

乐山绿心公园不同干扰强度对慈竹生物量碳的影响

肖利沙, 彭俊豪, 胡霞, 张喜亭*

乐山师范学院生命科学院, 四川 乐山

收稿日期: 2026年7月29日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年10月8日

摘要

城市公园人为活动会改变竹林群落结构与碳汇功能,但目前城市绿地慈竹碳储量对人为干扰的响应特征及核心驱动因子尚不明确,相关实证研究较为薄弱。本文以乐山市绿心公园慈竹林为研究对象,依据样地与步道的距离差异,划分高强度干扰(0~10 m)、中度干扰(10~20 m)、低度干扰(>20 m)三类干扰梯度,野外测定坡度、郁闭度、慈竹胸径、株高、立竹密度等指标,结合生物量计量模型估算地上生物量碳储量。采用单因素方差分析、Pearson相关性分析及逐步回归分析,探究人为干扰强度与环境结构因子对慈竹林碳储量的影响规律。结果表明:(1)慈竹生物量碳储量在不同干扰梯度下差异显著,整体表现为中度干扰(68.26 t/hm²) > 低度干扰(37.12 t/hm²) > 高度干扰(19.73 t/hm²),其中中度干扰碳储量较高度、低度干扰分别显著提升245.97%、83.89%;(2)Pearson相关性分析表明,坡度、样地距步道距离与碳储量无显著相关,而郁闭度、立竹密度、平均胸径为核心影响因子,与碳储量呈极显著正相关,慈竹株高与碳储量呈显著正相关;(3)逐步回归分析进一步筛选出立竹密度、平均胸径为碳储量的主导影响因子,二者可共同解释95.5%的碳储量变异,且立竹密度的影响强度更高。适度人为干扰可有效优化慈竹林群落结构,平衡种群种内竞争,改善植株生长条件,显著提升单位面积生物量碳储量。本研究明确了城市公园不同人为干扰梯度下慈竹林碳储量的差异化响应规律与核心驱动机制,可为乐山绿心公园竹林精细化管护与城市绿地碳汇提升提供数据支撑。

关键词

绿心公园, 人为干扰, 生物量碳, 慈竹

Effects of Different Disturbance Intensities on Biomass Carbon of *Bambusa emeiensis* in Leshan Green Heart Park

Lisha Xiao, Junhao Peng, Xia Hu, Xiting Zhang*

*通讯作者。

文章引用: 肖利沙, 彭俊豪, 胡霞, 张喜亭. 乐山绿心公园不同干扰强度对慈竹生物量碳的影响[J]. 林业世界, 2026, 15(4): 814-820. DOI: 10.12677/wjf.2026.154094

Abstract

Human activities in urban parks can alter the community structure and carbon sequestration capacity of bamboo forests. However, the response characteristics and core driving factors of *Bambusa emeiensis* carbon storage to anthropogenic disturbance in urban green spaces remain unclear, and relevant empirical research is insufficient. Taking the *Bambusa emeiensis* forests in Leshan Green Heart Park as the research object, three disturbance gradients were classified based on the distance between sample plots and trails: high-intensity disturbance (0~10 m), moderate-intensity disturbance (10~20 m), and low-intensity disturbance (>20 m). Field measurements were conducted on indicators including slope, canopy closure, DBH of *Bambusa emeiensis*, plant height and culm density, and the above-ground biomass carbon storage was estimated using a biomass measurement model. One-way analysis of variance, Pearson correlation analysis and stepwise regression analysis were adopted to explore the influence rules of anthropogenic disturbance intensity and environmental structural factors on carbon storage of *Bambusa emeiensis* forests. The results showed that: (1) The biomass carbon storage of *Bambusa emeiensis* differed significantly across disturbance gradients, ranking as moderate disturbance (68.26 t/hm²) > low disturbance (37.12 t/hm²) > high disturbance (19.73 t/hm²). Compared with high and low disturbance groups, the carbon storage under moderate disturbance increased significantly by 245.97% and 83.89%, respectively; (2) Pearson correlation analysis revealed that slope and the distance from plots to trails had no significant correlation with carbon storage. Canopy closure, culm density and average DBH acted as core influencing factors and exhibited extremely significant positive correlations with carbon storage, while the plant height of *Bambusa emeiensis* was significantly positively correlated with carbon storage; (3) Stepwise regression analysis further screened culm density and average DBH as the dominant factors affecting carbon storage, which jointly explained 95.5% of the variation in carbon storage, and culm density exerted a stronger influence. Moderate anthropogenic disturbance can effectively optimize the community structure of *Bambusa emeiensis* forests, balance intraspecific competition and improve plant growth conditions, thereby significantly increasing biomass carbon storage per unit area. This study clarifies the differential response patterns and core driving mechanisms of carbon storage in *Bambusa emeiensis* forests under different anthropogenic disturbance gradients in urban parks, and provides data support for refined management of bamboo forests and carbon sequestration improvement of urban green spaces in Leshan Green Heart Park.

Keywords

Leshan Green Heart Park, Anthropogenic Disturbance, Biomass Carbon, *Bambusa emeiensis*

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

竹林是亚热带重要的森林植被类型, 具有生态固碳、水土保持和景观营造等多种功能[1]。慈竹作为我国西南地区山地公园、城市绿化的优势竹种, 具备生长适应性强、更新繁殖速度快等特点, 其生物量碳储量直接影响区域森林生态系统稳定性[2][3]。城市森林易受频繁人为干扰, 人为活动是关键环境驱动

因子,可显著改变竹林群落结构与生长状态[4]。探究慈竹生物量碳对不同干扰强度的响应规律,能够揭示人为干扰对城市竹林生态系统的作用机制,为城市竹林生态管护与碳汇保护提供理论支撑[5]。

乐山绿心公园是乐山城区核心生态绿地,竹林覆盖规模较大,长期受到旅游踩踏、管护施肥等人为活动干扰[6]。本研究以样地距步道距离表征人为干扰强度,划分高、中、低三级干扰梯度。不同干扰强度可改变竹林光照、通风等微生境条件,影响慈竹生长发育与干物质积累,进而调控生物量碳储量[2]。其中,高强度干扰易造成生境胁迫抑制竹林生长,长期低度干扰则易导致竹林种内竞争加剧,同样限制碳汇积累。目前围绕绿心公园竹林的研究多集中于生长特征与资源调查[7],针对不同人为干扰梯度下慈竹生物量碳动态变化及环境驱动机制的系统性研究仍较为匮乏。

基于此,本研究以乐山绿心公园不同干扰等级的慈竹群落为研究对象,通过野外固定样方调查与指标测定,结合慈竹生物量计量模型估算生物量碳储量。通过分析不同干扰强度下慈竹立竹密度、胸径、株高及环境因子的差异特征,探究人为干扰及环境因子对慈竹地上碳储量的影响机制。本研究可补充川南城市公园竹林碳汇基础数据,可为乐山绿心公园竹林精细化管护提供科学参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

嘉州绿心公园(103°42'42.00"~103°45'10.57"E, 29°33'44.37"~29°35'40.11"N)作为中国地级市中最大的城市中心绿地,总规划保护面积达 10.77 km²,有“乐山城市之肺”之称[8]。其坐落于岷江与青衣江环绕的浅丘陵地带,地貌起伏平缓。园区森林覆盖率高达 79.63%,植被基底优越,植被类型以亚热带常绿次生阔叶林和人工混交林为主,竹林资源广泛。其中,慈竹为区域优势乡土竹种,主要分布于园区中低海拔坡地、林缘及沟谷地带,群落结构完整、成片分布且受步道人为干扰梯度明显,具备开展竹林碳汇干扰响应研究的典型条件。

2.2. 调查方法

本研究于 2026 年 6 月在乐山市绿心公园开展野外样方调查。依据样地与步道的距离梯度及对应的人为活动强度,将研究区划分为高度、中度、低度三类人为干扰梯度,其中:高度干扰区距步道 0~10 m,中度干扰区距步道 10~20 m,低度干扰区距步道>20 m。本次调查共设置 19 块 10 m×10 m 标准样方,其中高度、中度干扰梯度各设置 7 块样方,低度干扰梯度设置 5 块样方。野外调查过程中,系统记录各样方内慈竹立竹数量、平均胸径、平均株高等生长指标,同步测定样方郁闭度、坡度、坡向、样方至最近步道距离等环境因子。慈竹生物量模型为 $W = 0.063 (D^2H)^{0.696}$,慈竹各器官碳含量均值为 0.444,用于计算慈竹生物量碳含量[9]。

2.3. 数据处理方法

运用 Excel 2016 对调查的数据进行整理与计算,运用 SPSS 19.0 进行统计学分析。通过单因素方差分析对比三类干扰梯度下慈竹株高、胸径、立竹密度的差异特征;采用 Pearson 相关性分析探究慈竹生物量碳与坡度、郁闭度、立竹数量、株高、胸径、步道距离等因子的相关关系;进一步通过逐步多元回归分析筛选影响慈竹生物量碳的核心驱动因子,构建最优回归模型。

3. 结果与分析

3.1. 不同干扰强度样方内慈竹高度、胸径、郁闭度、立竹密度差异

通过对乐山绿心公园慈竹林高、中、低三类干扰强度区域 19 个样方的调查数据分析可知,不同干扰

强度慈竹生长特征存在显著差异(如表 1)。中度干扰慈竹高度最高, 平均高度为 13.80 m, 其次为低度干扰, 平均高度为 13.77 m; 高度干扰区域慈竹高度最低, 平均高度为 11.55 m。中度干扰区域与低度干扰区域慈竹高度分别比高度干扰区域高出 19.48%和 19.22%, 中度干扰区域与低度干扰区域慈竹高度差异不显著。中度干扰慈竹胸径最大, 均值为 7.20 cm; 其次为高度干扰(5.58 cm), 低度干扰最小(5.33 cm)。中度干扰慈竹平均胸径比高度干扰、低度干扰分别高出 29.03%和 35.80%, 高度干扰和低度干扰区域慈竹平均胸径差异不显著。中度干扰区域立竹密度最高, 平均立竹密度为 25414.29 株/hm², 其次为低度干扰区域, 平均立竹密度为 21120.00 株/hm²; 高度干扰区域平均立竹密度最低, 仅有 11328.57 株/hm²。中度干扰区域和低度干扰区域慈竹立竹密度分别比高度干扰区域显著高出 124.34%和 86.43%, 中度干扰区域与低度干扰区域立竹数差异不显著。中度干扰区域平均郁闭度为 0.67, 高度干扰区域郁闭度为 0.38, 二者存在显著差异; 低度干扰郁闭度 0.54, 与中度、高度干扰均无显著差异。

Table 1. Statistical differences in height, DBH, canopy density, and culm density of *Bambusa emeiensis* among plots with different disturbance intensities

表 1. 不同干扰强度样方内慈竹高度、胸径、郁闭度、立竹密度差异统计表

指标	干扰类型	均值	标准误	95%置信区间 下限	95%置信区间 上限
平均高度/m	低度干扰	13.77a	0.48	12.45	15.10
	中度干扰	13.80a	0.59	12.35	15.25
	高度干扰	11.55b	0.60	10.09	13.01
平均胸径/cm	低度干扰	5.33a	0.16	4.87	5.79
	中度干扰	7.20b	0.38	6.28	8.13
	高度干扰	5.58a	0.45	4.48	6.68
立竹密度(株/hm ²)	低度干扰	21120.00a	2766.12	13440.03	28799.97
	中度干扰	25414.29a	1548.64	21624.90	29203.68
	高度干扰	11328.57b	971.92	8950.37	13706.77
郁闭度	低度干扰	0.54ab	0.05	0.41	0.66
	中度干扰	0.67a	0.05	0.55	0.80
	高度干扰	0.38b	0.05	0.25	0.51

注：同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3.2. 不同干扰强度区域慈竹生物量碳差异

通过计算得出三种干扰强度下慈竹生物量碳, 由图 1 可知, 中度干扰样地生物量碳最高, 达 68.26 t/hm²; 低度干扰为 37.12 t/hm², 高度干扰最低, 仅为 19.73 t/hm²。中度干扰生物量碳比高度干扰显著高出 245.97%, 比低度干扰显著高出 83.89%。可以看出, 在中度干扰下, 慈竹的高度、胸径、立竹数占显著优势, 从而决定了其生物量碳显著高于高度干扰与低度干扰。高度干扰与低度干扰在慈竹高度和胸径上差异不显著, 在立竹数上差异显著, 导致低度干扰区域的生物量碳显著高于高度干扰区域。

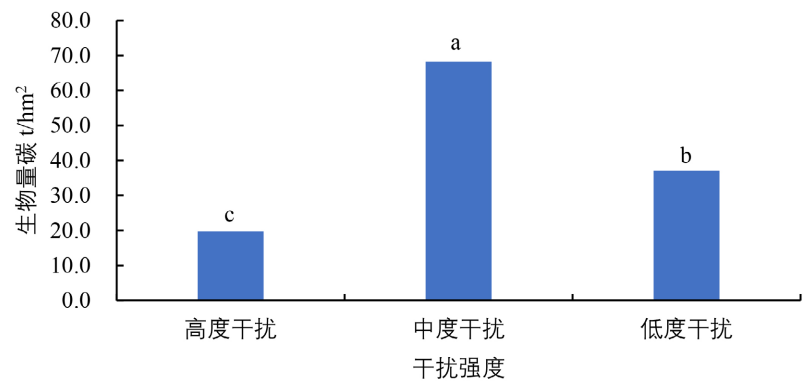


Figure 1. Comparison of biomass carbon of *Bambusa emeiensis* across areas with different disturbance intensities
图 1. 不同干扰强度区域慈竹生物量碳对比图

3.3. 慈竹生物量碳与影响因子的相关分析

由表 2 可见，坡度和样方距步道距离与慈竹生物量碳无显著相关性，不是影响慈竹生物量碳的关键因子；慈竹林生物量碳与慈竹高度呈显著正相关。郁闭度、立竹密度、慈竹胸径是影响慈竹林生物量碳储量的核心因子，三者均与慈竹林生物量碳储量呈极显著正相关，即郁闭度、立竹密度、慈竹胸径越高，慈竹林生物量碳储量越高，其中立竹密度与慈竹林生物量碳相关系数最高(0.877)，说明立竹密度是影响慈竹林生物量碳储量的主要因子。

Table 2. Statistical correlation analysis between biomass carbon of *Bambusa emeiensis* and influencing factors
表 2. 慈竹生物量碳与影响因子的相关分析统计表

	相关系数	显著性
坡度	0.283	0.241
郁闭度	0.790**	0.000
立竹密度	0.877**	0.000
慈竹胸径	0.732**	0.000
慈竹高度	0.486*	0.035
样方距步道距离	0.391	0.098

注：*表示显著相关($P < 0.05$)，**表示极显著相关($P < 0.01$)。

3.4. 慈竹生物量碳储量逐步多元线性回归分析

以慈竹林生物量碳储量为因变量，坡度、郁闭度、立竹密度、慈竹高度、慈竹胸径、样方距步道距离为自变量开展逐步多元线性回归分析，如表 3 可知，最终筛选出立竹密度、平均胸径 2 个显著影响因子，构建最优回归模型 $y = 0.002C + 8.926D - 54.765$ 。模型整体极显著($F=193.782, P < 0.001$)，且调整 $R^2 = 0.955$ ，说明立竹密度与平均胸径可共同解释 95.5%的慈竹生物量碳储量的变化，模型拟合效果较好。慈竹密度的标准化系数 Beta (0.702)大于平均胸径的标准化系数 Beta (0.472)，说明慈竹密度对慈竹生物量碳储量的影响大于平均胸径，二者均呈极显著正相关($P < 0.001$)；且二者自变量的 $VIF = 1.160$ ，远小于临界阈值 10，表明模型无多重共线性。

Table 3. Stepwise multiple linear regression analysis of biomass carbon stock of *Bambusa emeiensis*
表 3. 慈竹生物量碳储量逐步多元线性回归分析表

变量	非标准化系数	标准误	标准化系数 Beta	t	P	方差膨胀因子 VIF
常量	-54.765	5.969		-9.148		
立竹密度(C)	0.002	0.000	0.702	13.089	0.000	1.160
平均胸径(D)	8.926	1.015	0.472	8.798	0.000	1.160

4. 讨论

4.1. 不同干扰强度对慈竹生长的影响

本次针对乐山绿心公园 19 块样方的调查结果表明，在中度干扰与低度干扰下，慈竹平均高度高于高度干扰下的慈竹平均高度，且中度干扰与低度干扰下的慈竹平均高度差异不显著。究其原因，高度干扰下存在人为定期砍伐、步道踩踏的情况，会使慈竹的新生竹笋遭到损坏、成年慈竹数量减少，从而抑制了慈竹的正常生长，限制了慈竹的生长高度[10]。中度干扰慈竹胸径、郁闭度、立竹密度均高于低度、高度干扰林地。低度干扰长期缺乏人工抚育，立竹密度大、种内竞争激烈，光照与养分供给不足，单株生长受限，胸径偏小；中度人为干扰可疏伐调整种群结构，改善林内光照，均衡养分分配，利于慈竹个体发育。高度干扰虽存在采伐胁迫，但老龄弱竹被移除，留存竹株竞争压力低于低度干扰，因此平均胸径略大于低度干扰。综合生长指标可见适度人为干扰可优化慈竹林分结构、促进慈竹生长，提升竹林长势[11]。

4.2. 环境因素对慈竹林生物量碳储量的影响

本研究表明，坡度、样方距步道距离与慈竹生物量碳无显著相关，并非碳储量关键驱动因子。郁闭度、立竹密度、平均胸径、慈竹平均高和生物量碳呈显著正相关。竹林植株数量、个体粗度、冠层结构直接决定群落光合生产能力，对碳储量影响更强。逐步多元回归筛选出立竹密度、平均胸径构建最优模型，二者可共同解释 95.5% 慈竹生物量碳储量变化，模型拟合程度高。标准化系数显示立竹密度对碳储量贡献更大：立竹密度决定竹林总生物量基数，平均胸径代表单株发育水平，二者协同推动碳储量提升。郁闭度、慈竹高度虽与碳储量显著相关，但未纳入回归方程。主要原因是郁闭度与立竹密度、平均胸径高度相关，存在耦合关系；慈竹高度生长也依赖密度与粗度带来的空间、养分条件。同时郁闭度与竹株生长存在双向调控关系，既受植株数量、粗度影响，也反向制约竹笋萌发与个体发育。从经营角度，调控立竹密度、培育粗壮大竹是提升慈竹林碳汇的核心手段。中度干扰样地恰好形成合理竹株密度与生长条件，因此碳储量显著优于高度、低度干扰林地，适度人为干扰可优化林分结构，提升竹林碳汇潜力[12]。

4.3. 研究不足与启示

本研究直接套用现有慈竹异速生长模型，未建立本地化慈竹生物量方程，慈竹生物量碳储量估算的精度有限；同时仅测定郁闭度、坡度等环境指标，未量化林下光照、土壤养分等关键生境因子，难以直接验证中度干扰通过优化微环境提升竹林碳汇的内在机制。后续研究可通过土钻、挖取小样方采集地下根系、竹鞭等样品校验模型估算结果，采用标准木取样构建区域专属慈竹生物量模型；同步利用光量子计、鱼眼相机测定冠层光照，检测样方土壤理化指标，将光照、土壤养分与慈竹生长、碳储量耦合分析，为中度干扰促进竹林碳汇的作用机理提供数据支撑。

基金项目

四川林业草原竹纤维营养创新开发工程技术中心项目(PETC202609); 大学生创新创业项目(S202610649068; 202610649022)。

参考文献

- [1] 傅乐乐, 苏建兰. 中国竹林碳汇量测算及其潜力预测[J]. 中国林业经济, 2023(3): 96-102.
- [2] 李尚益, 方晰, 陈金磊, 等. 人为干扰对中亚热带森林生物量及其空间分布格局的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6111-6124.
- [3] 黄文韬, 罗军, 王思瑶, 等. 4 种气候变化情景下梁山慈竹在中国的潜在适生区预测[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(8): 103-112.
- [4] 吴一凡, 徐文辉. 基于人为干扰评价的城郊森林公园边界区域识别[J]. 现代园艺, 2025, 48(11): 38-43.
- [5] 刘兴良, 李旭华, 刘杉, 等. 人为干扰对中国次生林的影响: I. 林木生长、更新与群落结构[J]. 四川林业科技, 2022, 43(3): 1-12.
- [6] 张家喜, 杨雅淋. 乐山市绿心公园不同林分草本植物多样性研究[J]. 农业与技术, 2023, 43(21): 58-63.
- [7] 陈申芝, 曹成全, 鲜黎明, 等. 乐山市绿心公园三叶虫萤生境分析与夜间活动规律[J]. 乐山师范学院学报, 2014, 29(12): 47-50.
- [8] 刘欣兰, 农向, 黄兰英, 等. 乐山嘉州绿心公园巨桉感染焦枯病的调查[J]. 乐山师范学院学报, 2018, 33(8): 23-28.
- [9] 张楠, 易桂林, 贾廷彬, 等. 宜宾市主要丛生竹种碳计量方法初探[J]. 农业技术与装备, 2023(8): 106-109, 112.
- [10] 肖玖金, 张健, 杨万勤, 等. 巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤动物群落对采伐干扰的初期响应[J]. 生态学报, 2008(9): 4531-4539.
- [11] 李昊男. 近海养殖对红树林生长的影响评价和调控: 基于中度干扰假说的实证研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [12] 田爽, 刘钢. 辽河流域大型底栖动物群落调查检验中度干扰假说[J]. 江西水产科技, 2022(1): 48-50.