

基于 i-Tree Canopy 模型的昆明市城市绿地固碳效益评估研究

唐佳

昆明动物园，云南昆明，650032；

摘要：在全球气候治理与城市可持续发展的双重背景下，城市绿地系统的碳汇功能已成为衡量城市生态韧性与低碳发展水平的关键指标。科学量化评估城市绿地的固碳能力，对于支撑城市“双碳”战略的精准落地、优化国土空间格局具有迫切的现实意义。本研究以典型高原城市——云南省昆明市的建设用地（总面积 457 km²）为研究对象，创新性引入由美国农业部林务局开发的 i-Tree Canopy 在线模型。通过高分辨率遥感影像的随机点系统抽样解译技术，快速、高效地廓清了昆明市建成区范围内各类土地覆盖的精细化空间分布格局，并对其绿地年度固碳效益进行了系统性评估，得出昆明市建城区内城市绿地年固碳总量约为 79,258 吨碳，测算出其固碳量的潜在年经济价值约为 2182.5 万元人民币。不仅实证了 i-Tree Canopy 作为城市尺度碳汇普查工具的有效性与适用性，也为昆明市乃至同类高原城市探索了以绿地碳汇提升为核心的城市规划管理路径。

关键词：i-Tree Canopy；城市绿地；碳汇评估；固碳效益；昆明市

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.057

引言

昆明市作为“春城”和生物多样性丰富的典型高原城市，采用 i-Tree Canopy 模型通过随机点抽样与遥感影像解译相结合的方式，精确量化昆明市建设用地内乔木、灌木草坪等不同植被类型的覆盖面积与空间占比，分析城市绿地碳汇的空间分布特征与构成特点，初步估算昆明市城市绿地的年固碳总量及其经济价值，系统评估昆明市建设用地的绿地覆盖状况及其固碳效益，为城市绿色发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取云南省昆明市的主城区建设用地作为研究范围，研究区范围依据 2024 年住建部发布的《城市建设统计年鉴》457 平方公里范围。主要包括五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡区的绝大部分建成区。

1.2 数据来源与处理

本研究的数据处理与分析工作严格遵循 i-Tree Canopy 模型的标准操作流程，确保评估过程的规范性与结果的可重复性。

(1) 研究区边界数据：采用昆明市官方发布的最新版城市开发边界矢量数据（Shapefile 格式），该数据权威定义了 2024 年昆明市集中连片的城市建设用地范围，是本研究进行空间统计和范围限定的根本依据。

(2) 遥感影像数据源：本研究在 i-Tree Canopy v7.1 在线平台中开展。主要调用 2022 年度 Google Earth 的卫星影像作为解译基础。该影像数据空间分辨率优于

0.5 米，能够清晰辨识单个树冠、灌木丛、草坪、道路、屋顶等地表细节，为精确的土地覆盖分类提供了可靠的视觉保障。

(3) 土地覆盖分类体系：根据 i-Tree Canopy 模型的要求并结合昆明城市地表特征，建立了包含六个一级类别的土地覆盖分类体系，用于对每一个随机点进行判定：

- 乔木覆盖：指具有明显木质树干、独立树冠的树木，包括行道树、公园乔木、片林等，其投影垂直覆盖地面。

- 灌木/草坪覆盖：指低矮的木本灌木丛、人工或自然草本草坪、花坛等地被植被。

- 不透水表面：指由人工建筑材料覆盖、基本不透水的硬质表面，包括建筑物屋顶、沥青或水泥道路、广场、停车场等。

- 水体：包括河流、湖泊、水库、池塘等自然或人工水面。

- 裸露土地：指无植被覆盖且未被硬化的自然土壤或沙石地表，如闲置工地、施工裸土、河滩等。

- 其他：无法归入以上五类的特殊地物，在本研究中占比极小。

(4) 随机点抽样与解译：为保证面积估算的统计可靠性，本研究设定了 10,000 个完全随机分布的点位作为抽样样本。在平台上逐一对这 10,000 个随机点所对应的影像位置进行目视解译，判定其所属的土地覆盖类别。可将总面积估算的误差控制在可接受的置信水平内（95% 置信区间）。

1.3 评估方法

本研究的评估方法学核心由面积估算、碳汇计算和不确定性分析三部分组成。

(1) 土地覆盖面积与覆盖率计算:

各类土地覆盖的面积通过其在总随机点中出现的频率进行无偏估计。计算公式为:

$$A_i = \frac{N_i}{N_{total}} \times A_{total}$$

其中, A_i 表示第 i 类土地覆盖的面积 (km^2) , N_i 表示被判属于第 i 类的随机点数量, N_{total} 表示总有效随机点数量 (10,000 点), A_{total} 表示研究区总面积 (457km^2) 。覆盖率 P_i 则为 $A_i/A_{total} \times 100\%$ 。

(2) 绿地年固碳量估算:

i-TreeCanopy 模型采用基于植被类型面积与单位面积年固碳速率的乘积法来估算碳汇。计算公式为:

$$C_{seq} = \sum (A_i \times R_i)$$

其中, C_{seq} 为年固碳总量 (吨碳/年), A_i 为第 i 类植被的面积 (需转换为公顷, ha), R_i 为该类植被的单位面积年固碳速率 (吨碳/公顷/年)。

本研究采用模型推荐的默认标准参数, 该参数体系综合了北美地区大量相关研究, 具有广泛的参考价值:

- 乔木覆盖: $R_{tree}=5.5\text{tC/ha/yr}$
- 灌木/草坪覆盖: $R_{shrub/grass}=0.8\text{tC/ha/yr}$

最终, 将固碳量 (吨碳) 乘以二氧化碳与碳的分子量比值 ($44/12 \approx 3.67$), 即可换算为二氧化碳当量 (tCO_2e)。

(3) 碳汇经济价值估算:

为将生态效益货币化, 本研究引入碳交易市场价值进行估算。参考国内权威的“复旦碳价指数”发布的 2025 年下半年全国核证自愿减排量 (CCER) 的预期平均价格, 取 75 元人民币/吨 CO_2 当量作为基准碳价。计算公式为:

$$V_{carbon} = C_{seq_CO2e} \times P_{carbon}$$

其中, V_{carbon} 为年固碳经济价值 (元/年), C_{seq_CO2e} 为年固碳 CO_2 当量 (吨/年), P_{carbon} 为碳价 (元/吨)。

(4) 不确定性分析与误差估计:

考虑到抽样和解译过程中存在的不确定性, 模型基

于二项分布原理, 自动计算了各类土地覆盖面积占比的 95% 置信区间。总固碳量的不确定性则通过误差传递公式进行估算。

2 结果与分析

2.1 城市土地覆盖空间格局解析

通过对 10,000 个随机点的系统解译与统计, 昆明市 457 km^2 建设用地范围内的土地覆盖结构得以清晰呈现 (表 1)。

表 1 昆明市建设用地土地覆盖结构及其统计不确定性

土地类型	面积(km^2)	占比(%)	95%置信区间
乔木覆盖	137.56	30.1	29.3-30.9
灌木草坪	58.95	12.9	12.3-13.5
不透水表面	237.00	51.9	50.9-52.9
水体	5.00	1.1	0.9-1.3
裸露土地	18.49	4.0	3.7-4.3
合计	457.00	100.0 -	

(注: 置信区间反映了基于 10000 个抽样点估算覆盖率时的统计误差范围。)

深度分析:

(1) 结果显示, 昆明市建设用地的综合绿化覆盖率 (乔木+灌木草坪) 高达 43.0%。其中乔木覆盖独占 30.1%, 占比达到绿化总面积的 70%。表明昆明市城市绿地并非以低生态效益的草坪为主, 而是形成了以乔木群落为骨架的相对健康、稳定的植被结构, 为高效碳汇奠定了基础。不透水表面 (硬化地表) 占比为 51.9%。相较于国内许多快速扩张的超大城市 (其不透水表面占比常超过 60%甚至 70%) 处于相对较低水平, 城市热岛效应相对缓和。

(2) 结合昆明城市空间发展历史可知, 碳汇密度呈现“中心城区低、外围区域高”的圈层式分布特征。老城区建筑密集, 以点状、线状绿化为主; 而城市外围的公园、景区、防护林带以及部分“山体入城”的区域, 则形成了片状、大规模的乔木林地, 成为城市碳汇的“高地” 和“稳定器”。

2.2 绿地固碳效益评估与经济价值转化

基于上述土地覆盖面积, 应用 i-Tree Canopy 标准固碳速率参数, 昆明市城市绿地的年度固碳效益及其经济价值得以量化 (表 2)。

表 2 昆明市城市绿地年固碳效益评估结果

植被类型	面积(km^2)	固碳速率(tC/ha/yr)	年固碳量(tC/yr)	当量($\text{tCO}_2\text{e}/\text{yr}$)	贡献率(%)
乔木	137.56	5.5	75,658	277,665	89.2
灌木草坪	58.95	0.8	4716	17,311	10.8
合计	196.51	-	79,258	290,876	100.0

深度分析：

(1) 碳汇总量与结构：昆明市城市绿地每年可固定约 7.93 万吨碳，相当于吸收并封存了约 29.09 万吨二氧化碳，抵消了约 6 万辆私家车的年碳排放量。

(2) 固碳经济价值显性化：根据“复旦碳价指数”75 元/吨 CO₂ e 的预期价格测算，昆明市现状绿地年固碳量的潜在经济价值约为 2182.5 万元人民币/年。相当于创造了两千余万元的“绿色 GDP”。若未来碳价上涨或通过专业开发将其纳入碳交易市场，这部分价值还将进一步放大。

2.3 城市绿地碳汇提升潜力分析

面向“双碳”目标，在现状固碳效益的基础上，挖掘未来增汇潜力至关重要。昆明市建设用地内仍有约 260.49 km² (57%) 的非绿化用地（不透水表面 237 km² + 裸露土地 18.49 km² + 水体 5 km²，其中水体碳汇机制不同暂不计入潜力），这些是未来城市绿色空间“存量更新”和“增量提质”的主战场。

(1) 立体绿化对“硬化空间”的突破：针对占比最大的不透水表面（主要是建筑与道路），发展立体绿化是唯一出路。假设通过政策激励与技术推广，能在约 30%（即 71 km²）的建筑屋顶、墙体、桥体等实施立体绿化，即使按较低的灌木/草坪固碳速率 (0.8 tC/ha/yr) 计算，理论上每年可新增固碳约 0.57 万吨碳 (2.09 万吨 CO₂ e)。

(2) 生态修复对“灰色斑块”的转化：针对约 80% (即 14.8 km²) 的裸露土地，通过简单的植被恢复工程转化为绿地，若其中一半为乔木林地，一半为灌草，则可新增年固碳约 0.45 万吨碳 (1.65 万吨 CO₂ e)。

(3) 结构优化对“现有绿地”的增效：在现有绿地上，通过增补高碳汇乡土乔木、优化绿地结构、精细化养护管理等措施，有望将现有乔木林地的固碳效率提升 10%-15%。

综合而言，若上述潜力被充分挖掘，昆明市城市绿地年固碳量有望在现有基础上增加约 20%-30%，其对应的经济价值也将同步增长，为实现城市碳中和目标贡献自然解决方案。

3 结论与讨论

本研究通过应用 i-Tree Canopy 模型对昆明市建设

用地进行了系统性评估，得出以下核心结论：

(1) 格局清晰：昆明市展现了高原城市优良的生态本底，建设用地内绿化覆盖率高达 43.0%，且以乔木覆盖 (30.1%) 为主导，形成了相对合理的绿地结构。

(2) 效益显著：现状城市绿地系统年固碳量约为 29.1 万吨 CO₂ 当量，其潜在经济价值达 2182.5 万元/年，相当于中和了约 6 万辆私家车的年碳排放。

(3) 结构关键：乔木是城市碳汇的绝对主力，其单位面积固碳效率是灌木草坪的近 7 倍，这为未来的绿地建设指明了“以乔木为本”的提质增效方向。

(4) 潜力巨大：占建设用地 57% 的非绿化用地（尤其是建筑屋顶和裸露土地）是未来增汇的“主战场”，通过立体绿化和生态修复，理论上可新增 20%-30% 的碳汇能力。

(5) 工具可行：i-Tree Canopy 模型被证明是适用于昆明市城市尺度碳汇快速普查的有效工具，但其参数的本地化校正是提升精度的关键。

城市的绿色低碳转型是一场深刻而长期的系统性工程。本研究仅是运用现代化工具体系摸清昆明市城市绿地碳汇“家底”的第一步。未来期望通过持续的参数本地化、技术融合与长期监测，能够构建起一个更加精准、动态、业务化的昆明城市生态系统碳收支监测评估平台。不仅能为昆明市科学推进碳中和提供“看得见、算得清、管得住”的数据支撑，也能为全球同类型高原城市的绿色低碳发展贡献“昆明智慧”与“中国方案”。让“春城”的绿意，不仅带来四季如春的舒适，更成为驱动城市高质量发展的绿色新动能。

参考文献

- [1] Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. Environmental Pollution, 178, 229–236.
- [2] i-Tree Canopy Manual. (2023). USDA Forest Service & Partners.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. (2024). 城市绿化规划建设指标.
- [4] 李俊祥, 等. 2021. 中国城市绿地碳汇研究进展. 生态学报, 41(5): 1987–1998.