

城市绿地全生命周期碳计算工具对比分析

Comparative Analysis of Carbon Calculation Tools for the Full Life Cycle of Urban Green Space

李贤基 吴于蓝 黄思艺 刘颖怡 陈燕明*

LI Xianji, WU Yulan, HUANG Siyi, LIU Yingyi, CHEN Yanming*

基金项目: 国家自然科学基金项目(面上项目)“粤港澳大湾区多尺度城市化梯度下的鸟类谱系/功能/均质化及生境优化与多样性提升研究”(编号: 52478053); 培育壮大科技特派员队伍和科研合作项目“蜂蝶友好型乡土蜜源灌草植物群落构建与示范”(编号: 2024760000340010537)

摘要

在碳中和背景下, 城市绿地因重要的碳汇功能成为风景园林研究的重点对象。精准核算城市绿地全生命周期的碳排放、碳汇及碳平衡需要适用的碳计算工具。通过对现有城市绿地的碳计算工具进行整理分析, 筛选出 Bond、Pathfinder 和 Carbon Conscience 三种适用于城市绿地全生命周期碳计算的工具, 从数据来源、地区适应性、功能覆盖、可应用阶段及适用尺度五大维度展开对比分析, 探讨其在城市绿地全生命周期碳平衡计算中的技术特点和应用局限, 并提出优化路径。结果显示, 3 种工具在功能上覆盖了碳排放与碳汇的综合核算, 但受限于地区数据偏差和全生命周期覆盖不足, 难以直接适用于我国城市绿地碳计算; 需进一步构建本土数据库与动态模型, 强化全周期覆盖, 支持多尺度融合, 提升用户友好性与智能化水平。

Abstract

In the context of carbon neutrality, urban green spaces have become a key research focus in landscape architecture due to their important carbon sequestration function. Accurately quantifying carbon emissions, carbon sequestration, and carbon balance over the full life cycle of urban green spaces requires appropriate carbon calculation tools. Through a systematic review and analysis of existing carbon calculation tools for urban green spaces, three tools applicable to full life-cycle carbon calculation are selected: Bond, Pathfinder, and Carbon Conscience. A comparative analysis is conducted from five dimensions: data sources, regional adaptability, functional coverage, applicable stages, and applicable scales. Their technical characteristics and application limitations in the full life-cycle carbon balance calculation of urban green spaces are discussed, and optimization pathways are proposed. The results show that although the three tools integrate comprehensive accounting of carbon emissions and carbon sequestration, their direct application to China's urban green space carbon calculation is hindered by regional data biases and insufficient full life cycle coverage. Further efforts are needed to build localized databases and dynamic models, strengthen full life cycle coverage, support multi-scale integration, and improve user-friendliness and intelligence.

文章亮点

1) 构建了涵盖数据来源、地区适应性、功能覆盖、可应用阶段、适用尺度 5 个维度的对比框架。2) 对 3 种工具进行了本土化应用的定量验证, 揭示了各工具在我国实际场景下的计算偏差程度, 明确了本土化应用的核心障碍。3) 提出“数据筑基-功能完善-系统集成-智能应用”的四层级优化路径, 为未来研发适合我国的本土化碳计算工具提供了清晰、可操作的优先级框架。

关键词

碳中和; 城市绿地; 全生命周期; 碳计算工具; 风景园林

Keywords

Carbon neutrality; Urban green space; Full life cycle; Carbon calculation tools; Landscape architecture

收稿日期: 2025-09-01

修回日期: 2026-01-29

在全球碳中和目标的推动下，如何缓解城市由于能源消耗引发的各种气候问题，促进低碳城市建设是当前风景园林学科面临的重大挑战^[1]。城市绿地是城市范围内直接增汇、间接减排的要素，核算与监测其碳储量、评估其碳汇效益，能直观反映城市绿地的碳中和作用，对促进城市低碳发展具有重要意义^[2~3]。因此，开展城市绿地全生命周期的碳影响评估，已成为推进碳中和进程的重要实践方向之一。

近年来，国内外学者围绕城市绿地碳计算方法开展了大量研究。张桂莲等^[2]系统梳理了城市绿地碳汇的计量监测方法，指出当前方法多参照森林碳汇监测标准，缺乏专门针对城市绿地特征的技术规范。王晶懋等^[1]以西安典型绿地为例，探讨了小尺度绿地在全生命周期中的碳平衡机制，并对材料生产、建造、日常使用、维护管理等各阶段的碳排放与碳汇进行了量化分析。武艳芳等^[4]系统总结了城市绿地碳计算的主要方法与技术路径，并指出现有方法在本地化参数校准、估算精度等方面仍存在一定局限性。

在碳计算工具方面，Meng XU等^[5]系统回顾了低碳城市数字化规划工具的演进，指出碳评估工具正从以能源系统规划为主，向涵盖多维度、全生命周期的综合评估方向发展。国际上涌现出多个适用于城市绿地的碳计算工具，如 Pathfinder (Climate Positive Design)、Carbon Conscience (Sasaki) 等^[6~17]。国内学者针对其中部分工具开展研究：汪文清等^[18]对园林绿地碳中和相关工具进行初步汇总，指出现有工具在适用阶段、功能覆盖等方面差异显著，且国际工具在我国的使用受到较多限制，亟需开发适用于我国的本土化工具；冀媛媛等^[19]从全生命周期视角对城市绿地碳源碳汇量化体系进行比较，指出工具的适用阶段和数据的本地化程度是影响其应用效果的重要因素。

综上，尽管已有研究在碳计算方法与工具应用方面取得一定进展，但对我国城市绿地全生命周期碳计算工具的系统性对比仍较为缺乏，尤其在

国际工具的本土化应用研究方面存在明显不足。基于此，研究筛选出 Pathfinder、Carbon Conscience 与 Bond 三种具有代表性的工具，从数据来源、地区适应性、功能覆盖、可应用阶段及适用尺度 5 个维度展开系统性对比分析，揭示其技术特点与应用局限，并提出适用于我国城市绿地的碳计算工具优化路径，以期为低碳城市建设提供科学支撑。

1 碳计算工具的分类与筛选

1.1 碳计算工具分类

为系统把握城市绿地在全生命周期各阶段的碳影响，并有效筛选适用于其全生命周期评估的工具，研究对碳计算工具进行系统梳理，以明确其

适用范围与核心功能（表 1）^[6~17]。从功能角度出发，碳计算工具可分为 3 类：

1) 碳排放计算工具，专注于量化建筑、景观、交通和工业等领域的碳排放量，多用于材料生产施工及运营阶段。EC3 和东禾建筑碳排放计算分析软件虽聚焦于建筑领域，但同样适用于城市绿地中建筑物、构筑物以及道路铺装的碳排放计算。

2) 碳汇计算工具，聚焦于量化植被、土壤以及水体等的固碳能力。常用工具 i-Tree Eco、Citygreen 在相关研究中应用较广，可为其他工具的碳汇计算结果提供复核参考。

3) 碳中和计算工具，可综合考虑碳排放和碳汇，评估项目或方案是否

表 1 碳计算工具
Tab.1 Carbon calculation tools

分类	工具名称	适用范围	主要功能
碳排放 计算工 具	Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3)	建筑施工阶段的材 料选择	不同类型建筑材料的碳排放，适用于建筑全 生命周期的碳排放评估 ^[6]
	东南大学东禾建筑碳 排放计算分析软件	建筑的建造与运行 管理	适用于建筑运行阶段的碳排放计算，包括热 水、空调、照明等能耗产生的碳排放 ^[7]
碳汇计 算工具	i-Tree Eco	森林生态系统评估 以及绿地系统监测	计算森林和绿地中树木的碳汇量，适用于森 林生态系统和多种尺度绿地系统的碳汇评估 ^[8]
	National Tree Benefit Calculator	中小尺度绿化项目	计算单棵树的碳汇量，适用于城市绿化和树 木种植项目的碳汇评估 ^[9]
	Citygreen	绿地系统	计算植物的碳汇量，适用于碳汇评估以及公 园的植被规划 ^[10]
碳中和 计算工 具	Construction Carbon Calculator	建筑与园林项目碳 中和评估	计算建筑的碳排放和园林绿地的碳汇量，评 估项目的碳中和时间 ^[11]
	Bond	园林绿地项目碳中 和评估	计算园林绿地项目的碳排放和碳汇量，评估 项目的碳中和时间 ^[12-13]
	Pathfinder		
	CURB	城市规划碳中和情 景演示	演示特定的成功情景，帮助城市实现减排和 碳源目标 ^[14]
	CarboScen	区域绿地系统和土 地利用规划	估算土地利用变化的碳排放和碳汇量，适用 于生态系统中的碳评估情况 ^[15]
	Carbon Conscience	景观规划设计初期	关注景观材料的隐含碳和植物的碳汇，适用 于设计初期的碳指标预测 ^[16]
	Urban Decarb	建筑、园林绿地以 及基础设施的协同 评估	整合建筑、园林绿地以及基础设施的碳排放 与碳汇，提供动态情景模拟，适用于城市系 统的碳中和分析 ^[17]

实现碳中和，并提供实现碳中和的路径，具备覆盖城市绿地全生命周期与适配多尺度的能力。

1.2 城市绿地全生命周期碳计算工具筛选

在生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）的基础上，考虑到目前各研究对景观全生命周期各阶段的划分均有所不同，为更好地对比碳计算工具，研究将全生命周期划分为规划、设计、生产施工和运营维护4个阶段^[18,20~21]。理论上，完整的生命周期应包含拆除、处置、循环等末端阶段，但这在一定程度上超出了设计团队的控制范围；同时现有工具的计算系统边界，已将拆除、处置等部分纳入生产施工阶段，包括硬质景观、现有树木及生态系统的拆除与移除^[13,16]。

基于上述全生命周期框架，研究进一步明确：适用于城市绿地全生命周期评估的工具，不仅需要具备碳排放计算能力，还应涵盖植物、土壤及生态系统的碳汇计算，并能够对项目整体碳中和目标进行综合评估。因此，本研究的筛选对象主要限定为碳中和计算工具，而非仅聚焦单一碳排放或碳汇功能的专项工具。研究通过横向对比，从开发年份、适用对象、使用频率3个方面筛选能够支持城市绿地全生命周期碳平衡的计算与方案评估的优秀工具（表2）。

根据筛选标准，研究团队检索Web of Science、CNKI、Google Scholar等数据库，检索词由工具名称和相关主题词组合而成，英文主题词包括“carbon calculation”“carbon calculation tools”“carbon neutrality”“urban green space”等；中文主题词包括“碳计算”“碳计算工具”“碳中和”“城市绿地”等。检索时间跨度为2019—2025年，经去重后统计学术文献及公开实践报告中明确使用相关工具的次数。结果表明，Pathfinder累计使用12次^[5,18~20,22~23]，Carbon Conscience累计5次^[4~5,16,19,23]；Bond目前仅见1篇公开研究文献引

用^[18]，暂无公开实践案例，但其开发团队在Facebook等公开社媒上活跃，并不断开发新的功能。

最终选取Carbon Conscience、Bond与Pathfinder三种具有研究价值或应用潜力的工具作为主要研究对象。其中，Pathfinder和Carbon Conscience已在学术研究和实践中得到较多应用；而Bond作为新兴工具，虽然现有公开文献和实践案例较少，但其功能设计聚焦于绿地碳平衡，且开发团队持续更新，具有极大的发展

潜力，故一并纳入对比分析。

2 三种碳计算工具对比分析

为进一步展开对碳计算工具的对比分析，研究首先梳理了城市绿地全生命周期碳计算的总体流程与方法框架（图1）。框架以生命周期评估（LCA）方法为基础，覆盖规划、设计、生产施工与运营维护4个阶段，并基于相应数据库计算各阶段碳排放与碳汇，评估碳中和情况。

碳计算工具的适用性不仅取决于

表2 城市绿地全生命周期碳计算工具的筛选标准与评价指标
Tab.2 Screening criteria and evaluation indicators for carbon calculation tools for the full life cycle of urban green space

筛选维度	评价指标	评价标准说明
开发年份	工具发布与更新年份在2019—2025年	开发年份较早且仍有更新的工具在数据结构与功能模块方面更成熟，可靠性更高；长期未更新或过旧版本不纳入分析
适用对象	绿地或景观领域适配性	重点关注工具是否针对城市绿地、景观生态系统进行设计或扩展，剔除非绿地系统工具
引用及实践频率	学术与实践使用次数不少于5次	通过文献引用或研究频次、项目应用案例等衡量工具关注度与成熟度。景观碳计算工具研究领域较新，故以不少于5次为高频

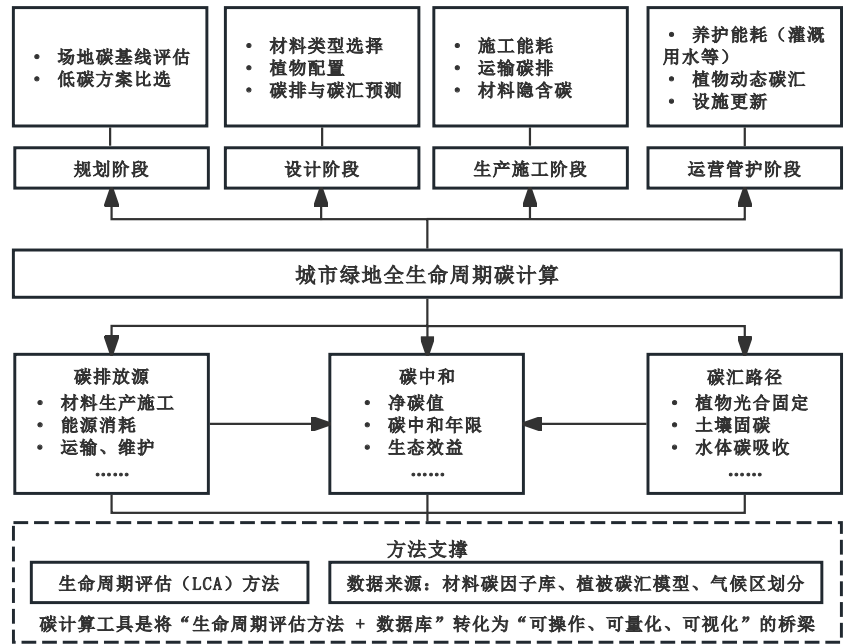


图1 城市绿地全生命周期碳计算流程与方法框架
Fig.1 Flow and methodological framework of carbon calculation for the full life cycle of urban green space

其计算结果的准确性，还与其功能完整性及应用范围密切相关。其中，数据来源与地区适应性直接影响碳计算因子的可靠性及结果准确性；功能覆盖与可应用阶段决定工具是否能够支持全生命周期碳影响评估；适用尺度则反映工具在不同空间层级中的应用能力。因此，研究基于城市绿地全生命周期碳评估的核心需求，从数据来源、地区适应性、功能覆盖、可应用阶段以及适用尺度 5 个维度，对 Bond、Pathfinder 与 Carbon Conscience 展开系统对比分析，并提出优化方向与建议。

2.1 数据来源

碳计算工具的内置数据主要指碳计算因子，对于同样的计算项目，不同的计算因子将导致不同的计算结果，这些计算因子的参考路径包括相关的官方报告或者研究论文的数据。

Bond 的内置数据涵盖 12 类要素，来自 47 项研究。例如，其碳固存数据参考了美国农业部林业局（USDA Forest Service）关于城市树木碳固存的长期研究。Pathfinder 隐含碳计算主要引用 Carbon Conscience、EC3、Athena 及 Tally 数据库，其中施工安装碳排放按材料生产的 2.5% 估算，材料拆除、运输、场地准备与苗圃排放等碳排放计算则参考 Carbon Conscience 数据集；运营碳计算涉及草坪管理、养护设备、肥料施用及灌溉能耗等数据；碳汇方面，树木碳汇引用 E. Gregory McPherson 和 James R. Simpson^[24] 的研究成果，生态系统数据来源于 Carbon Conscience 数据集。Carbon Conscience 参考 Carbon Leadership Forum、MIT deQo 等数据库，整合了景观或建筑土地碳利用、景观材料和组件、碳成本及碳汇等多个专项数据集，完整展示计算因子及其来源（表 3）。

各工具均建立在已有数据库与研究成果基础之上，但数据来源存在明显差异：Bond 更聚焦景观材料与植物层面的精细数据；Pathfinder 则整合隐含碳、运营碳与植物碳汇等多类型研究数据，数据类型覆盖全面丰富；

Carbon Conscience 更加侧重规划阶段的土地利用与材料碳影响数据库整合。这些差异也进一步影响了工具在功能完整性与地区适应性上的表现。

2.2 地区适应性

受地理位置与建设经验等因素影响，不同地区的植物、材料、设备以及运输等计算因子存在差异。而上述 3 种工具均开发于北美，数据及相关假设多源于当地的研究及相关的规范，直接应用于我国存在数据源偏差，因而具有地区局限性。

Pathfinder 基于联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的全球生态区划（如热带湿润森林、温带干旱草原等）划分气候类型，结合区域生长季长度调整碳固存速率；其支持调用 EC3 数据库的 EPDs（Environmental Product Declarations，环境产品声

明）数据，可自定义硬质材料、植物、设备和运输工具等参数，具有更好的数据延展性和地区适应性。Carbon Conscience 则为各类数据提供高、低估值范围以应对不确定性，但参数调整选择有限。例如，其运输工具仅预设了 100% 卡车、90% 铁路和 10% 卡车、90% 水运和 10% 卡车、95% 空运和 5% 卡车以及完全使用自行车或可再生能源这 5 种模式，无法输入实际工具及具体数据，导致工具地区适应性有限。Pathfinder 在材料运输方面虽引用 Carbon Conscience 的默认值，但其自定义的设计允许用户输入实际的工具及参数，计算结果更为准确（表 4）。

为进一步验证 3 种工具在国内的地区适应性，研究选取以下 2 个案例对比分析：1）西安建筑科技大学雁塔校区图书馆绿地样地的草皮总运输距离为 334.8 km（单程为

表 3 碳中和计算工具数据来源的对比分析

Tab.3 Comparative analysis of data sources for carbon neutrality calculation tools

工具名称	主导开发团队	数据覆盖范围	信息来源
Bond	Sandbox 等	硬质景观、植物、运输等 12 个类别的隐含碳、碳固存与碳储存	https://www.sandboxc6.com/citations/
Pathfinder	Climate Positive Design 等	材料隐含碳、运营碳、植物及生态系统的碳固存与碳储存，以及生物多样性、水资源、热岛效应缓解等生态效益评估	https://climatepositivedesign.org/Education/
Carbon Conscience	Sasaki Associates 等	建筑与景观土地利用类型的隐含碳、碳固存、碳储存以及碳成本	https://www.carbonconscience.sasaki.com/

表 4 碳中和计算工具地区适应性的对比分析

Tab.4 Comparative analysis of regional adaptability for carbon neutrality calculation tools

工具名称	开发地区及偏向	气候分区支持	数据输入情况	自定义参数支持
Bond	北美	默认北美气候	基于单个材料数据输入	不支持
Pathfinder	北美，支持全球使用	FAO 全球气候分区	基于材料或组件单位的数据输入	支持自定义材料、设备、运输等计算项目及因子
Carbon Conscience	北美	按热带、温带、寒带分类	基于组件单位的预设类型选择	预设高、低估值范围，但选项固定

167.4 km)，采用油耗为 0.12 L/km、碳排放因子为 2.30 kgCO₂/L^[25] 的中小型汽油面包车运输，产生的碳排放量为 92.41 kgCO₂^[1]。研究以此为基准值，使用 3 种工具计算结果的差异（表 5）。2）我国广东南沙地区红树林的平均碳汇因子为 2.15 kgCO₂/m²^[26]，现假定南沙某区域有一片 1 000 m² 的红树林生态系统，其在第 60 年的碳封存量为 1.89×10⁵ kgCO₂。研究以此为基准值进行对比分析（表 6）。

综上，3 种工具在我国各地区适应性均存在局限：Bond 无自定义功能，草皮运输碳排放计算偏差较小，但因缺乏对生态系统的考虑无法计算红树林碳汇；Pathfinder 支持材料、运输等方面自定义参数，草皮运输碳排放计算精准，但无法自定义地区性生态系统数据，导致红树林碳汇计算偏差率较高，整体适应性一般；Carbon Conscience 以组件为基本单位，无法自定义运输参数，故草皮运输碳排放计算的偏差率较大，且红树林碳汇量偏差率较高，整体适应性较差。

2.3 功能覆盖

3 种工具均涵盖碳排放与碳汇核算，但功能侧重与完整性存在差异。Bond 聚焦于绿地材料碳排放和植物碳固存的平衡，预估项目所需的碳中和年限（Sequestration Equilibrium Timeline, SET）。Carbon Conscience 侧重于规划初期整合建筑与景观要素，对项目的整体碳影响做出快速评估。Pathfinder 可评估项目全生命周期的碳影响与管理，并量化生物多样性、水资源等生态效益。

在城市绿地碳排放计算方面，Bond 和 Carbon Conscience 目前仅关注隐含碳，未涉及运营碳。其中 Bond 关注材料的制造、运输和安装产生的隐含碳，未来可能会与正在开发的 Pilot（专门用于追踪项目长期管理的工具，关注项目运营管护阶段产生的碳影响）协同扩展计算运营碳。Carbon Conscience 基于土地利用类型计算隐含碳，未考虑运营碳。Pathfinder 则计算了景观用水、维修设备和使用肥料所产生的运营碳，使

全生命周期的碳排放计算更加完整。

在碳汇计算方面，三者也有所不同。Bond 仅预设常见景观植物的年固存量，比如 1 棵美国白栎 *Quercus alba* L. 年固存约 44.9 kg 的 CO₂、9.29 m² 草坪年固存约 5.0 kg 的 CO₂ 等，输入相应的树木数量或草坪面积可得到相应的碳固存量。Carbon Conscience 基于土地利用类型估算碳汇，其碳储存依据生态系统单位面积的碳储量计算，碳固存则结合气候区划的单位面积固碳速率进行预测。而 Pathfinder 基于树种、树龄、FAO 气

候区动态估算碳固存速率，并整合土壤表层有机碳，提供了更精准的数值。

2.4 可应用阶段

不同工具因数据粒度与计算范围差异，适用于城市绿地全生命周期的不同阶段。以下参考汪文清^[18]对工具使用阶段的分析，从城市绿地全生命周期和绩效报告 2 个方面，对比 3 个计算工具在可应用阶段的表现（表 7）。

全生命周期划分为规划、设计、生产施工和运营管护 4 个阶段。碳计算工具在全生命周期的不同阶段具有不同的应用方式与计算重点。需要说

表 5 3 种工具对图书馆样地草皮运输碳排放量的计算对比

Tab.5 Comparative calculation of carbon emissions from turf transport at the library plot by three tools				
工具名称	工具计算操作	碳排放结果	偏差率	参数调整能力
基准值		92.41 kgCO ₂		
Bond	在“交付”模块选择 1 类小型卡车，输入英里数以及行程次数	88.01 kgCO ₂	低估 4.7%	无法选择汽油车型
Pathfinder	在“材料”页自定义“草皮运输排放量”，输入运输工具碳排放因子（2 300/1.3 kgCO ₂ /m ³ ）并选择单位（m ³ ），输入相应体积量	92.30 kgCO ₂	低估 0.1%	自定义运输碳排放因子（Pathfinder 指出材料部分含生产、运输、施工、结束阶段，后三者按生产阶段的 30% 估算，故输入值需除以 1.3）
Carbon Conscience	在“草皮”的参数调整中，选择运输工具“100% 卡车”，其碳排放因子固定为 1.115 kgCO ₂ /km，选择距离最贴合实际的“当地（160 km）”选项	178.4 kgCO ₂	高估 93.1%	无法选择实际运输工具和输入实际运输距离，只能选择相近选项值

表 6 3 种工具对南沙某区域红树林生态系统碳汇量的计算对比

Tab.6 Comparative calculation of carbon sequestration in a mangrove ecosystem in Nansha by three tools				
工具名称	工具计算操作	第 60 年碳汇结果	偏差率	参数调整能力
基准值		1.89×10 ⁵ kgCO ₂		
Bond	无法选择自然的植被生态系统			无自定义功能
Pathfinder	在“植物”页选择“保留生态系统”下的“红树林”	2.66×10 ⁵ kgCO ₂	高估 41%	可自定义某一植物的因子，但无法设定某一地区生态系统数据
Carbon Conscience	在“保留材料”中选择“现有保留植被”的“红树林”	2.66×10 ⁵ kgCO ₂	高估 41%	只能选择固有的生态系统类型

明的是，工具在各阶段的应用并非彼此独立的重复计算，而是遵循“预测－核算验证－长期追踪”的递进逻辑。

在规划、设计阶段，碳计算工具基于方案参数进行预测，输出碳排放与碳汇估算值，支持方案比选与低碳优化。规划阶段更侧重宏观尺度的战略判断，数据要求相对粗略。Carbon Conscience 正满足该需求，其基于土地利用类型分析，快速比较不同规划方案在宏观尺度上的碳影响差异，为早期决策提供战略支持。设计阶段是具体方案的深化过程，落实优化各要素的配置，需确定较精准的数据，如特定材料的用量、植物数量等。Pathfinder 与 Bond 为精细化计算模式，可预测碳排放、碳汇，从而支持设计方案的精确比较与低碳优化。

在生产施工阶段，碳计算工具依据设计方案及实际采购、运输、施工等数据进行核算与修正，验证并调整设计阶段的估算结果。虽然 3 个工具均可估算材料生产、运输与安装施工中产生的碳排放，但 Carbon Conscience 适合基于土地利用类型的粗略估算，而 Pathfinder 与 Bond 支持在项目的实际生产施工阶段对具体材料清单进行调整与计算。

在运营管护阶段，碳计算工具追踪项目长期的持续性运营碳排放，如养护设备能耗、肥料施用及灌溉用水等。Pathfinder 具备相关参数与自定义优势，可实现精细化核算与追踪，Bond 与 Carbon Conscience 因未涉及运营碳计算，不适用于此阶段。

综 上，Carbon Conscience 更适用于规划阶段，其可快速对土地利用规划方案做出决策，选择更低碳的方案。Bond 和 Pathfinder 则适用于设计阶段中要素配置的优化，以最大化整体项目的碳效益。在生产施工阶段，三者均可计算材料生产、运输与安装施工中产生的碳排放，但在实际项目阶段，Pathfinder 与 Bond 的计算精度优于 Carbon Conscience。在运营管护阶段，仅 Pathfinder 具备持续性运营碳排放的数值计算与长期追踪能力。

在绩效报告方面，三者提供的结果也存在差异。Bond 以饼图展示总碳排放、碳固存与碳储存，并提供细项数据与 100 年内的碳中和年限（SET）。Pathfinder 可分项展示隐含碳、运营碳与碳固存数据，以实时图表呈现净碳影响，提供外推至 60 年后的碳中和年限，并分析生物多样性净增益、水资源节约以及热岛效应缓解效果等生态效益指标。Carbon Conscience 则分项汇总隐含碳、碳固存、碳储存以及经济成本，以柱状图实时对比碳平衡。

2.5 适用尺度

碳计算工具的适用尺度直接影响其实践价值。不同工具的功能定位与数据颗粒度各异，适用尺度各有侧重。Bond 聚焦于材料要素的精细化，以核算项目的碳平衡，适用于社区公园、街道绿化等中小尺度项目，但缺乏宏观尺度的数据分析，难以支撑城市绿地网络的碳评估。Carbon Conscience 基于土地类型（如硬质铺装和林地）进行碳影响评估，适用于大型校园、社区以及城市片区绿地等

中宏观尺度项目规划初期的土地用途优化与碳影响预测，但难以支撑微观尺度下要素的优化。Pathfinder 跨尺度适用性较强，既可支持单体公园等中小尺度的项目碳核算，也可用于城市绿地系统的碳效益及生态效益评估（表 8）。

2.6 三种工具的优劣势

综合以上 5 个维度的对比分析，Bond、Carbon Conscience 和 Pathfinder 在城市绿地全生命周期的碳计算上各有优势与局限，为进一步评价其在本土应用表现，研究将上述维度归纳为数据本土化、全周期覆盖、多尺度适配 3 个核心维度进行评分（表 9，图 2）。

总体而言，Pathfinder 的数据及功能覆盖范围最全面，可支撑从公园到城市绿地系统多尺度全生命周期的碳评估，其自定义设计又增强了地区适应性。Bond 在数据和功能上更聚焦于材料要素的计算，更偏向社区、公园等中小型尺度项目的详细碳评估，但地区适应性不佳。Carbon

表 7 碳中和计算工具可应用阶段的对比分析

Tab.7 Comparative analysis of applicable phases for carbon neutrality calculation tools

工具名称	规划阶段	设计阶段	生产施工阶段	运营管护阶段	绩效报告
Bond	×	√ √	√ √	×	饼图展示总碳排放、碳固存与碳储存，提供细项数据，展示碳中和年限
Pathfinder	√	√ √	√ √	√	分项核算隐含碳、运营碳与碳固存，实时图表展示净碳影响与碳中和年限
Carbon Conscience	√ √	√	√	×	柱状图对比展示碳平衡，分项汇总隐含碳、碳固存、碳储存与经济成本

注：× 表示不适宜，√ 表示比较适宜，√ √ 适宜，下同。

表 8 碳中和计算工具适用尺度的对比分析

Tab.8 Comparative analysis of applicable scales for carbon neutrality calculation tools

工具名称	公园要素	公园	城市开放空间	城市绿地系统	典型使用场景
Bond	√	√	×	×	社区公园或街道绿化项目等中小型绿地系统的碳评估
Pathfinder	√	√	√	√	基础设施项目碳中和路径；多尺度城市绿地的全生命周期碳影响及生态效益评估
Carbon Conscience	×	√	√	√	校园等总体规划的土地利用碳影响对比；城市片区开放空间低碳布局优化；混合用途开发项目的建筑与景观整合分析

Conscience 关注宏观规划的数据与功能覆盖，在大型公园等宏观尺度规划项目的低碳方案快速评估方面表现突出，但预设参数选择有限，地区适应性不强。

以上 3 种工具各具特色，在功能上都需进一步深化，可根据项目阶段、尺度与目标灵活选用。综合来看，Pathfinder 综合能力最优，而 Bond 与 Carbon Conscience 则分别在中小尺度精细核算与中宏观规划快速评估中发挥不可替代的作用。

3 三种碳计算工具的局限性与优化建议

3.1 局限性

综合上述分析，现有工具在数据、功能、尺度及智能化方面存在共性局限

1) 数据本土化缺失严重。工具内置的碳计算因子主要基于北美或欧洲的数据与研究，与我国的气候条件、乡土植物、施工工艺及能源结构存在显著差异，易导致计算结果出现系统性偏差。

2) 全生命周期覆盖不全。多数工具集中于计算材料和施工阶段的隐含碳，普遍缺乏对长期运营碳（如灌溉、修剪、施肥能耗）的系统核算，且当前无法对拆除等末端环节进行计算。

3) 跨尺度评估能力割裂。现

有工具在尺度上呈现宏观与微观的分离。宏观规划工具（如 Carbon Conscience）缺乏对具体要素的精细化核算能力；微观设计工具（如 Bond）则难以支撑片区或城市尺度的碳效益评估，无法实现宏观战略与微观落地的有效衔接。

4) 智能化支持不足。工具操作仍以烦琐的手动输入为主，缺乏智能化的参数匹配、数据联动与实时反馈机

制，学习成本较高，限制了其在快速方案比选和面向非专业用户推广中的应用效率。

3.2 优化建议

为克服上述工具局限性，适应我国“双碳”目标与生态文明建设深入实施的要求，推动碳计算工具向精准化、实用化方向升级，研究提出“数据筑基 - 功能完善 - 系统集成 - 智能应用”的系统性优化路径（图 3），旨

表 9 碳中和计算工具在 3 个核心维度上的评分标准

Tab.9 Scoring criteria for carbon neutrality calculation tools across three core dimensions

核心维度	5 分（优秀）	3 分（中等）	1 分（很差）	评分依据
数据本土化	支持全球气候分区与完全自定义核心计算因子	可输入较多实际数据，或提供有限的预设参数	可供输入实际数据少，或无法调整计算因子	综合评估数据来源与地区适应性
全周期覆盖	完整覆盖规划、设计、施工、运营阶段，碳排放（隐含碳和运营碳）与碳汇功能完善	覆盖 2~3 个阶段，碳排放与碳汇功能基本完整，但可能缺失运营碳	仅覆盖 1 个阶段，或碳排放与碳汇计算功能严重缺失	综合评估功能覆盖度与应用阶段
多尺度适配	支持从微观要素到宏观系统的多尺度应用	主要适用于中观尺度，向上或向下延伸能力有限	仅适用于单一尺度	基于适用尺度判断

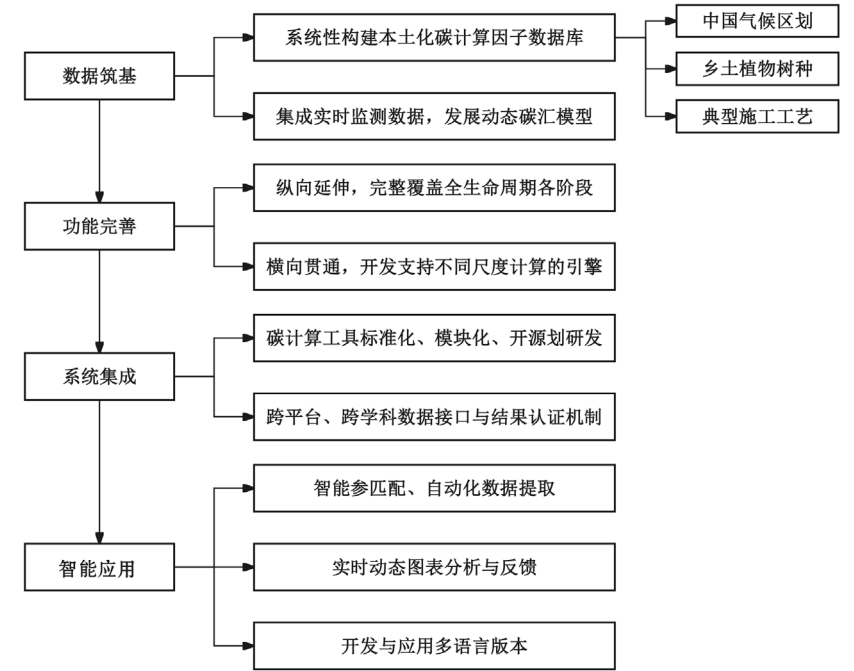


图 3 我国碳中和计算工具系统性的优化路径

Fig.3 Systematic optimization pathways for carbon neutrality calculation tools in China

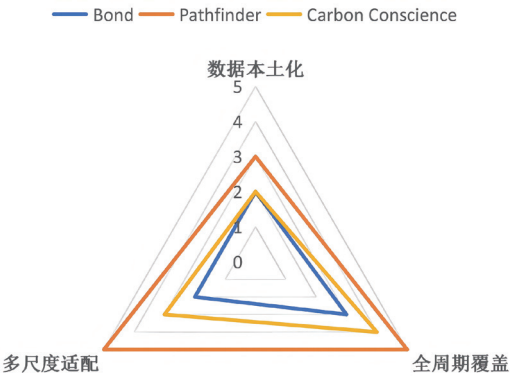


图 2 碳中和计算工具在 3 个核心维度上的评分

Fig.2 Scores of carbon neutrality calculation tools across three core dimensions

在为我国本土化工具的研发提供清晰、可实施的优先级框架。

3.2.1 数据筑基

构建本土化、动态化的碳核算因子数据库。我国城市绿地碳汇计算主要采用实地测量、模型及遥感估测等方法，碳排放核算则多基于 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化专门委员会) 发布的国家温室气体清单指南与生命周期评价 (LCA) [4]。为提升地区适应性，应依据上述方法体系，参考《城市森林碳汇调查及数据采集技术规范》(DB31/T 1232—2020) 等地方标准 [27]，系统采集、整理并验证适用于我国情境的数据。具体路径包括：1) 采集基于我国气候区划、乡土植物物种的生物量、生长量及土壤碳密度参数，可参考国内实证研究中的本地化数据集构建经验 [4,28]；2) 建立涵盖典型景观材料生产、运输、施工及养护的碳排放因子库；3) 集成物联网、遥感等实时监测数据，推动静态数据库向动态碳汇模型演进，实现工具的精准计算。

3.2.2 功能完善

拓展全生命周期与多维度碳影响评估能力。工具功能的完善是提升其科学性与实用性的核心，该阶段需从纵向与横向 2 个维度并行发展：1) 纵向延伸，完整覆盖规划、设计、施工与运营 4 个阶段，将计算边界从隐含碳拓展至运营管护阶段的碳排放以及水体、土壤等碳汇，实现真正的全生命周期评估 [22]；2) 横向贯通，衔接宏观规划与微观设计，支持同一项目在不同尺度下的碳影响分区核算与综合汇总，满足从战略决策到工程设计的全流程需求。其中，宏观层面可参考城市绿地碳平衡与空间格局优化相关研究 [28]，微观层面则可借鉴单株尺度精细化碳足迹核算的方法思路 [29]。

3.2.3 系统集成

构建模块化、开放化的协同平台生态。该阶段需推动工具从“单一计算软件”向“协同工作平台”演进，鼓励工具的标准化、模块化与开源化，建立跨平台、跨学科的数据接口与结果互认机制，形成一个集聚各方成果的开放生态系统，加速技术创新。在此过程中，可借鉴郑曦团队应用的模型耦合思路，将用于宏观结构优化的多目标规划模型 (MOP, Multi-objective programming) 与用于微观格局模拟的斑块生成土地利用模拟模型 (Patch-generating Land Use Simulation, PLUS) 进行整合，实现从定量目标到空间落位的全流程碳效益评估 [28]。

3.2.4 智能应用

深度融合人工智能可提升工具的易用性与决策支持水平，且注重用户体验是实现广泛应用的关键。引入人工智能大模型技术，可实现智能参数匹配、自动化数据提取与实时动态反馈，降低专业门槛，为绿地全生命周期的“高质量、低成本、智能化、低碳化”提供关键技术支撑。同时，应开发多语言版本，推动工具在全球低碳城市建设中的应用。

4 结语

本研究系统对比了 Bond、Carbon Conscience、Pathfinder 三种适用于城市绿地全生命周期的碳计算工具。研究发现，3 种工具在功能上均实现了碳排放与碳汇的综合计算，但在完整性上存在差异，仅 Pathfinder 涵盖运营阶段碳排放计算；在地区适应性方面，3 种工具均以北美数据为基础，于我国直接应用存在数据来源偏差，其中 Pathfinder 支持自定义参数，适应性较强；在可应用阶段与适用尺度上，3 种工具各有侧重，形成互补，Carbon Conscience 适用于规划初期快速评估，Bond 聚焦中小尺度精细核算，Pathfinder 则具备从微观要素到城市系统的多尺度适配能力。总体而言，现有工具在数据本地化、全生命周期覆盖、跨尺度融合等方面仍存在共性局限，难以直接满足中国城市绿地的碳计算需求。

本研究构建了涵盖数据来源、地区适应性、功能覆盖、可应用阶段、适用尺度的多维对比框架，对 3 种代表性工具展开多维深度剖析；并通过西安草皮运输和广州红树林 2 个实例数据，验证了 3 种工具在国内应用的偏差程度，揭示了国际工具本土化应用的核心障碍；最后基于对比分析，提出了“数据筑基—功能完善—系统集成—智能应用”四层级优化路径，为本土化工具研发提供了可操作的优先级框架。

然而，本研究仍存在若干局限：工具筛选主要依据文献提及频率，可能遗漏新近开发或未被文献研究的工具；部分工具（如 Bond）公开文献较少，分析主要基于官方文档，其全面性有待进一步提升；受限于研究周期，未能对同一项目展开工具的全程实际应用及追踪验证。

未来研究可从以下方向进一步深化：一是拓展工具对比广度，纳入更多新近开发工具，在更广泛场景中验证结论的普适性；二是加强本土化实证研究，通过典型案例追踪验证 3 种工具的适用性，持续优化本地化参数；三是基于本研究提出的优化路径，尝试开展本土化碳计算工具的开发，推动理论成果向工程实践转化，为我国城市绿地碳管理提供技术支撑。

注：图片均由作者自绘。

参考文献：

- [1] 王晶懋，齐佳乐，韩都，等. 基于全生命周期的城市小尺度绿地碳平衡 [J]. 风景园林, 2022, 29 (12) : 100-105.
- [2] 张桂莲，邢璐琪，张浪，等. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展 [J]. 园林, 2022, 39 (1) : 4-9.
- [3] 张钦，张达，张希良. 在线监测应用于中国碳排放监测的相关问题和制度建议 [J]. 环境经济研究, 2021, 6 (3) : 136-146.
- [4] 武艳芳，易扬，张桂莲，等. 城市绿地碳核算方法及增汇减排技术研究进展 [J]. 园林, 2024, 41 (7) : 74-80.
- [5] XU M, ZHONG Y, YE Y. Towards Digitalized Urban Planning and

Design of Low-Carbon Cities: Evolution and Application Review of Assessment Tools[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2024, 12 (2) : 9-21.

[6]MYCARBONCURE. Embodied Carbon in Construction Calculator(EC3)-CarbonCure[EB/OL]. (2020-08-11) [2025-09-01]. <https://www.carboncure.com/concrete-corner/embodied-carbon-in-construction-calculator-ec3/>.

[7] 新华日报. 建筑物碳排放 东大有款软件帮你算 [EB/OL]. (2021-09-01) [2025-09-01]. <https://news.edu.cn/2021/Set.0904/c5485a383540/page.htm>.

[8]USDA FOREST SERVICE. i-Tree Eco[EB/OL].[2025-09-01]. <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco>.

[9]DAVEY. National Tree Benefit Calculator[EB/OL].[2025-09-01]. <https://www.davey.com/arborist-advice/articles/national-tree-benefit-calculator/>.

[10] 占珊. CITYgreen 模型对长沙市城市森林生态系统的效益评价研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.

[11]MITHUN. Construction Carbon Calculator[EB/OL]. (2007-10-11) [2025-09-01]. <http://www.buildcarbonneutral.org/>.

[12]RICK TAYLOR. Landscape Carbon Calculation[EB/OL]. (2021-10-01) [2025-09-01]. <https://www.landfx.com/videos/webinars/item/6266-landscape-carbon-calculation.html>.

[13]PAMELA CONRAD. Pathfinder-Improve Our Carbon Impact-Climate Positive Design[EB/OL]. (2025-10-06) [2025-10-25]. <https://climatepositivedesign.com/pathfinder/>.

[14]THE WORLD BANK. The CURB Tool: Climate Action for Urban Sustainability[EB/OL]. (2017-06-01) [2025-09-01]. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/the-curb-tool-climate-action-for-urban-sustainability>.

[15]LARJAVAARA M, KANNINEN M, ALAM S A, et al. CarboScen: a tool to estimate carbon implications of land-use scenarios[J]. ECOGRAPHY, 2017, 40 (7) : 894-900.

[16]SASAKI. Introducing the carbon conscience app[EB/OL]. (2021-11-17) [2025-09-01]. <https://www.sasaki.com/voices/introducing-the-carbon-conscience-app/>.

[17]HENNING LARSEN. Urban Decarb: New Digital Tool Brings Carbon into Focus on the Urban Scale[EB/OL]. (2023-04-20) [2025-09-01]. <https://henninglarsen.com/en/projects/urban-decarb>.

[18] 汪文清, 吴佳鸣, 李惊. 园林绿地碳中和相关计算工具汇总分析与应用研究 [C]// 中国风景园林学会. 中国风景园林学会 2022 年会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[19] 冀媛媛, GENOVESE PAOLO VINCENZO, 卫佳晨. 城市绿地景观全生命周期碳源碳汇量化测算体系的发展、比较及展望 [J]. 天津农学院学报, 2025, 32 (3) : 59-64.

[20] 李惊, 吴佳鸣, 汪文清. 碳中和目标下的风景园林规划设计策略 [J]. 风景园林, 2022, 29 (5) : 45-51.

[21] 胡晓艳. 城市绿地全生命周期碳绩效提升策略研究 [C]// 中国城市规划学会, 合肥市人民政府. 美丽中国, 共建共治共享——2024 中国城市规划年会论文集 (09 城市生态规划). 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.

[22] 王昕歌, 尹正. 基于 Pathfinder 的城市绿地碳汇效益估算及优化——以西安市小雁塔改建前景区为例 [J]. 城市建筑, 2021, 18 (17) : 166-168.

[23] 奥雅股份. 研发专栏: 风景园林碳核算方法及实现途径 [EB/OL]. (2022-08-26) [2025-09-01]. <https://www.aoya-hk.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=11&id=2056>.

[24]MCPHERSON E G, SIMPSON J R. Carbon dioxide reduction

through urban forestry: guidelines for professional and volunteer tree planters: PSW-GTR-171[R]. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 1999: 237.

[25] 国家发展和改革委员会. 商用车燃料消耗量试验方法: GB/T 12545.2—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[26] 韩梦梦, 高育慧, 罗旸武, 等. 华南地区红树林现状及碳汇研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2025, 53 (3) : 10-13.

[27] 张桂莲, 仲启铨, 张浪. 面向碳中和的城市园林绿化碳汇能力建设研究 [J]. 风景园林, 2022, 29 (5) : 12-16.

[28]LIU Y, XIA C, OU X, et al. Quantitative structure and spatial pattern optimization of urban green space from the perspective of carbon balance: A case study in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110034.

[29]LIU Z, YANG F, ZHENG X. Incorporating pruning into the carbon footprint of tree production based on terrestrial laser scanning[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 96: 128357.

作者简介:

李贤基 /2003 年生 /男 /广东湛江人 /本科 /华南农业大学林学与风景园林学院 (广州 510642) /专业方向为风景园林规划与设计、城市绿地碳中和

吴于蓝 /2004 年生 /女 /广东江门人 /本科 /华南农业大学林学与风景园林学院 (广州 510642) /专业方向为风景园林规划与设计、城市绿地碳中和

黄思艺 /2004 年生 /女 /广东潮州人 /本科 /华南农业大学林学与风景园林学院 (广州 510642) /专业方向为风景园林规划与设计、城市绿地碳中和

刘颖怡 /2004 年生 /女 /广东广州人 /本科 /华南农业大学林学与风景园林学院 (广州 510642) /专业方向为风景园林规划与设计、城市绿地碳中和

陈燕明 (* 通信作者) /1975 年生 /女 /广东清远人 /硕士 /华南农业大学林学与风景园林学院 (广州 510642) /副教授 /研究方向为风景园林可持续设计与技术、生态规划、城市低碳发展 /Email: 954277133@qq.com