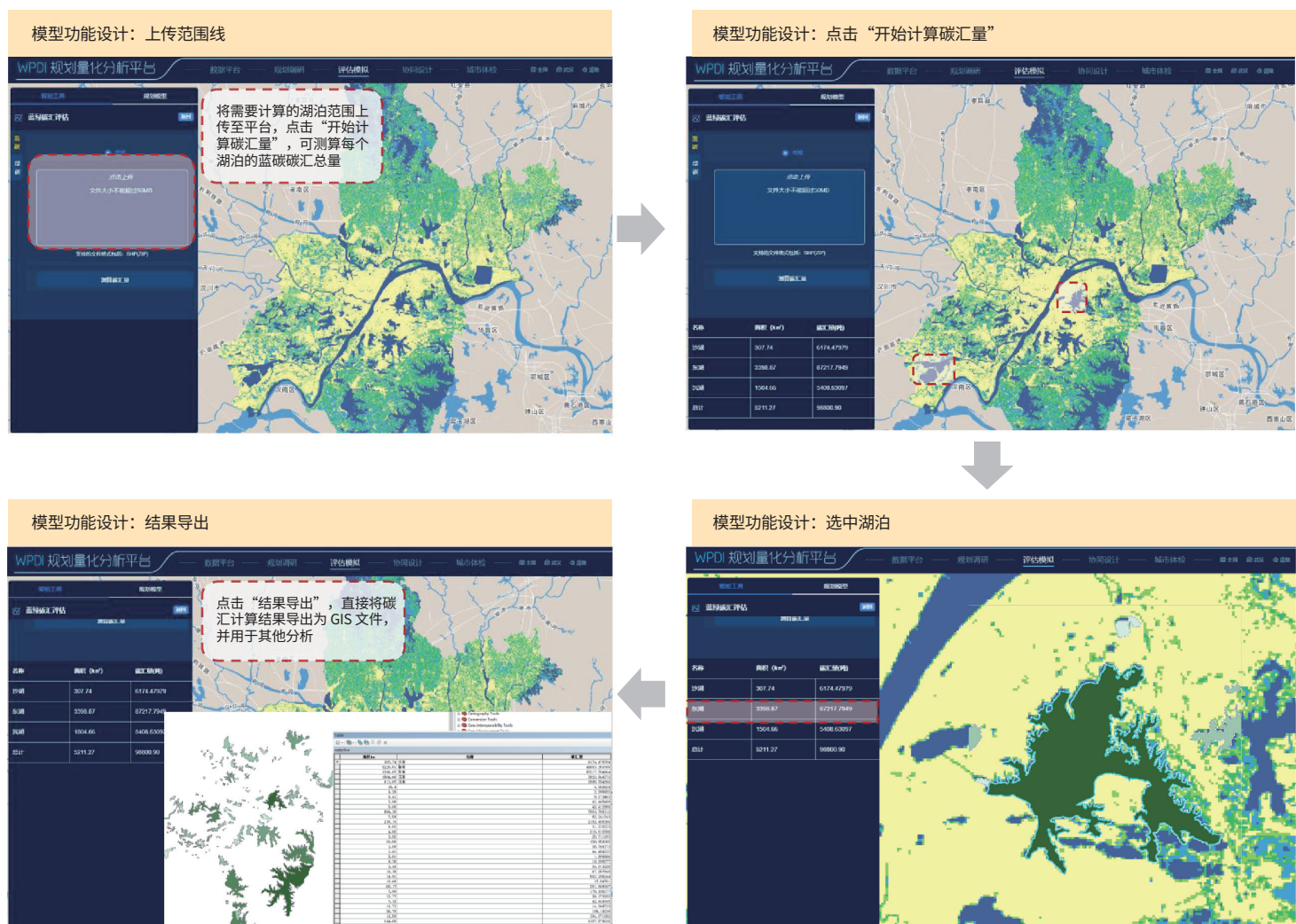


图 4 武汉市湿地碳汇估算模型平台示意图

3.4 平台应用

碳汇估算模型平台的搭建，是支撑规划人员通过简单操作开展碳汇量化分析，进而做出规划决策的重要途径。为进一步加强碳汇估算模型在国土空间规划工作中的实际应用，本研究以数据库、模型库、工具库为核心，搭建了碳汇数据模型平台^[15]。

3.4.1 数据库

数据库主要包括国土空间土地利用现状数据库、国土空间规划数据库、武汉市森林资源规划设计调查数据库、遥感影像解译数据库、实地样方调查数据库、生物量模型参数数据库等 6 大类 (表 4)。数据平台着重在统一数据格式标准和地

理坐标的基础上，对所有数据实体要素进行空间叠加，以满足国土空间规划编制中数据动态融合的需求。

3.4.2 模型库

模型库主要由林地、绿地、湿地 3 个估算模型组成，通过对模型进行逻辑梳理和代码编写，将其以模块的形式封装在平台系统中，形成具有输入/输出模式的模型，实现可复用、可推广。

3.4.3 工具库

提高效率是数据平台建设的重要目标之一。本研究的数据模型平台除了将常用的范围线上传计算、数据统计等功能作为标准化服务，还特别强化了模型计算参数输入和模拟结果平台输出等设

计。这些改进措施有效降低了模型软件操作的复杂程度，提升了模型使用的便捷性，从而推动模型方法的应用。见表 5。

4 结束语

科学、快速量化城市蓝绿空间碳汇水平的变化，对于科学开展低碳城市规划编制、政策制定等工作以及促进城市“双碳”目标的实现，具有重要的现实意义。本研究面向国土空间规划，构建碳汇估算模型，并在《武汉市林业资源保护和发展空间规划》《湖北沉湖自然保护区总体规划 (2023—2031 年)》等碳汇估算研究中初步应用了该模型，

表 4 数据建库一览

数据库名	数据内容
国土空间土地利用现状数据库	行政区划数据、土地利用现状“三调”数据
国土空间规划数据库	国土空间总体规划、控制性详细规划以及绿地系统及林地、湿地保护专项规划等数据
武汉市森林资源规划设计调查数据库	树种、树龄、规模及空间分布等数据
遥感影像解译数据库	历年不同时间的 Seneinel-2、Landsat 8 等遥感卫星影像解译数据
实地样方调查数据库	样方空间位置、实测数据
生物量模型参数数据库	相关模型计算得出的生物量参数，如各类乔木不同树龄的生物量值等

表 5 碳汇工具集功能说明一览

模块名称		输入参数	输出结论	颗粒度
市域蓝碳		武汉市 166 个湖泊范围线	碳汇量和面积	每个湖泊
建成区内绿碳		任意范围线	总碳汇量	范围线
			碳汇强度空间分布	250 m×250 m 格网
			历年总碳汇量变化情况	自然年
建成区外绿碳	估算范围	任意范围线	不同树种和树林碳汇量	范围线
			总碳汇量	范围线
			历年总碳汇量变化情况	自然年
			碳汇强度空间分布	林业调查自然斑块
	方案模拟	任意范围线、树种种类、树种面积	不同树种和树林碳汇量	范围线
			总碳汇量	范围线

其有效性和可行性得到了初步验证。由于生态空间的碳汇估算本身是一个极为复杂的过程，加上技术方法、数据条件等的限制，未来需持续完善模型及数据平台的构建。具体包括以下几个方面：①根据相关研究，不同模型方案的估算结果差异较大，未来需通过多种模型进行相互支撑；②以更加精细的空间数据与碳汇实验监测数据为支撑，提高模型估算的准确度；③基于规划应用，逐步拓展和完善数据平台的分析决策功能等。

（特别感谢华中农业大学园艺林学学院吴昌广副教授以及武汉大学城市设计学院武静教授、罗巧灵教授对本研究的支持和指导。）

[参考文献]

[1] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022(6): 1010-1020.

[2] 姜紫莹. 日本低碳城市建设规划中的减碳逻辑与碳定量方法 [J]. 国际城市规划, 2024(5): 153-159.

[3] 张炜, 刘晓明. 武汉市蓝绿基础设施调节和支持服务价值评估研究 [J]. 中国园林, 2019(10): 51-56.

[4] 陈浮, 张莞悦, 华子宜, 等. 耕地系统增产—降污—固碳多效协同: 机制、潜力及技术路径 [J]. 中国土地科学, 2023(12): 1-13.

[5] 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(5): 134-141.

[6] 冷红, 肇禹然, 袁青. “双碳”目标

下碳核算方法在国土空间规划中的应用路径研究 [J/OL]. 国际城市规划, (2023-07-27)[2024-10-25]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2023.070>.

[7] 于洋, 王昕歌. 面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021(1): 95-102.

[8] 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展 [J]. 地学前缘, 2023(2): 447-462.

[9] 王磊, 吴啸, 周勃. 数字化转型背景下的武汉市智慧规划信息平台建设研究 [J]. 规划师, 2022(8): 121-125.

[10] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征 [J]. 生态学杂志, 2020(4): 1387-1398.

[11] 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(4): 490-501.

[12] 荆贝贝, 杜安. 上海城市绿色空间碳汇评估及提升策略 [J]. 中国国土资源经济, 2022(4): 64-72.

[13] 王国胜, 孙涛, 咎国盛, 等. 陆地生态系统碳汇在实现“双碳”目标中的作用和建议 [J]. 中国地质调查, 2021(4): 13-19.

[14] 侯建丽, 葛荣凤, 马晓琳, 等. 基于国土空间规划的日喀则湿地资源保护与修复 [J]. 湿地科学与管理, 2022(5): 41-45.

[15] 杨卫东, 曾联波, 李想. 碳汇效应及其影响因素研究进展 [J]. 地球科学进展, 2023(2): 151-167.

[收稿日期] 2024-12-26